

Энергетические переходы в двухслойной вихреразрешающей модели Черного моря

А. А. Павлушин*, Н. Б. Шапиро, Э. Н. Михайлова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: pavlushin@mhi-ras.ru*

Поступила в редакцию 09.01.2019 г., после доработки – 20.01.2019 г.

Цель. Проведен энергетический анализ результатов численного эксперимента по моделированию крупномасштабной циркуляции в Черном море в рамках двухслойной вихреразрешающей модели под воздействием касательного напряжения ветра. Основная цель работы состоит в том, чтобы определить направление и величину переходов энергии, сопровождающих процессы формирования крупномасштабных течений и мезомасштабных вихрей в море.

Методы и результаты. Анализ проводится для периода статистического равновесия, в котором средние значения всех рассчитываемых в модели характеристик остаются постоянными во времени. С помощью метода осреднения Рейнольдса в модели произведено разделение энергетических характеристик (механической энергии и ее переходов) по масштабам движения на относящиеся к крупномасштабным течениям и к вихрям. Крупномасштабные течения определяются как средние потоки за некоторый выбранный временной интервал, а отклонения от них считаются вихрями. Анализируются осредненные по времени и/или по пространству энергетические характеристики. Для периода статистического равновесия рассчитаны энергетические диаграммы, демонстрирующие вклад крупномасштабных течений и вихрей в общую механическую энергию, величины и направления переходов энергии. Для того же периода построены осредненные по времени поля составляющих энергии и работы сил, участвующих в энергетическом балансе.

Выводы. Показано, что бароклинная неустойчивость крупномасштабного течения является основной причиной меандрирования Основного Черноморского течения, а переход энергии в нижний слой осуществляется вследствие бароклиновой неустойчивости вихрей. Установлено, что большую долю энергии от ветра море получает в его восточной половине, а теряет в западной и северо-западной области бассейна. Основная часть диссипации энергии обеспечивается работой сил трения на нижней границе верхнего слоя в области пересечения поверхности раздела слоев с дном.

Ключевые слова: кинетическая энергия, доступная потенциальная энергия, энергетический баланс, численная модель, Черное море, энергетическая диаграмма, взаимодействие вихрей и крупномасштабных течений.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений».

Для цитирования: Павлушин А. А., Шапиро Н. Б., Михайлова Э. Н. Энергетические переходы в двухслойной вихреразрешающей модели Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 3. С. 201–219. doi:10.22449/0233-7584-2019-3-201-219

Energy Transitions in the Two-Layer Eddy-Resolving Model of the Black Sea

A. A. Pavlushin*, N. B. Shapiro, E. N. Mikhailova

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

**e-mail: pavlushin@mhi-ras.ru*

Purpose. Performed is the energy analysis of the numerical experiment results obtained from modeling of the large-scale circulation in the Black Sea within the framework of a two-layer eddy-resolving model under the tangential wind stress forcing. The paper is aimed at determining directions and magnitudes of the energy transitions accompanying formation of the large-scale flows and mesoscale eddies in the sea.

Methods and Results. The analysis is carried out for the period of statistical equilibrium in which the average values of all the characteristics calculated in the model remain constant in time. According to the motion scales, the Reynolds averaging method permits to divide the energy characteristics (mechanical energy and its transitions) into those relating to the large-scale flows and – to the eddies. The large-scale currents are defined as average flows over a certain selected time interval, and the deviations from them are considered to be the vortices. The energy characteristics averaged over time and/or space, are analyzed. For the period of statistical equilibrium, calculated are the energy diagrams showing contribution of the large-scale currents and the vortices to the total mechanical energy, to the magnitudes and directions of energy transitions. The time-averaged fields both of the energy components and the forces involved in the energy balance were constructed for the same period.

Conclusions. It is shown that baroclinic instability of a large-scale flow is the main cause of the Rim Current meandering, and the energy is transferred to the bottom layer due to baroclinic instability of the eddies. It has been revealed that a large portion of wind energy falls on the eastern part of the sea, whereas the energy losses take place in the western and northwestern regions of the basin. The basic part of energy dissipation takes place due to the friction forces' work on the lower boundary of the upper layer in the area where the layers' interfaces intersect the bottom.

Keywords: kinetic energy, available potential energy, energy balance, numerical model, Black Sea, energy diagram, eddy–mean flow interactions.

Acknowledgements: the investigation is carried within the state task on theme No. 0827-2018-0002 “Development of the methods of operational oceanology based on the interdisciplinary studies of the marine environment formation and evolution processes, and mathematical modeling using the data of remote and direct measurements”.

For citation: Pavlushin, A.A., Shapiro, N.B. and Mikhailova, E.N., 2019. Energy Transitions in the Two-Layer Eddy-Resolving Model of the Black Sea. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(3), pp. 185-201. doi:10.22449/1573-160X-2019-3-185-201

Введение

В последние три года нами проводятся численные эксперименты по моделированию крупномасштабной циркуляции и вихревых структур в Черном море [1, 2]. Главная цель работы состоит в том, чтобы лучше разобраться в механизмах формирования и изменчивости поля течений, оценить влияние на эти процессы различных факторов. При этом на данном этапе исследования используется двухслойная вихререзающая модель, аналогичная модели Холланда – Лина [3], основанная на полной системе нелинейных уравнений геофизической гидродинамики в приближении Буссинеска, гидростатики и «твердой крышки». В модели учитываются реальный рельеф дна и β -эффект, в качестве возбуждающей силы рассматривается только касательное напряжение ветра на поверхности моря. Диссипация энергии проис-

ходит вследствие горизонтальной турбулентной вязкости, придонного трения и трения на поверхности раздела слоев. Рельеф дна, придонное трение и трение на поверхности раздела слоев в модели Холланда – Лина [3] не учитывались.

Уравнения модели в декартовых координатах (ось X направлена на восток, ось Y – на север) записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1 h_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1^2 h_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1 u_1 h_1}{\partial y} - f v_1 h_1 &= g h_1 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \tau^x - R_L^x + A_B \nabla (h_1 \nabla (\Delta u_1)), \\ \frac{\partial v_1 h_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1 v_1 h_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1^2 h_1}{\partial y} + f u_1 h_1 &= g h_1 \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \tau^y - R_L^y + A_B \nabla (h_1 \nabla (\Delta v_1)), \\ \frac{\partial u_2 h_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2^2 h_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2 u_2 h_2}{\partial y} - f v_2 h_2 &= g h_2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g' h_2 \frac{\partial h_1}{\partial x} + R_L^x - R_D^x + A_B \nabla (h_2 \nabla (\Delta u_2)), \\ \frac{\partial v_2 h_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 v_2 h_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2^2 h_2}{\partial y} + f u_2 h_2 &= g h_2 \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g' h_2 \frac{\partial h_1}{\partial y} + R_L^y - R_D^y + A_B \nabla (h_2 \nabla (\Delta v_2)), \\ \frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1 h_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1 h_1}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 h_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2 h_2}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где u_1, v_1, u_2, v_2 – горизонтальные компоненты скорости течения в верхнем и нижнем слое; h_1, h_2 – толщина верхнего и нижнего слоя; ζ – уровень моря; f – параметр Кориолиса в приближении β -плоскости; τ^x, τ^y – компоненты касательного напряжения ветра на поверхности моря, отнесенные к плотности морской воды $\rho_1 = 10^3$ кг/м³; $g'(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ – приведенное ускорение силы тяжести; ρ_1, ρ_2 – плотность морской воды в верхнем и нижнем слое ($\rho_2 > \rho_1$); R_L^x, R_L^y – компоненты силы трения на границе раздела слоев, $\{R_L^x = r_1(u_1 - u_2), R_L^y = r_1(v_1 - v_2), \text{ при } h_2 > 0\}$, $\{R_L^x = (r_2 + r_3|\mathbf{u}_1|)u_1, R_L^y = (r_2 + r_3|\mathbf{u}_1|)v_1, \text{ при } h_2 < 0\}$, $|\mathbf{u}_1| = \sqrt{u_1^2 + v_1^2}$; R_D^x, R_D^y – компоненты силы придонного трения в нижнем слое, $\{R_D^x = (r_2 + r_3|\mathbf{u}_2|)u_2, R_D^y = (r_2 + r_3|\mathbf{u}_2|)v_2\}$, $|\mathbf{u}_2| = \sqrt{u_2^2 + v_2^2}$; r_1, r_2, r_3 – соответствующие эмпирические коэффициенты; A_B – коэффициент горизонтальной бигармонической турбулентной вязкости.

Для замыкания системы уравнений (1) используется интегральное уравнение неразрывности в приближении «твердой крышки» $\partial U/\partial x + \partial V/\partial y = 0$, где $U = u_1 h_1 + u_2 h_2$, $V = v_1 h_1 + v_2 h_2$ – компоненты полного потока. Данное приближение позволяет ввести интегральную функцию тока Ψ , такую что $U = -\partial \Psi/\partial y$, $V = \partial \Psi/\partial x$. Кроме того, $h_1 + h_2 = H$, где $H = H(x, y)$ – глубина моря.

На боковых границах в обоих слоях задаются условия прилипания $\mathbf{u}_1 = 0, \mathbf{u}_2 = 0$, а также условие равенства нулю лапласиана скорости $\Delta \mathbf{u}_1 = 0, \Delta \mathbf{u}_2 = 0$.

Использование декартовых координат и приближения β -плоскости при моделировании процессов в Черном море допустимо, поскольку размеры бассейна в меридиональном направлении невелики и сферичность земной поверхности можно не учитывать.

Более подробно модель, численная схема и алгоритм вычислений были описаны в предыдущих работах [1, 2], посвященных анализу результатов экспериментов по исследованию влияния различных факторов на процессы формирования и изменчивости крупномасштабной циркуляции и вихревых структур в Черном море. Подчеркнем, что модель является энергосбалансированной, т. е. полная энергия системы сохраняется при отсутствии внешнего воздействия и трения. В данной статье проводится анализ энергетики этих процессов, рассматривается изменение кинетической и потенциальной энергии в модели, а также их взаимные переходы во времени и в пространстве.

Формирование циркуляции в море и ее изменчивость сопровождаются взаимными превращениями (переходами) энергии, которые описываются уравнениями энергетического баланса. Комбинируя уравнения движения, умноженные на соответствующие компоненты скорости u, v , с уравнениями неразрывности получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1 K_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1 K_1}{\partial y} &= W_{G1} + W_\tau - W_{RL1} - W_{AB1}, \\ \frac{\partial K_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 K_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2 K_2}{\partial y} &= W_{G2} + W_{RL2} - W_{RD} - W_{AB2}, \\ \frac{\partial P}{\partial t} - g' \left(\frac{\partial u_2 h_2 h_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2 h_2 h_1}{\partial y} \right) - g \left(\frac{\partial U \zeta}{\partial x} + \frac{\partial V \zeta}{\partial y} \right) &= -W_{G1} - W_{G2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $K_1 = h_1(u_1^2 + v_1^2)/2$, $K_2 = h_2(u_2^2 + v_2^2)/2$ – кинетическая энергия верхнего и нижнего слоя; $P = g'(h_1^2 - h_0^2)/2$ – доступная потенциальная энергия; h_0 – начальная толщина верхнего слоя; W_{G1} – работа, совершаемая в верхнем слое силой градиента давления вследствие перепада уровня моря; W_τ – работа касательного напряжения ветра; W_{G2} – работа сил градиента давления в нижнем слое; W_{RL1} , W_{RL2} – работы силы трения на поверхности раздела слоев; W_{RD} – работа сил придонного трения в нижнем слое; W_{AB1}, W_{AB2} – работы сил горизонтальной турбулентной вязкости в верхнем и нижнем слое.

Каждой работе соответствует определенный переход энергии: работе W_τ соответствует переход энергии ветра в кинетическую энергию верхнего слоя моря (K_1, τ) ; W_{G1} – переход кинетической энергии верхнего слоя в потенциальную энергию (K_1, P) ; W_{G2} – переход (K_2, P) ; W_{RL1} , W_{RL2} – переходы K_1 и K_2 между собой и в диссипацию вследствие трения на поверхности раздела $(K_1, K_2) + (K_1, D) = (K_1, D + K_2)$; W_{RD} – переход K_2 в диссипацию вследствие придонного трения (K_2, D) ; W_{AB1}, W_{AB2} – турбулентная диссипация в верхнем и нижнем слое (K_1, DT) , (K_2, DT) . Заметим, что работа W_{RL1} приводит к уменьшению кинетической энергии верхнего слоя, а W_{RL2} – к увеличению кинетической энергии нижнего слоя, т. е. осуществляется прямой обмен кинетической энергией между верхним и нижним слоями (K_2, K_1) .

Вышеперечисленные работы и переходы энергии вычисляются по формулам

$$W_\tau = (K_1, \tau) = u_1 \tau^x + v_1 \tau^y, \quad W_{G1} = (K_1, P) = u_1 h_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v_1 h_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial y},$$

$$W_{G2} = (K_2, P) = u_2 h_2 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v_2 h_2 g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + u_2 h_2 g' \frac{\partial h_1}{\partial x} + v_2 h_2 g' \frac{\partial h_1}{\partial y},$$

$$W_{RL1} = (K_1, D + K_2) = \begin{cases} r_1 (u_1 (u_1 - u_2) + v_1 (v_1 - v_2)), & \text{при } h_2 > 0 \\ (r_2 + r_3 \sqrt{u_1^2 + v_1^2}) (u_1^2 + v_1^2), & \text{при } h_2 = 0 \end{cases},$$

$$W_{RL2} = (K_2, K_1) = \begin{cases} r_1 (u_2 (u_2 - u_1) + v_2 (v_2 - v_1)), & \text{при } h_2 > 0 \\ 0, & \text{при } h_2 = 0 \end{cases},$$

$$W_{RD} = (K_2, D) = (r_2 + r_3 \sqrt{u_2^2 + v_2^2}) (u_2^2 + v_2^2),$$

$$W_{AB1} = (K_1, DT) = u_1 A_B \nabla (h_1 \nabla (\Delta u_1)) + v_1 A_B \nabla (h_1 \nabla (\Delta v_1)),$$

$$W_{AB2} = (K_2, DT) = u_2 A_B \nabla (h_2 \nabla (\Delta u_2)) + v_2 A_B \nabla (h_2 \nabla (\Delta v_2)).$$

Члены уравнений (2), стоящие в левой части, представляют собой локальные производные по времени и адвективные переносы (в дивергентной форме). Вследствие нелинейности модели пространственно-временная изменчивость этих членов велика, она сильно усложняет анализ мгновенных полей энергии, поэтому есть смысл рассматривать энергетические характеристики (энергии и переходы энергии), осредненные по площади и/или во времени.

Уравнения для средних по времени величин имеют следующий вид (черта сверху означает осреднение по времени):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{K}_1}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_1 K_1}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_1 K_1}{\partial y} &= \bar{W}_{G1} + \bar{W}_\tau - \bar{W}_{RL1} - \bar{W}_{AB1}, \\
\frac{\partial \bar{K}_2}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_2 K_2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_2 K_2}{\partial y} &= \bar{W}_{G2} + \bar{W}_{RL2} - \bar{W}_{RD} - \bar{W}_{AB2}, \\
\frac{\partial \bar{P}}{\partial t} - g \left(\frac{\partial \bar{u}_2 h_2 h_1}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_2 h_2 h_1}{\partial y} \right) - g \left(\frac{\partial U \zeta}{\partial x} + \frac{\partial V \zeta}{\partial y} \right) &= -\bar{W}_{G1} - \bar{W}_{G2}.
\end{aligned} \tag{3}$$

При интегрировании по площади адвективные члены, вследствие их дивергентности и условия прилипания на границе моря, исключаются, и можно проанализировать временную изменчивость средних по площади моря значений энергии и работы различных сил. Осреднение по времени позволяет проанализировать среднее пространственное распределение энергетических характеристик.

Одновременное интегрирование результатов вычислений по времени и по пространству дает возможность построить энергетические диаграммы [3–5], показывающие направление и величину переходов энергии в целом для всего моря за определенный временной промежуток. Забегая вперед, скажем, что если для осреднения выбрать достаточно большой временной интервал после выхода решения на режим статистического равновесия, то все производные энергии по времени должны обратиться в нуль.

Важным моментом при анализе переходов энергии является взаимодействие движений различного масштаба, в частности крупномасштабной циркуляции и мезомасштабных вихрей. В отечественной и зарубежной научной литературе данному вопросу посвящено большое количество работ [3, 4, 6–9]. Поскольку используемая нелинейная модель, наряду с крупномасштабными течениями, хорошо воспроизводит синоптические и мезомасштабные вихри, представляется возможным выделить вклады в среднюю энергию крупномасштабных течений и вихрей. Подход, описанный в работах [3–5], позволяет рассчитать взаимные переходы энергии при взаимодействии вихрей и крупномасштабных течений. Крупномасштабные течения определяются как средние потоки за некоторый выбранный временной интервал, а отклонения от средних потоков считаются вихрями.

Энергетические характеристики системы (энергия и работы сил) могут быть представлены в виде суммы энергетических характеристик, обусловленных крупномасштабными течениями и вихрями (обозначим их верхними индексами М и Е соответственно).

Полагая $\bar{K}_1 = K_1^M + K_1^E$, $\bar{K}_2 = K_2^M + K_2^E$, $\bar{P} = P^M + P^E$, осредненные по площади уравнения энергетического баланса в терминах переходов энергии можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial K_1^M}{\partial t} + (K_1^M, K_1^E) &= (K_1^M, P^M) + (K_1^M, \tau) - (K_1^M, D + K_2^M) - (K_1^M, DT), \\
\frac{\partial K_1^E}{\partial t} - (K_1^M, K_1^E) &= (K_1^E, P^E) + (K_1^E, \tau) - (K_1^E, D + K_2^E) - (K_1^E, DT),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial K_2^M}{\partial t} + (K_2^M, K_2^E) &= (K_2^M, P^M) + (K_2^M, K_1^M) - (K_2^M, D) - (K_2^M, DT), \\
\frac{\partial K_2^E}{\partial t} - (K_2^M, K_2^E) &= (K_2^E, P^E) + (K_2^E, K_1^E) - (K_2^E, D) - (K_2^E, DT), \\
\frac{\partial P^M}{\partial t} + (P^M, P^E) &= -(K_1^M, P^M) - (K_2^M, P^M), \\
\frac{\partial P^M}{\partial t} - (P^M, P^E) &= -(K_1^E, P^E) - (K_2^E, P^E).
\end{aligned} \tag{4}$$

Отметим, что разбиение осредненных по времени исходных уравнений баланса энергии (2) требует введения членов (K^M, K^E) , (P^M, P^E) , входящих с разными знаками в уравнения для K^M, K^E, P^M, P^E . Эти члены описывают переходы кинетической и потенциальной энергии от крупномасштабных течений к вихрям и наоборот.

В уравнениях (4) энергия крупномасштабных течений и связанные с ней энергетические переходы могут быть вычислены по формулам

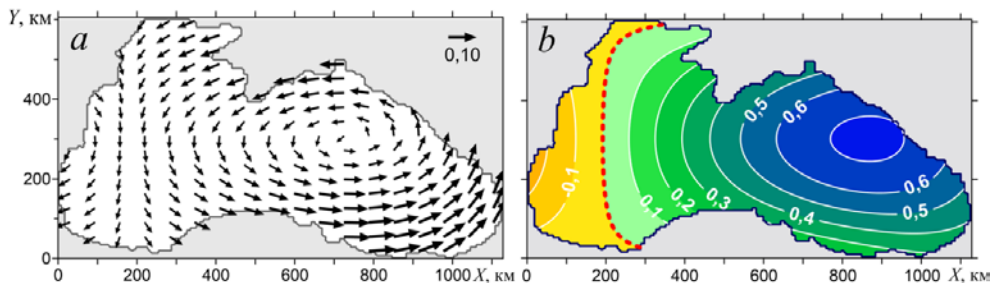
$$\begin{aligned}
K_1^M &= \overline{h_1} \frac{(\overline{u_1})^2 + (\overline{v_1})^2}{2}, \quad K_2^M = \overline{h_2} \frac{(\overline{u_2})^2 + (\overline{v_2})^2}{2}, \quad P^M = g' \frac{(\overline{h_1})^2 - (\overline{h_0})^2}{2}, \\
(K_1^M, \tau) &= \overline{u_1} \cdot \overline{\tau^x} + \overline{v_1} \cdot \overline{\tau^y}, \quad (K_1^M, P^M) = \overline{u_1} \cdot \overline{h_1} \cdot g' \frac{\partial \overline{\zeta}}{\partial x} + \overline{v_1} \cdot \overline{h_1} \cdot g' \frac{\partial \overline{\zeta}}{\partial y}, \\
(K_2^M, P^M) &= \overline{u_2} \cdot \overline{h_2} \cdot g' \frac{\partial \overline{\zeta}}{\partial x} + \overline{v_2} \cdot \overline{h_2} \cdot g' \frac{\partial \overline{\zeta}}{\partial y} + \overline{u_2} \cdot \overline{h_2} \cdot g' \frac{\partial \overline{h_1}}{\partial x} + \overline{v_2} \cdot \overline{h_2} \cdot g' \frac{\partial \overline{h_1}}{\partial y}, \\
(K_1^M, D + K_2^M) &= \overline{u_1} \cdot \overline{R_L^x} + \overline{v_1} \cdot \overline{R_L^y}, \quad (K_2^M, K_1^M) = \overline{u_2} \cdot \overline{R_L^x} + \overline{v_2} \cdot \overline{R_L^y}, \\
(K_2^M, D) &= \overline{u_2} \cdot \overline{R_D^x} + \overline{v_2} \cdot \overline{R_D^y}, \\
(K_1^M, DT) &= \overline{u_1} \cdot A_B \nabla (\overline{h_1} \nabla (\Delta \overline{u_1})) + \overline{v_1} \cdot A_B \nabla (\overline{h_1} \nabla (\Delta \overline{v_1})), \\
(K_2^M, DT) &= \overline{u_2} \cdot A_B \nabla (\overline{h_2} \nabla (\Delta \overline{u_2})) + \overline{v_2} \cdot A_B \nabla (\overline{h_2} \nabla (\Delta \overline{v_2})), \\
K_1^E &= \overline{K_1} - K_1^M, \quad K_2^E = \overline{K_2} - K_2^M, \quad P^E = \overline{P} - P, \\
(K_1^E, P^E) &= \overline{W_{G1}} - (K_1^M, P^M), \quad (K_2^E, P^E) = \overline{W_{G2}} - (K_2^M, P^M), \\
(K_1^E, D + K_2^E) &= \overline{W_{RL1}} - (K_1^M, D + K_2^M), \quad (K_2^E, D) = \overline{W_{RD}} - (K_2^M, D), \\
(K_2^E, K_1^E) &= \overline{W_{RL2}} - (K_2^M, K_1^M), \\
(K_1^E, DT) &= \overline{W_{AB1}} - (K_1^M, DT), \quad (K_2^E, DT) = \overline{W_{AB2}} - (K_2^M, DT).
\end{aligned}$$

Переходы энергии между крупномасштабными движениями и вихрями (K_1^M, K_1^E) , (K_2^M, K_2^E) , (P^M, P^E) рассчитываются из уравнений энергетического баланса (4) для K^M, P^M . Как уже ранее говорилось, подобная методика для разделения потоков энергии в двухслойной модели с так называемыми примитивными уравнениями описана и применена в работе В. Холланда и Л. Лина [3].

Численный эксперимент

Для энергетического анализа выбран численный эксперимент, проведенный с помощью вышеописанной двухслойной модели, учитывающий рельеф дна, β -эффект, придонное трение, трение на поверхности раздела слоев и горизонтальную турбулентную вязкость. Поле касательного напряжения ветра, используемое для возбуждения движения, стационарно во времени, но неоднородно по пространству (рис. 1). В целом над морем преобладает циклоническая завихренность касательного напряжения ветра с максимумом возле Кавказского побережья. Над западной частью бассейна расположена область антициклонической завихренности ветра [10, 11], которая препятствует западной интенсификации течений, образующейся вследствие β -эффекта [2].

В рассматриваемом эксперименте используются следующие параметры: начальная толщина верхнего слоя $h_0 = 100$ м; шаг по времени $\Delta t = 90$ с; шаги по пространству $\Delta x = \Delta y = 3000$ м; $f_0 = 10^{-4}$ с $^{-1}$; $\beta = 2,0 \cdot 10^{-11}$ с $^{-1}$ м $^{-1}$; $g' = 3,2 \cdot 10^{-2}$ м с $^{-2}$; $r_1 = 2,0 \cdot 10^{-6}$ м с $^{-1}$; $r_2 = 10^{-5}$ м с $^{-1}$; $r_3 = 2,0 \cdot 10^{-3}$; $A_B = 4,0 \cdot 10^8$ м 4 с $^{-1}$.

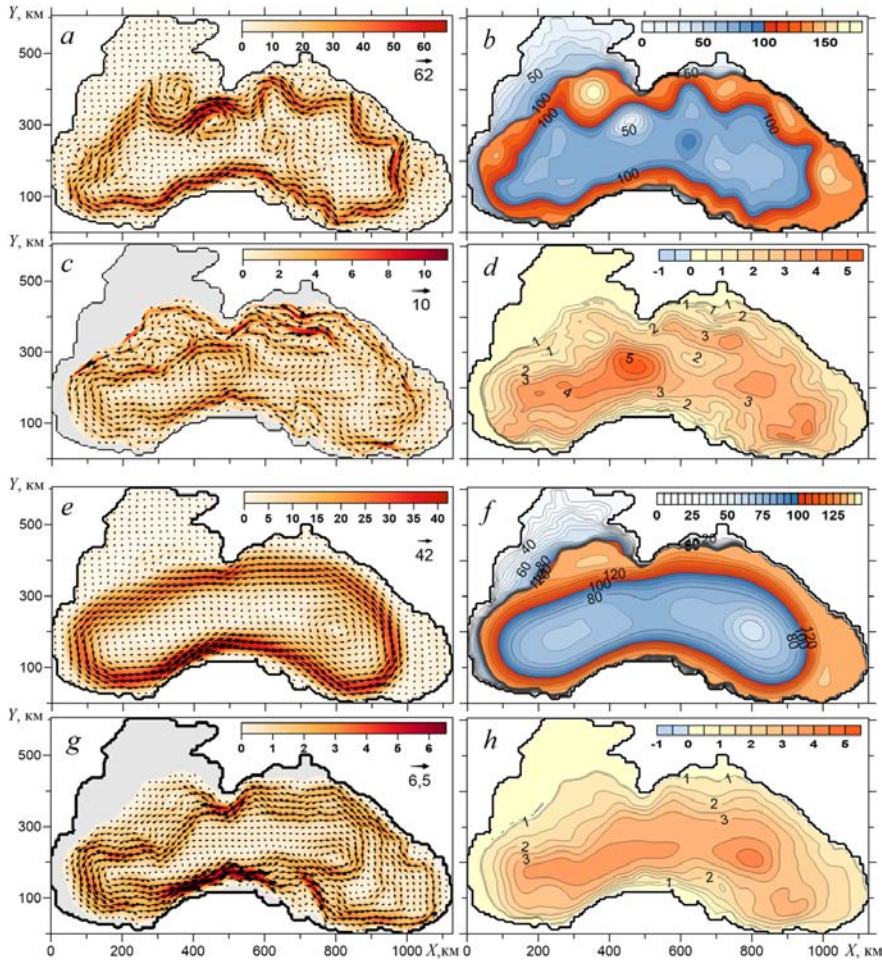


Р и с. 1. Касательное напряжение ветра τ , Н/м 2 (a) и завихренность ветра $\text{rot } \tau$, 10^{-7} Н/м 3 (b)
F i g. 1. Tangential wind stress τ , Н/м 2 (a) and wind vorticity $\text{rot } \tau$, 10^{-7} Н/м 3 (b)

В отличие от предыдущих работ [1, 2], интенсивность напряжения ветра и граница залегания поверхности раздела слоев в состоянии покоя $h_0 = \min(H, 100$ м) выбраны из соображений лучшего соответствия результатов численного моделирования данным наблюдений.

Расчеты проводились из состояния покоя на длительный срок (50 лет). Через 6 лет после начала расчетов решение вышло на режим (назовем его квазиравновесным), при котором значения всех рассчитываемых в модели параметров изменяются, но не выходят за некоторые границы. На рис. 2 приводятся характерные для квазиравновесного режима мгновенные и осредненные поля течений в верхнем и нижнем слое $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$, толщина верхнего слоя h_1 , равная

глубине залегания поверхности раздела слоев, и функция $p_2 = \zeta + g'g^{-1}(h_1 - h_0)$, характеризующая давление в нижнем слое. Мгновенные поля приведены для одного и того же момента времени, соответствующего 6780 сут модельного времени, или 30 октября 19-го года расчетов (30.10.19 г.). Один модельный год включает в себя 12 месяцев по 30 сут.



Р и с. 2. Мгновенные поля \mathbf{u}_1 , см/с (a), h_1 , м (b), \mathbf{u}_2 , см/с (c), p_2 , см (d) и осредненные за 45 лет поля $\overline{\mathbf{u}}_1$, см/с (e), \overline{h}_1 , м (f), $\overline{\mathbf{u}}_2$, см/с (g), \overline{p}_2 , см (h)

Fig. 2. Instantaneous fields, \mathbf{u}_1 cm/s (a), h_1 , m (b), \mathbf{u}_2 , cm/s (c), p_2 , cm (d) and fields averaged for 45 years $\overline{\mathbf{u}}_1$, cm/s (e), \overline{h}_1 , m (f), $\overline{\mathbf{u}}_2$, cm/s (g), \overline{p}_2 , cm (h)

В квазиравновесном режиме циркуляция в верхнем слое представляет собой циклонический круговой поток, распространяющийся в виде меандрирующей струи шириной 30–50 км по всему периметру моря (рис. 2, a, b). Стрежень потока проходит над свалом глубин. Скорости течений в стрежне составляют 40–60 см/с. Справа от течения, ближе к берегу, в ложбинах ме-

андров, периодически формируются антициклонические вихри, которые существуют длительное время и перемещаются вместе с меандрами. Полученные результаты хорошо отражают известные особенности черноморской циркуляции: Основное Черноморское течение (ОЧТ), Батумский и Севастопольский квазистационарные антициклоны и др. [12, 13].

В нижнем слое моря течения более медленные, направленные преимущественно вдоль изобат (рис. 2, *c, d*). Направление циркуляции – циклоническое, как и в верхнем слое. В большей части бассейна скорости равны 2–4 см/с, но в локальных областях над материковым склоном могут достигать 10–12 см/с. Характерной особенностью циркуляции в нижнем слое является наличие в поле течений длинных волн, которые перемещаются вдоль материкового склона в циклоническом направлении с фазовой скоростью большей, чем скорость среднего потока. Эти волны по фазе совпадают с меандрами ОЧТ в верхнем слое, что указывает на связь между ними.

В средних полях u_1 , h_1 , построенных с 10-го по 50-й гг. (рис. 2, *e, f*) в верхнем слое наблюдается один крупномасштабный суббассейновый циклонический круговорот, объединяющий внутри себя два циклонических вихря – «очки Книповича». Западнее Крыма и в восточной части моря отмечаются две области с антициклонической завихренностью течений, соответствующие Севастопольскому и Батумскому квазистационарным антициклонам. В нижнем слое осредненная циркуляция (рис. 2, *g, h*) представляет собой поток воды, распространяющийся в циклоническом направлении преимущественно вдоль изобат. Скорости течений зависят от величины уклона дна и достигают максимальных значений 5 см/с на материковом склоне возле северо-западного побережья Турции. Направление и скорости течений в нижнем слое, полученные в эксперименте, хорошо согласуются с данными о глубоководных перемещениях буев Арго [14].

Энергетический анализ результатов численного эксперимента

Чтобы получить представление о пространственном распределении энергетических характеристик, рассчитаны и проанализированы мгновенные и средние поля энергии и работы сил, участвующих в ее изменении. На рис. 3 мгновенные поля K_1 , K_2 , P , W_{G1} , W_{G2} приводятся для того же момента времени, что и поля на рис. 2. Сравнивая эти рисунки, можно отметить, что особенности в мгновенных и средних полях K_1 , K_2 , P соответствуют особенностям в полях течений в верхнем и нижнем слоях и в топографии поверхности раздела h_1 .

Мгновенные поля энергетических характеристик имеют значительную изменчивость в пространстве и во времени. В первую очередь это относится к работе сил градиента давления W_{G1} , W_{G2} (рис. 3, *g, h*), определяющих переходы энергии (K_1 , P), (K_2 , P). Наблюдаемые на рис. 3 особенности (минимумы и максимумы) пространственной изменчивости полей перемещаются вместе с круговым течением, что существенно осложняет анализ. Поэтому в дальнейшем ограничимся рассмотрением энергетических характеристик, осредненных по времени или/и по пространству.

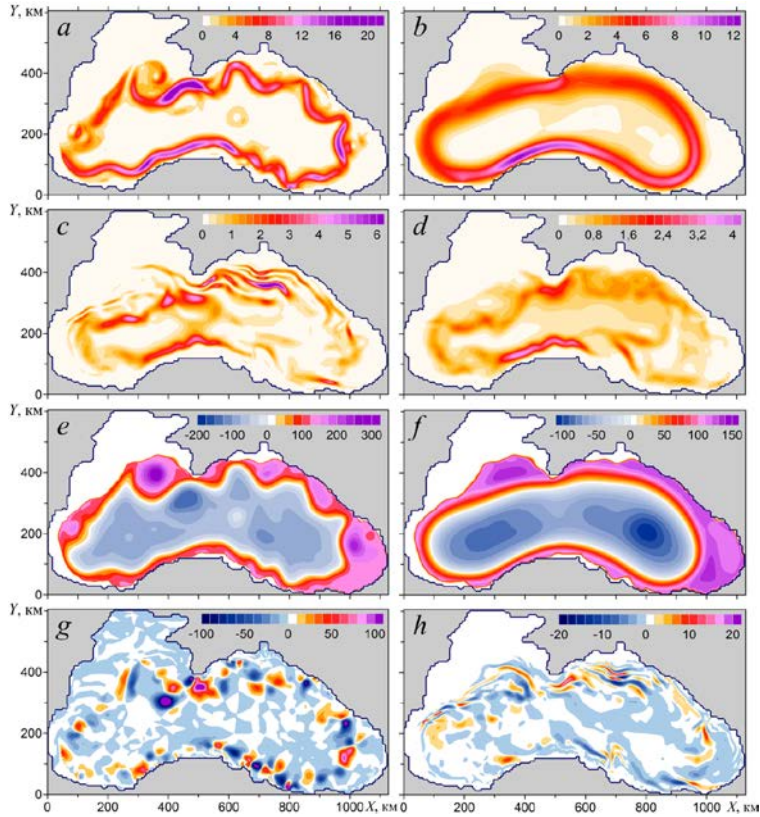


Рис. 3. Мгновенные поля K_1 (a), K_2 (c), P (e), W_{G1} (g), W_{G2} (h) и осредненные за 45 лет поля $\overline{K_1}$ (b), $\overline{K_2}$ (d), \overline{P} (f). Единицы измерения kJ/m^2

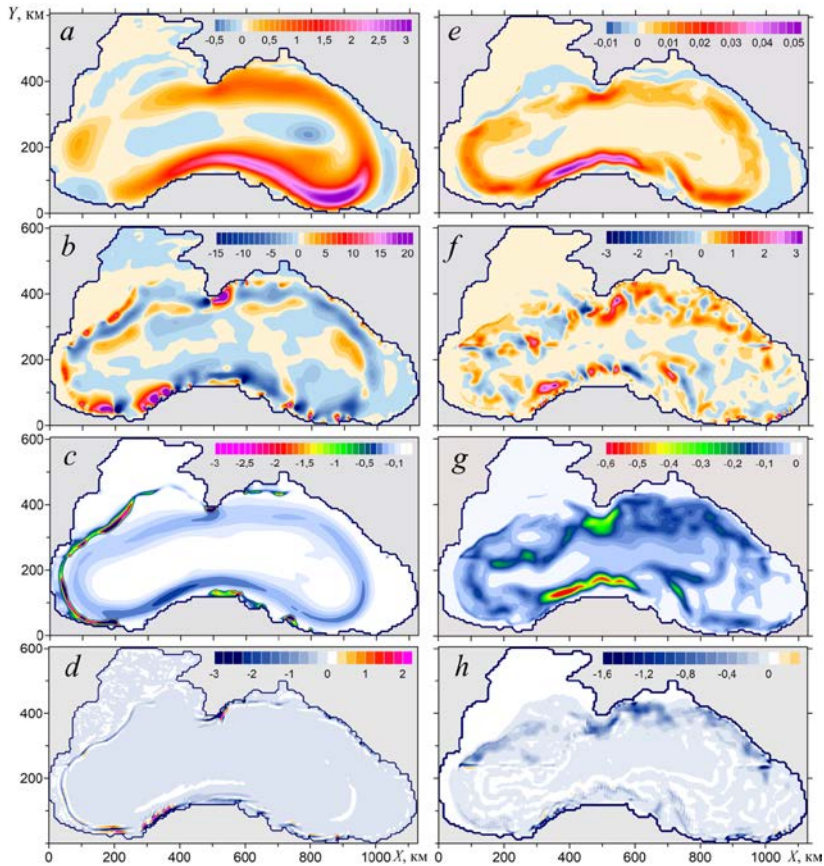
Fig. 3. Instantaneous fields K_1 (a), K_2 (c), P (e), W_{G1} (g), W_{G2} (h) and fields averaged for 45 years $\overline{K_1}$ (b), $\overline{K_2}$ (d), \overline{P} (f). Unit is kJ/m^2

На рис. 4 приводятся поля переходов энергии, осредненные по времени. Согласно рис. 4, a, максимум потока энергии от ветра в верхний слой моря расположен над стрежнем среднего кругового потока, причем большая часть энергии ветра поступает в восточной половине моря, а наибольшие значения наблюдаются правее Анатолийского п-ова.

Поле $(\overline{K_1}, \overline{P})$ даже после осреднения имеет значительную пространственную неоднородность, особенно вдоль стрежня кругового потока (рис. 4, b). Зоны, в которых кинетическая энергия $\overline{K_1}$ переходит в потенциальную \overline{P} , расположены вдоль Кавказского побережья и вдоль северо-западного побережья Турции, а зоны с противоположным направлением перехода энергии отмечаются юго-восточнее Крыма и к северо-западу от Анатолийского п-ова.

В пространственном распределении перехода $(\overline{K_1}, \overline{D + K_2})$ характерной особенностью является наличие локальных участков с высокими значениями диссипации. Эти участки расположены на материковом склоне в виде узких полос вдоль линии пересечения поверхности раздела слоев с дном (рис. 4, c),

преимущественно в западной половине моря вдоль границы северо-западного шельфа и материкового склона возле Болгарии и Турции до пролива Босфор. В этих местах верхний слой непосредственно контактирует с дном. Также зоны интенсивной диссипации, обусловленной трением верхнего слоя о дно, отмечаются южнее Крыма – возле мыса Сарыч и Керченского п-ова и вдоль северо-восточного побережья Турции. Во внутренней области моря, там, где существуют оба слоя, K_1 тратится на диссипацию на жидкой нижней границе верхнего слоя и частично переходит в K_2 вдоль стрежня среднего кругового потока.



Р и с. 4. Пространственное распределение осредненных по времени переходов энергии $\overline{(K_1, \tau)}$ (a), $\overline{(K_1, P)}$ (b), $\overline{(K_1, D + K_2)}$ (c), $\overline{(K_1, DT)}$ (d), $\overline{(K_2, K_1)}$ (e), $\overline{(K_2, P)}$ (f), $\overline{(K_2, D)}$ (e), $\overline{(K_2, DT)}$ (f). Единицы измерения мДж/(м² с)

F i g. 4. Spatial distribution of the time-averaged energy transitions $\overline{(K_1, \tau)}$ (a), $\overline{(K_1, P)}$ (b), $\overline{(K_1, D + K_2)}$ (c), $\overline{(K_1, DT)}$ (d), $\overline{(K_2, K_1)}$ (e), $\overline{(K_2, P)}$ (f), $\overline{(K_2, D)}$ (e), $\overline{(K_2, DT)}$ (f). Unit is mJ/m²s

Переход энергии в диссипацию вследствие горизонтальной турбулентной вязкости $\overline{(K_1, DT)}$ в верхнем слое происходит главным образом возле особенностей береговой черты и вдоль линии пересечения границы раздела слоев с дном (рис. 4, d), в центральной части моря турбулентная диссипация мала.

Нижний слой получает энергию вследствие трения на поверхности раздела (K_2, K_1) (рис. 4, *e*) и за счет работы, производимой силой градиента давления (K_2, P) (рис. 4, *f*). Переход энергии (K_2, K_1) происходит в области ОЧТ, максимальные значения отмечаются северо-западнее Турции. По своей интенсивности он значительно уступает переходу энергии (K_2, P) , который является следствием бароклинной неустойчивости течений. Пространственное распределение (K_2, P) очень неравномерное, что, скорее всего, связано с влиянием рельефа дна. Чередующиеся максимальные значения потока энергии, как положительные, так и отрицательные, расположены над свалом глубин под ОЧТ. На северо-западе моря преобладают области с положительными значениями перехода энергии (K_2, P) , что соответствует притоку энергии в нижний слой.

Сток энергии (диссипация) в нижнем слое происходит вследствие работ сил придонного трения и горизонтальной турбулентной вязкости. Пространственные неоднородности соответствующих им переходов энергии (K_2, D) , (K_2, DT) (рис. 4, *g, h*) формируются под влиянием рельефа дна и в основном повторяют пространственные особенности поля K_2 (рис. 3, *d*).

Далее рассмотрим временную изменчивость энергетических характеристик. На рис. 5 приведены графики изменения во времени энергий $\langle K_1 \rangle, \langle K_2 \rangle, \langle P \rangle$, осредненных по площади бассейна. Видно, что после пяти лет расчетов решение выходит на квазиравновесный режим.

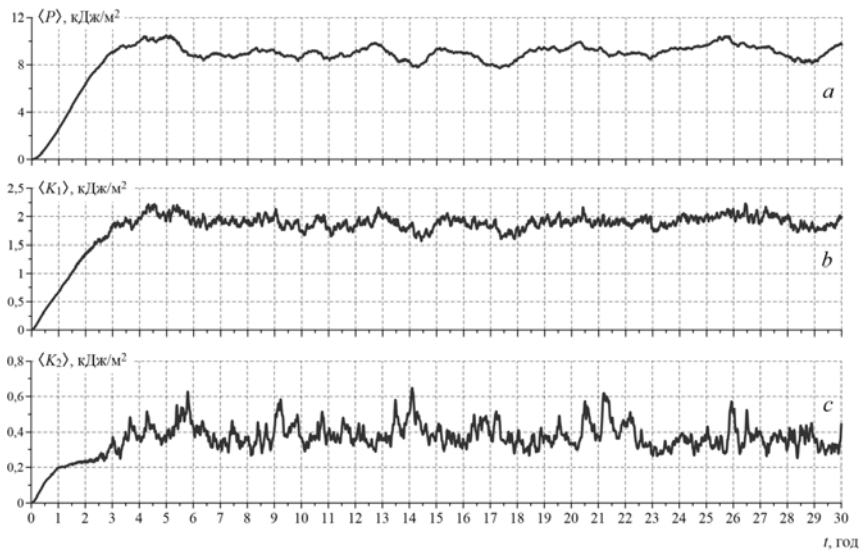


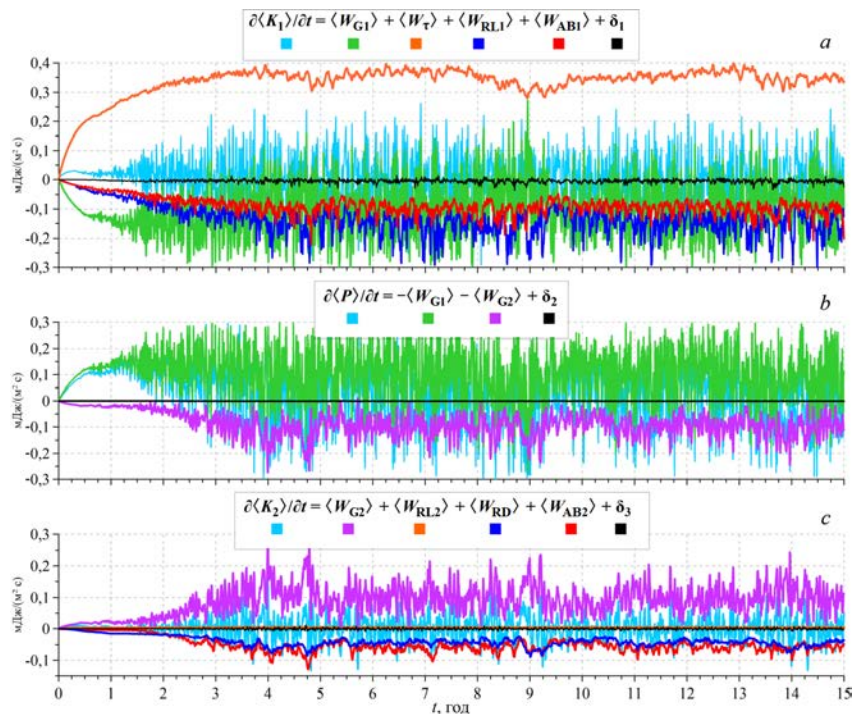
Рис. 5. Временные графики осредненных по пространству $\langle P \rangle$ (a), $\langle K_1 \rangle$ (b), $\langle K_2 \rangle$ (c)

Fig. 5. Time graphs of the spatial-averaged $\langle P \rangle$ (a), $\langle K_1 \rangle$ (b), $\langle K_2 \rangle$ (c)

На графиках энергии имеются колебания с периодами от 1 года до 5 лет, которые связаны с изменчивостью крупномасштабной циркуляции. Лучше всего это видно на рис. 5, *a*. Кроме того, существуют более высокочастотные пульсации, с периодами от недели до трех месяцев, связанные с процессами неустойчивости течений и мезомасштабного вихреобразования. Более всего эти пульсации проявляются на графиках $\langle K_2 \rangle$ (рис. 5, *c*).

Временная изменчивость осредненных по площади энергетических переходов представлена на рис. 6. Кинетическая энергия верхнего слоя пополняется за счет работы касательного напряжения ветра (рис. 6, *a*) и расходуется на работу против сил градиента давления и диссипацию вследствие горизонтальной турбулентной вязкости и трения на нижней границе верхнего слоя. График W_{G1} располагается преимущественно в отрицательной области ординат, т. е. K_1 переходит в P , хотя в некоторые моменты времени возможен и обратный переход. Это еще раз указывает на значительную изменчивость энергетических переходов энергии (K_1, P).

В нижнем слое пополнение K_2 происходит в основном благодаря работе силы градиента давления $\langle W_{G2} \rangle$ (рис. 6, *c*). Другой источник пополнения K_2 – работа силы трения на поверхности раздела слоев $\langle W_{RL2} \rangle$ – очень мал. Диссипация энергии в нижнем слое происходит вследствие работ $\langle W_{RD} \rangle, \langle W_{AB2} \rangle$.



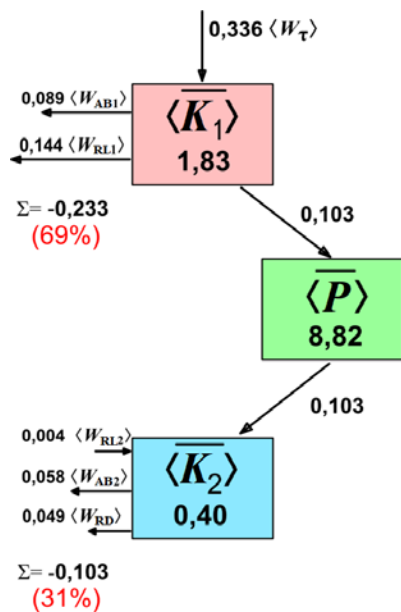
Р и с. 6. Графики осредненных по пространству работ, входящих в уравнения балансов энергии K_1 (*a*), P (*b*), K_2 (*c*)

F i g. 6. Graphs of the spatial-averaged works included to the equations of energy balances K_1 (*a*), P (*b*), K_2 (*c*)

В квазиравновесном режиме можно определить временной интервал, в котором средние характеристики модели всегда остаются постоянными независимо от начала этого интервала. Назовем такой интервал периодом статистического равновесия (ПСР). Если в течение ПСР усреднить по времени средние по площади энергетические потоки, то можно построить энергетическую диаграмму в целом для всего моря, из которой видно, сколько энергии и в каком направлении передается, сколько ее тратится на диссипацию в каждом слое (рис. 7). Цифры внутри прямоугольников соответствуют значениям энергии в $\text{кДж}/\text{м}^2$, стрелки показывают направления переходов, а цифры возле стрелок – средние значения переходов энергии в $\text{мДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Временные производные от средних за ПСР характеристик стремятся к нулю.

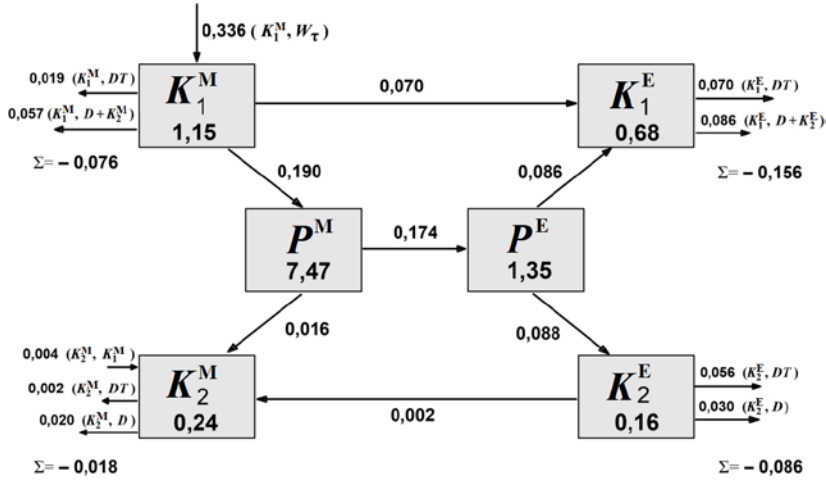
Большая часть механической энергии моря (80%) сосредоточена в доступной потенциальной энергии. Кинетическая энергия верхнего слоя составляет 16%, кинетическая энергия нижнего слоя – 4%. Более двух третей (69%) поступающей от ветра энергии расходуется на диссипацию в верхнем слое вследствие работы сил горизонтальной турбулентной вязкости (26%) и работы сил трения на его нижней границе (43%). Причем последнюю работу можно дополнительно разделить на работу трения верхнего слоя о дно W_{RD1} при $h_2 = 0$ (17%) и трения о нижележащий слой W_{RH1} , если $h_2 > 0$ (26%).

В нижний слой поступает ~ 30% приходящей от ветра энергии, из которых только 1% – за счет работы силы трения на поверхности раздела слоев. Основной источник энергии для нижнего слоя – это работа сил давления, которая обеспечивает переход K_1 в K_2 через P . Энергия, поступающая в нижний слой, тратится на диссипацию вследствие горизонтальной турбулентной вязкости и придонного трения.



Как уже говорилось, модель является нелинейной. Влияние нелинейности проявляется в наличии большого количества мезомасштабных вихрей, которые активно взаимодействуют с крупномасштабными течениями. При этом постоянно происходят взаимные превращения кинетической и потенциальной энергии, кроме того, диссипация энергии также происходит на различных масштабах. Следуя описанной выше методике, мы построили энергетическую диаграмму рассматриваемого эксперимента в ПСР (рис. 8).

Р и с. 7. Суммарная энергетическая диаграмма
F i g. 7. Total energy diagram



Р и с. 8. Энергетическая диаграмма с учетом разделения циркуляции на крупномасштабную и вихревую

F i g. 8. Energy diagram allowing for division of circulation into the large-scale and eddy ones

На рисунке видно, что в процентном отношении доля вихревой энергии меньше энергии средних течений, отношение $K_1^M/K_1^E \approx 2/1$, $P^M/P^E \approx 8/1$, $K_2^M/K_2^E \approx 3/2$. Таким образом, движение в нижнем слое является более вихревым, чем в верхнем. Энергия вихрей составляет $\sim 20\%$ общей механической энергии системы и состоит на 40% из кинетической энергии и на 60% из потенциальной. Большая часть K^E сосредоточена в верхнем слое. Несмотря на то что $K^E < K^M$ по абсолютной величине, K^E обеспечивает большую часть диссипации энергии. Из 70% энергии, теряемой в верхнем слое, $2/3$ приходится на диссипацию вихревой энергии.

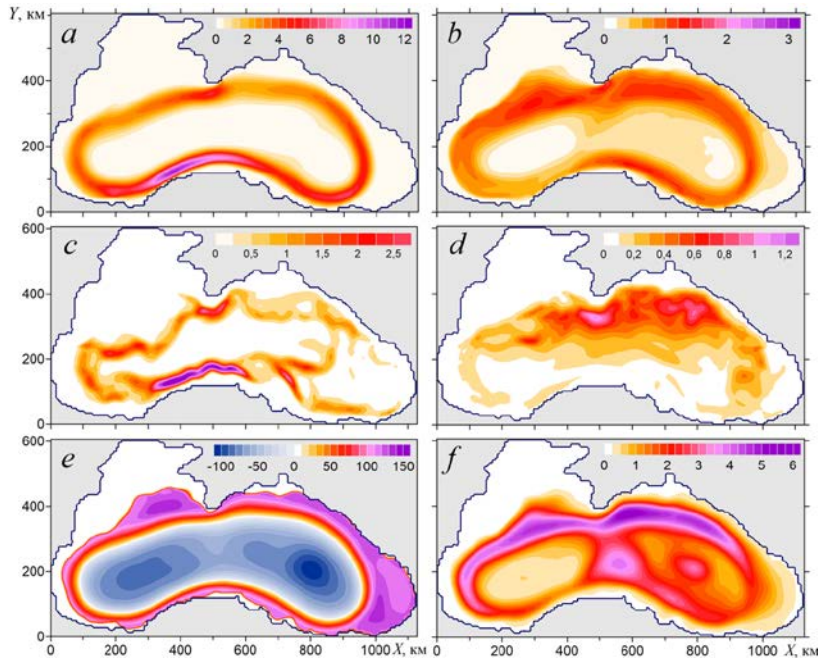
В статистически равновесном периоде переход K_1^M в K_1^E происходит двумя путями: непосредственно ($K_1^M \rightarrow K_1^E$) и в результате цепочки последовательных переходов ($K_1^M \rightarrow P^M \rightarrow P^E \rightarrow K_1^E$). Принято считать [15–17], что эти переходы энергии сопровождают бароклинную неустойчивость течений, вследствие которой происходит меандрирование ОЧТ и образуются мезомасштабные вихри в верхнем слое.

Также значительная часть P^E , вследствие бароклинной неустойчивости вихрей, переходит в K_2^E , которая тратится в основном на вихревую диссипацию в нижнем слое, а небольшая ее часть переходит в K_2^M . Этот переход энергии можно рассматривать как эффект отрицательной вязкости, когда энергия передается от меньших масштабов движения более крупным.

Кроме того, пополнение K_2^M происходит за счет P^M в результате работы сил градиента давления и вследствие работы силы трения на поверхности раздела слоев W_{RL2}^M . Последняя работа обеспечивает непосредственный переход ($K_1^M \rightarrow K_2^M$), но ее величина при используемой параметризации, как уже

отмечалось, мала. Вихревая составляющая $W_{RL2}^E = (K_2^E, K_1^E)$ получается на порядок меньше, чем W_{RL2}^M , и ею можно пренебречь.

В целом диаграмма переходов энергии соответствует современным представлениям об изменчивости крупномасштабной циркуляции в Черном море, основными особенностями которой являются меандрирующее ОЧТ и мезомасштабные антициклонические вихри, образующиеся вследствие бароклинной неустойчивости течений.



Р и с. 9. Осредненные по времени поля K_1^M (a), K_1^E (b), K_2^M (c), K_2^E (d), P^M (e), P^E (f). Единицы измерения кДж/м²

Fig. 9. Time-averaged fields K_1^M (a), K_1^E (b), K_2^M (c), K_2^E (d), P^M (e), P^E (f). Unit is kJ/m²

Для завершения полной картины рассмотрим пространственные распределения энергии для крупномасштабных и вихревых течений. Поля $\overline{K_1^M}$ и $\overline{K_2^M}$ (рис. 9, a, c) в целом по форме совпадают с распределением модуля средних течений в верхнем и нижнем слое (рис. 2, e, g), при этом области максимальных значений $\overline{K_1^M}$, и $\overline{K_2^M}$ расположены в южной половине моря в струйном потоке возле Анатолийского побережья. Поля $\overline{K_1^E}$, $\overline{K_2^E}$, наоборот, более интенсивны в северной части моря вдоль материкового склона. Поле $\overline{P^M}$ (рис. 9, e) практически повторяет поле $\overline{h_1}$ (рис. 2, g), а поле $\overline{P^E}$ (рис. 9, f) имеет более сложную форму с двумя зонами максимальных значений, одна из которых расположена на севере над свалом глубин, другая – круглой формы – севернее Синопа. В целом для всего моря можно сказать,

что вихревая и кинетическая, и потенциальная энергия в основном сосредоточены вдоль северной ветви ОЧТ. К северо-западу от Анатолийского п-ова в области ОЧТ отмечается максимум кинетической энергии.

Заключение

Проведенный энергетический анализ позволяет сделать ряд важных выводов относительно пространственной и временной изменчивости энергетических характеристик крупномасштабной циркуляции в Черном море.

В квазиравновесном режиме поступление энергии в нижний слой моря осуществляется главным образом благодаря вихрям, которые, как принято считать, образуются вследствие бароклинной неустойчивости крупномасштабных течений. На генерацию вихревых возмущений расходуется 70% приходящей от ветра энергии. Из них 40% тратится на диссипацию в верхнем слое, а 30% идет на возбуждение вихревых движений в нижнем слое. Небольшая часть кинетической энергии вихрей в нижнем слое затем переходит в кинетическую энергию средних течений.

Переход доступной потенциальной энергии крупномасштабных течений в вихревую и дальше в кинетическую энергию может служить подтверждением того, что одной из причин меандрирования ОЧТ и образования мезомасштабных вихрей является бароклинная неустойчивость.

Трение на поверхности раздела между слоями не является значимым источником движений в нижнем слое моря и приводит главным образом к диссипации энергии. Только ~ 2% из потока энергии, теряемого верхним слоем на его нижней границе, идет на увеличение кинетической энергии нижнего слоя. Причем этот переход энергии происходит в области крупномасштабных течений, вихревое трение между слоями приводит к диссипации энергии.

Пространственная неравномерность завихренности ветра приводит к тому, что море получает энергию от ветра преимущественно в восточной половине в области ОЧТ, а теряет энергию в западной и северо-западных частях бассейна над материковым склоном. Диссипация кинетической энергии происходит в основном вследствие трения верхнего слоя о дно (если $h_2 = 0$).

Кинетическая и потенциальная энергия вихрей в основном сосредоточены вдоль северной ветви ОЧТ, в то время как на юге бассейна в струе ОЧТ вдоль северо-западного Анатолийского побережья отмечаются максимальные значения кинетической энергии крупномасштабных течений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Павлушин А. А.* Численное моделирование крупномасштабной циркуляции и вихревых структур в Черном море // Труды государственного океанографического института. М. : Артифекс, 2018. Вып. 219. С. 174–194.
2. *Павлушин А. А., Шапиро Н. Б., Михайлова Э. Н.* Роль рельефа дна и β -эффекта в динамике Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 27–39. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-27-39
3. *Holland W. R., Lin L. B.* On the Generation of Mesoscale Eddies and their Contribution to the Oceanic General Circulation. I. A Preliminary Numerical Experiment // Journal of Physical Oceanography. 1975. Vol. 5, no. 4. P. 642–657. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1975\)005<0642:OTGOME>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1975)005<0642:OTGOME>2.0.CO;2)

4. *Holland W. R., Lin L. B.* On the Generation of Mesoscale Eddies and their Contribution to the Oceanic General Circulation. II. A Parameter Study // *Journal of Physical Oceanography*. 1975. Vol. 5, no. 4. P. 658–669. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1975\)005<0658:OTGOME>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1975)005<0658:OTGOME>2.0.CO;2)
5. *Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С.* Синоптические вихри в океане. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 509 с.
6. *Demyshev S. G., Dymova O. A.* Analyzing intraannual variations in the energy characteristics of circulation in the Black Sea // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 4. P. 386–393. doi:10.1134/S0001433816040046
7. *Chen R., Thompson A. F., Flierl G. R.* Time-dependent eddy-mean energy diagrams and their application to the ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 2016. Vol. 46, no. 9. P. 2827–2850. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0012.1>
8. *Kang D., Curchitser E. N.* Energetics of eddy-mean flow interactions in the Gulf Stream region // *Journal of Physical Oceanography*. 2015. Vol. 45, no. 4. P. 1103–1120. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0200.1>
9. Energy Conversion Routes in the Western Mediterranean Sea Estimated from Eddy-Mean Flow Interactions / *Е. Сабо [et al.]* // *Journal of Physical Oceanography*. 2019. Vol. 49, no. 1. P. 247–267. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0036.1>
10. *Ефимов В. В., Юровский А. В.* Формирование завихренности поля скорости ветра в атмосфере над Черным морем // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 6. С. 3–12. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-3-12
11. *Ефимов В. В., Анисимов А. Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47, № 3. С. 380–392.
12. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2011. 212 с.
13. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / Под ред. ак. Б. А. Нелепо. Л. : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
14. *Маркова Н. В., Багаев А. В.* Оценка скоростей глубоководных течений в Черном море по данным дрейфующих буев-профилемеров Argo // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 3. С. 26–39. doi:10.22449/0233-7584-2016-3-26-39
15. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / *G. K. Korotaev [et al.]* // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C4. 3122. <https://doi.org/10.1029/2002JC001508>
16. Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием / *А. Г. Зацепин [и др.]* // *Современные проблемы динамики океана и атмосферы : Сб. статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П. С. Линейкина / Под ред. А. В. Фролова, Ю. Д. Ресянского. М. : Триада ЛТД, 2010. С. 347–368.*
17. *Stanev E. V.* Understanding Black Sea Dynamics: Overview of Recent Numerical Modeling // *Oceanography*. 2005. Vol. 18, no. 2. P. 56–75. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.42>

Об авторах:

Павлушин Андрей Александрович, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: R-4908-2018**, pavlushin@mhi-ras.ru

Шапиро Наум Борисович, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ResearcherID: A-8585-2017**, n.shapiro@mhi-ras.ru

Михайлова Элеонора Николаевна, старший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, e.mikhailova@mhi-ras.ru