

Особенности и причины пространственной неоднородности потоков механической энергии в Черном море

А. А. Павлушин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ pavlushin@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 04.08.2022; одобрена после рецензирования 23.11.2022;
принята к публикации 09.03.2023.

Аннотация

Цель. Цель работы состоит в определении причин пространственной неоднородности потоков механической энергии, возникающих при формировании и эволюции крупномасштабных течений в Черном море. Неравномерность распределения потоков энергии по акватории моря была выявлена при анализе осредненных по времени полей энергетических характеристик, полученных методом численного моделирования.

Методы и результаты. С использованием данных экспериментов, проведенных с помощью двухслойной вихререзающей модели, рассчитаны составляющие энергетического баланса восточной и западной частей Черного моря. В результате осреднения энергетических характеристик по времени и по площади в пределах выбранных областей построена интегральная схема потоков механической энергии. Для подтверждения гипотезы о влиянии β -эффекта на перераспределение энергетических потоков проведен дополнительный эксперимент с постоянным параметром Корнолиса и рассчитаны балансы энергии методом, аналогичным применяемому в первом эксперименте.

Выводы. Установлено, что в Черном море под влиянием β -эффекта происходит перераспределение потоков энергии по площади бассейна. В восточной половине моря осуществляется накачка течений энергией ветра и идет процесс формирования потенциальной энергии, которая затем вследствие адвекции горизонтальными течениями переносится на запад. В западной части моря перенесенная с востока потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию течений, значительная часть которой диссипирует вследствие придонного трения и горизонтальной турбулентной вязкости. Оставшаяся часть кинетической энергии переносится течением в верхнем слое моря обратно в восточную половину бассейна, где снова участвует в процессе формирования потенциальной энергии.

Ключевые слова: Черное море, энергетический баланс, переходы энергии, крупномасштабная циркуляция, β -эффект, волны Россби

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2021-0003 «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. Особенности и причины пространственной неоднородности потоков механической энергии в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 3. С. 328–341. EDN OSWDCN. doi:10.29039/0233-7584-2023-3-328-341

Features and Reasons for Spatial Heterogeneity of Mechanical Energy Flows in the Black Sea

A. A. Pavlushin

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ pavlushin@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The work is aimed at determining the reasons for the spatial inhomogeneity of mechanical energy flows that arise during formation and evolution of the large-scale currents in the Black Sea. The uneven distribution of energy flows over the sea area was revealed in the analysis of time-averaged fields of the energy characteristics resulted from numerical simulation.

Methods and Results. The data of numerical experiments performed using the two-layer eddy-resolving model permitted to calculate the energy balance components in the eastern and western parts of the Black Sea. Averaging the energy characteristics over time and area within the selected areas made it possible to construct an integrated scheme of mechanical energy flows. To confirm the hypothesis on influence of the β -effect on the redistribution of energy flows, an additional experiment including the constant Coriolis parameter was carried out, and the energy balances were calculated by the method similar to the one applied in the first experiment.

Conclusions. It is revealed that under the impact of the β -effect, the energy flows are redistributed over the Black Sea basin area. In the eastern half of the sea, the currents are pumped with wind energy and there is the process of formation of potential energy, which later, due to advection, is transferred to the west by the currents. In the western part of the sea, the potential energy that had been transported from the eastern half of the basin is converted into the kinetic energy of currents, a significant part of which dissipates due to the bottom friction and the horizontal turbulent viscosity. The rest of the kinetic energy is transported back to the basin eastern part by the current in the sea upper layer, where it again participates in the process of forming the potential energy.

Keywords: Black Sea, energy balance, energy conversions, large-scale circulation, β -effect, Rossby waves

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the state assignment on theme FNNN-2021-0003 “Development of operational oceanology methods based on interdisciplinary research of the processes of marine environment formation and evolution, and mathematical modeling using the data of remote and contact measurements”.

For citation: Pavlushin A.A., 2023. Features and Reasons for Spatial Heterogeneity of Mechanical Energy Flows in the Black Sea. *Physical Oceanography*, 30(3), pp. 302-314. doi:10.29039/1573-160X-2023-3-302-314

Введение

Важным моментом в изучении морской динамики является правильное понимание процессов преобразования механической энергии, возникающих при формировании и пространственно-временной эволюции полей течений в морях и океанах. Под механической энергией понимается кинетическая и потенциальная энергия. Процессы ее преобразования включают в себя поступление энергии через морскую поверхность или боковые границы, взаимные переходы между кинетической и потенциальной энергией, диссипацию энергии вследствие придонного трения и турбулентной вязкости, адвективный перенос

энергии течениями. Указанные процессы описываются уравнениями энергетического баланса, которые можно получить из уравнений движения и формул для кинетической и потенциальной энергии.

Исследованию пространственно-временной изменчивости энергетических характеристик морских течений посвящено много научных работ, в одних оцениваются составляющие баланса механической энергии [1–3], в других предметом рассмотрения являются переходы энергии между движениями различных масштабов (крупномасштабные течения и вихревые образования) [4–8]. Также вычисление энергетических потоков между кинетической и доступной потенциальной энергией применяется для оценки вкладов бароклинной и баротропной составляющих в неустойчивость течений [9–11].

В представленной работе для анализа энергетических характеристик крупномасштабной циркуляции в Черном море используются результаты численного моделирования в рамках двухслойной вихреразрешающей модели [8, 12, 13]. Данная модель является энергетически сбалансированной и на качественном уровне хорошо описывает особенности крупномасштабной динамики Черного моря, позволяет учесть основные факторы, определяющие формирование и изменчивость крупномасштабной циркуляции и мезомасштабных вихревых структур. Такими факторами являются вертикальная стратификация вод, нелинейность адвективных членов в уравнениях движения, форма бассейна и изрезанность береговой линии, рельеф дна и β -эффект [13]. При использовании для возбуждения движения в модели стационарного или периодически меняющегося ветра удастся получить выход решения задачи на статистически равновесный режим, что является условием, дающим возможность рассматривать и анализировать не зависящие от времени средние значения исследуемых параметров.

Возможность получения статистически равновесного решения есть одна из причин выбора двухслойной модели для проведения расчетов, но, с другой стороны, использование упрощенной модели может быть поводом для критики сделанных в данной работе выводов. Поэтому имеет смысл сравнить результаты расчета энергетических параметров в двухслойной модели с результатами подобных вычислений, полученных с помощью других, более «продвинутых», моделей. Интересной и перспективной в этом смысле представляется работа [14], в которой описывается численный эксперимент по моделированию циркуляции Черного моря с помощью модели *DieCAST*. В работе отмечается, что за 24 года в модели был получен квазипериодический режим циркуляции.

В работе [8], посвященной исследованию энергетических переходов в двухслойной модели Черного моря, в числе прочего были рассчитаны осредненные за большой период времени поля различных энергетических характеристик. При этом отмечены существенные различия в пространственном распределении источников и стоков энергии. В частности, было получено, что поток энергии, поступающей в море от ветра, сосредоточен в восточной половине (рис. 1, *a*), а районы, где отмечается максимальная диссипация энергии, расположены в западной части вдоль края северо-западного шельфа (рис. 1, *b*). Таким образом, море получает энергию преимущественно в восточной части, а теряет – в западной.

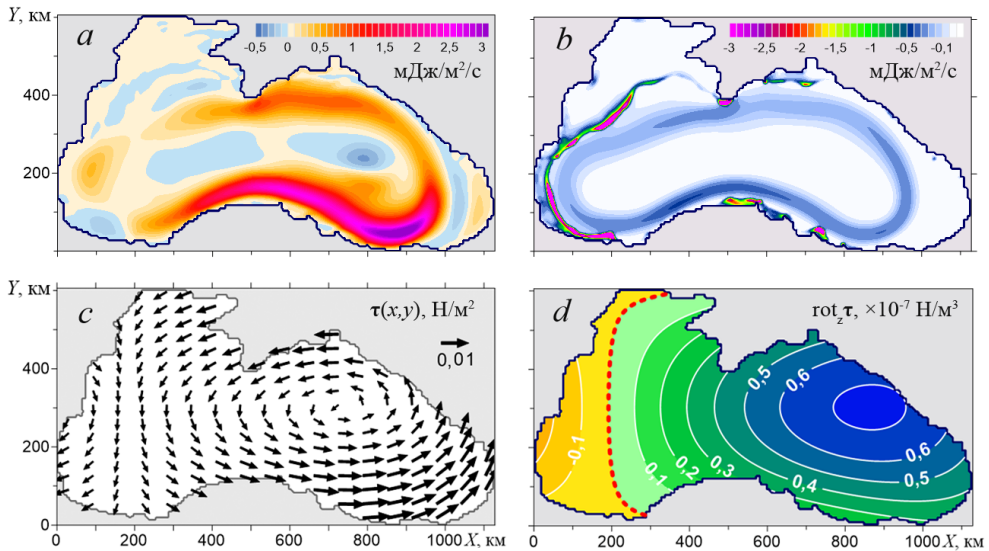


Рис. 1. Пространственное распределение осредненной по времени работы касательного напряжения ветра (*a*) и средней диссипации энергии вследствие трения на нижней границе верхнего слоя (*b*), касательного напряжения ветра (*c*) и его завихренности (*d*)

Fig. 1. Spatial distribution of the time-averaged work of tangential wind stress (*a*) and average energy dissipation due to friction at the upper layer lower boundary (*b*), tangential wind stress (*c*) and wind vorticity (*d*)

Неравномерность ветровой накачки энергией крупномасштабных черноморских течений, о существовании которой ранее упоминалось в работе [15], объясняется особенностями распределения завихренности касательного напряжения ветра над акваторией Черного моря [15, 16]. Что касается локализации зон с максимальной диссипацией энергии придонным трением вдоль материкового шельфа в западной части моря, то в научной литературе описания и объяснения данного феномена не встречается.

Данная работа посвящена выяснению причин пространственной неоднородности осредненных по времени потоков энергии в Черном море.

Материалы и методы

В работе использованы результаты численных экспериментов, выполненных с помощью двухслойной вихререзающей модели [8], ветровое воздействие в которой задавалось стационарным полем касательного напряжения ветра (рис. 1, *c*, *d*) с неоднородной по площади завихренностью. Параметры модели: разрешение по пространству (размер горизонтальной ячейки) $\Delta x = \Delta y = 3000$ м; шаг по времени $\Delta t = 120$ с; коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, параметризованной бигармоническим оператором, $A_B = 2 \cdot 10^8$ м⁴/с; коэффициент придонного трения, пропорционального квадрату скорости, $r_H = 0,002$; коэффициент линейного трения между слоями $r_L = 2 \cdot 10^{-6}$ м/с; редуцированное ускорение свободного падения $g' = 0,032$ м/с²; параметр Кориолиса $f = f_0 + \beta y$, где $f_0 = 10^{-4}$ 1/с, $\beta = 2 \cdot 10^{-11}$ 1/с/м; толщина верхнего слоя

в состоянии покоя $h_0 = 100$ м. Эмпирические коэффициенты придонного трения и горизонтальной турбулентной вязкости были подобраны исходя из лучшего соответствия результатов моделирования данным наблюдений черноморской циркуляции [17, 18].

Необходимые для вычисления энергетических характеристик данные представляют собой полученные в численных экспериментах мгновенные значения уровня моря, толщины верхнего слоя, горизонтальных составляющих скорости течений в узлах расчетной сетки с дискретностью по времени 1 сут.

Для расчета кинетической энергии использовались следующие формулы:

$$e_1 = \rho \frac{u_1^2 + v_1^2}{2}, \quad e_2 = \rho \frac{u_2^2 + v_2^2}{2}, \quad K_1 = h_1 e_1, \quad K_2 = h_2 e_2,$$

где e_1, e_2 – кинетическая энергия единицы объема воды в верхнем и нижнем слоях; ρ – средняя плотность воды в море (следствие приближения Буссинеска); $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$ – составляющие скорости течений в слоях; K_1, K_2 – кинетическая энергия столба воды единичного сечения в верхнем и нижнем слоях; h_1, h_2 – толщина слоев.

Энергетика двухслойной модели описывается системой уравнений энергетического баланса, состоящей из уравнений для кинетической энергии верхнего и нижнего слоя K_1, K_2 и уравнения для потенциальной энергии.

Уравнения энергетического баланса для K_1, K_2 можно получить, если умножить уравнения движения на соответствующие составляющие скорости течений, сложить и сделать несложные преобразования:

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1 h_1 e_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1 h_1 e_1}{\partial y} &= W_{G1} + W_{\tau} + W_{RL1} + W_{AB1}, \\ \frac{\partial K_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 h_2 e_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2 h_2 e_2}{\partial y} &= W_{G2} + W_{RL2} + W_{RD} + W_{AB2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Члены в левой части уравнений (1) представляют собой локальные производные по времени и дивергенции потоков кинетической энергии в верхнем и нижнем слоях. В правой части уравнений находятся члены, описывающие работы в единицу времени (мощность) сил, входящих в уравнения движения. Эти работы определяют соответствующие потоки и переходы энергии: W_{G1}, W_{G2} – работа сил гидростатического давления, равна переходу между кинетической и потенциальной энергией в верхнем и нижнем слое соответственно; W_{τ} – работа касательного напряжения ветра, равна притоку энергии от ветра (ветровая накачка); W_{RL1}, W_{RD} – диссипация энергии вследствие работы силы трения на нижней границе верхнего и нижнего слоя; W_{RL2} – поступление энергии в нижний слой за счет работы силы трения на жидкой границе между слоями; W_{AB1}, W_{AB2} – диссипация энергии вследствие работы сил горизонтальной турбулентной вязкости в слоях.

Уравнение баланса потенциальной энергии получается дифференцированием по времени потенциальной энергии положения (P) столба воды единичного сечения от поверхности до дна:

$$P = -\int_{\zeta}^H \rho(z)gzdz = -\int_{\zeta}^{h_1+\zeta} \rho_1gzdz - \int_{h_1+\zeta}^H \rho_2gzdz,$$

$$P = -\rho_1g \frac{(h_1+\zeta)^2}{2} + \rho_1g \frac{\zeta^2}{2} - \rho_2g \frac{H^2}{2} + \rho_2g \frac{(h_1+\zeta)^2}{2},$$

$$P = -\rho_2g \frac{H^2}{2} + \rho_2g' \frac{(h_1+\zeta)^2}{2} + \rho_1g \frac{\zeta^2}{2},$$

где H – глубина моря. После дифференцирования P по t и использования приближений Буссинеска и «твердой крышки» получим искомое уравнение

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \rho g' \left(\frac{\partial u_2 h_2 h_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2 h_2 h_1}{\partial y} \right) - \rho g \left(\frac{\partial U \zeta}{\partial x} + \frac{\partial V \zeta}{\partial y} \right) = -W_{G1} - W_{G2}, \quad (2)$$

где $U = u_1 h_1 + u_2 h_2$, $V = v_1 h_1 + v_2 h_2$ – составляющие полного потока.

Потоки W_{G1} , W_{G2} с разными знаками входят одновременно в уравнения баланса кинетической (уравнение (1)) и потенциальной (уравнение (2)) энергии, тем самым обеспечивая энергетическую связь между верхним и нижним слоем.

Потоки энергии в уравнениях (1) и (2) рассчитывались по следующим формулам:

$$W_{\tau} = u_1 \tau^x + v_1 \tau^y,$$

$$W_{RL1} = u_1 R_{L1}^x + v_1 R_{L1}^y, \quad W_{RL2} = u_2 R_{L2}^x + v_2 R_{L2}^y, \quad W_{RD} = u_2 R_D^x + v_2 R_D^y,$$

$$W_{G1} = \rho g (u_1 h_1 \zeta_x + v_1 h_1 \zeta_y), \quad W_{G2} = \rho g (u_2 h_2 \zeta_x + v_2 h_2 \zeta_y) + \rho g' (u_2 h_2 h_{1x} + v_2 h_2 h_{1y}),$$

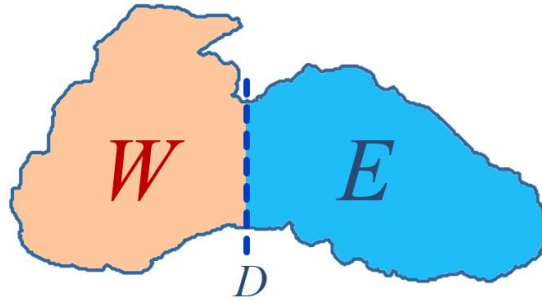
$$W_{AB1} = \rho (u_1 A_B \nabla (h_1 \nabla (\Delta u_1)) + v_1 A_B \nabla (h_1 \nabla (\Delta v_1))),$$

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

где (τ^x, τ^y) – составляющие касательного напряжения ветра на поверхности моря; $(R_{L1}^x, R_{L1}^y), (R_{L2}^x, R_{L2}^y)$ – составляющие сил трения на поверхности раздела слоев; (R_D^x, R_D^y) – составляющие силы придонного трения; A_B – эмпирический коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости.

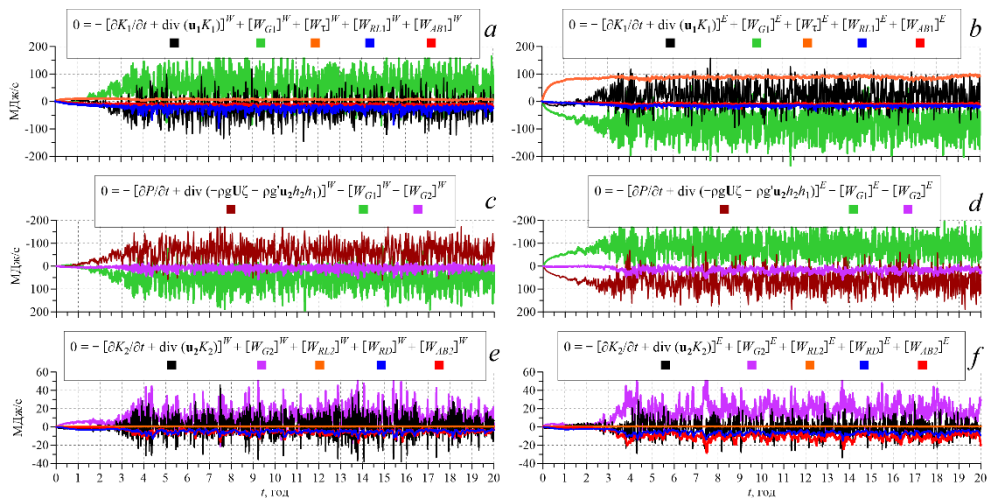
Изучение мгновенных полей энергетических характеристик представляется сложным вследствие нелинейности уравнений энергетического баланса и значительной изменчивости энергетических характеристик. Одним из методов исследования подобных процессов является вычисление и анализ их осредненных по времени и/или пространству значений. Подобный подход был использован в работе [8], в которой энергетические характеристики осреднялись по всей акватории моря.

Анализ осредненных по всей площади моря данных не позволил объяснить пространственную неравномерность распределения потоков энергии. Чтобы сделать это, Черное море было условно разделено на западную и восточную части по меридиану, проходящему через м. Сарыч в Крыму (рис. 2).



Р и с. 2. Разделение Черного моря на западную (W) и восточную (E) части по разрезу D
F i g. 2. Division of the Black Sea into the western (W) and eastern (E) parts along section D

Отдельно для западной и восточной частей моря были рассчитаны средние по площади энергетические балансы (рис. 3, в верхнем ряду расположены балансы K_1 , в среднем ряду – балансы P , в нижнем ряду – балансы K_2).



Р и с. 3. Графики изменения во времени средних по акватории составляющих энергетического баланса для западной (слева) и восточной (справа) частей Черного моря. Выражения в квадратных скобках с верхним индексом означают осреднение по площади

F i g. 3. Graphs of time changes of the water area average components of the energy balance for the western (left) and eastern (right) parts of the Black Sea. Expressions in square brackets with a superscript denote area averaging

В нижнем слое моря балансы кинетической энергии течений K_2 в западной и восточной частях бассейна (рис. 3, e, f) сходны между собой, они показывают, что кинетическая энергия нижнего слоя формируется за счет перехода из потенциальной энергии (фиолетовая кривая). Диссипация энергии в нижнем слое происходит вследствие придонного трения (синяя кривая) и горизонтальной турбулентной вязкости (красная кривая). Поступление кинетической энергии в нижний слой моря за счет трения между слоями (оранжевая кривая) пренебрежимо мало, из чего следует, что трение на границе слоев приводит в основном к диссипации кинетической энергии течений в верхнем слое моря.

Отличия между балансами энергии K_1 (рис. 3, *a, b*) и P (рис. 3, *c, d*) в западной и восточной частях бассейна значительны.

В восточной половине моря (рис. 3, *b*) происходит пополнение кинетической энергии течений K_1 за счет притока энергии от ветра (оранжевая кривая). Некоторая часть K_1 тратится на диссипацию (синяя и красная кривые), но большая ее часть переходит в потенциальную энергию (зеленая кривая), которая затем расходуется на пополнение кинетической энергии течений в нижнем слое (фиолетовая кривая) и на дивергенцию потока P (коричневая кривая) (рис. 3, *d*).

Также на рис. 3, *b* обращает на себя внимание график конвергенции потока кинетической энергии K_1 (черная кривая), расположенный в области положительных значений. Таким образом, можно сказать, что в восточной половине моря имеется дополнительный к ветровой накачке источник кинетической энергии, обусловленный конвергенцией адвективного потока K_1 .

В западной части моря, напротив, наблюдается дивергенция потока K_1 (рис. 3, *a*, черная кривая) и конвергенция потока P (рис. 3, *c*, коричневая кривая). Основным источником пополнения кинетической энергии K_1 в западной части бассейна (рис. 3, *a*) является переход из потенциальной энергии (зеленая кривая). Диссипация энергии вследствие придонного трения в два раза превышает аналогичные потери в восточной половине моря (синяя кривая).

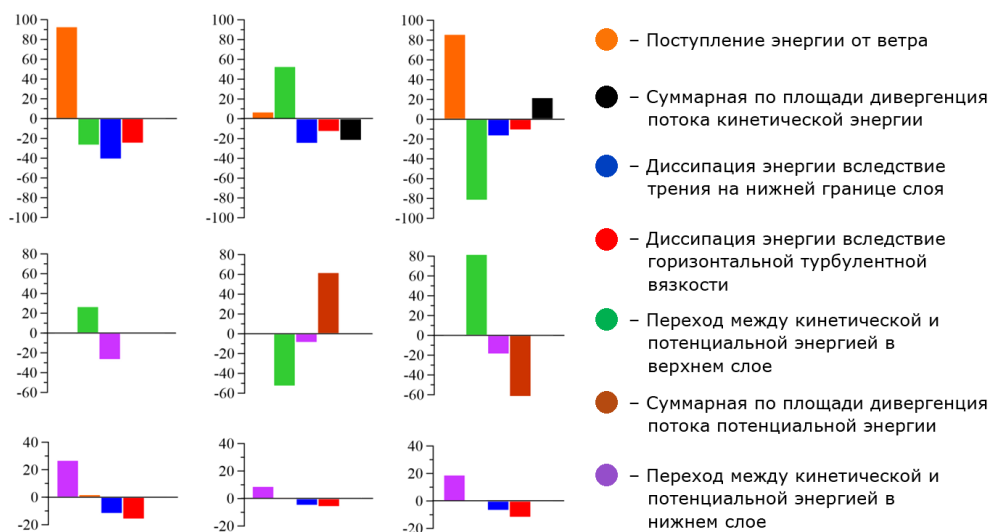


Рис. 4. Осредненные по времени суммарные по площади составляющие энергетического баланса (МДж/с) в эксперименте с учетом β -эффекта. Левая колонка – море в целом, средняя колонка – западная половина, правая колонка – восточная половина. Верхний ряд – балансы K_1 , средний ряд – балансы P , нижний ряд – балансы K_2

Fig. 4. Time-averaged and area-aggregated components of the energy balance (MJ/s) in the experiment with the regard for the β -effect. The left column is the sea as a whole, the middle column – its western half, the right one – its eastern half. Top row – K_1 balances, middle row – P balances and bottom row – K_2 balances

Чтобы избавиться от временной производной в уравнениях (1), можно осреднить графики, приведенные на рис. 3 за длительный период времени, и представить балансы энергии в виде диаграмм. На рис. 4 кроме средних балансов западной и восточной половин моря приведены диаграммы осредненных балансов энергии для всего моря в целом (левая колонка). Видно, что балансы энергии в восточной половине моря по направлению источников и стоков энергии совпадают с общим балансом. А в энергетическом балансе западной части моря переход энергии между K_1 и P (зеленые столбики) противоположен аналогичному переходу в восточной части и в целом по морю.

Разнонаправленность переходов энергии между K_1 и P в разных половинах моря (рис. 4, средний ряд) компенсируется суммарной по площади дивергенцией адвективного потока P (коричневые столбики), которая имеет противоположные знаки. В балансах K_1 восточной и западной половин моря (рис. 4, верхний ряд) противоположные по знаку составляющие энергетического баланса соответствуют суммарной по площади дивергенции/конвергенции адвективного потока K_1 (черные столбики).

Для перехода от дивергенции потоков энергии в формулах (1), (2) к потокам энергии через границу D , разделяющую восточную и западную части Черного моря, воспользуемся формулой Остроградского – Гаусса, согласно которой интеграл от дивергенции двумерного векторного поля \mathbf{F} , распространенный на некоторую площадь S , равен потоку вектора \mathbf{F} через контур L , ограничивающий эту площадь:

$$\iint_S (\operatorname{div} \mathbf{F}) dx dy = \int_L (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) dl.$$

В рассматриваемой задаче, учитывая граничные условия прилипания на берегу моря, данную формулу можно упростить, оставив справа лишь часть контура (разрез D) с ненулевыми потоками через него:

$$\iint_W (\operatorname{div} \mathbf{F}) dx dy = - \int_D F^x dy, \quad \iint_E (\operatorname{div} \mathbf{F}) dx dy = \int_D F^x dy,$$

где F^x – составляющая потока вдоль оси X , нормальная к оси Y . Тогда для суммарного адвективного потока P через разрез D получим

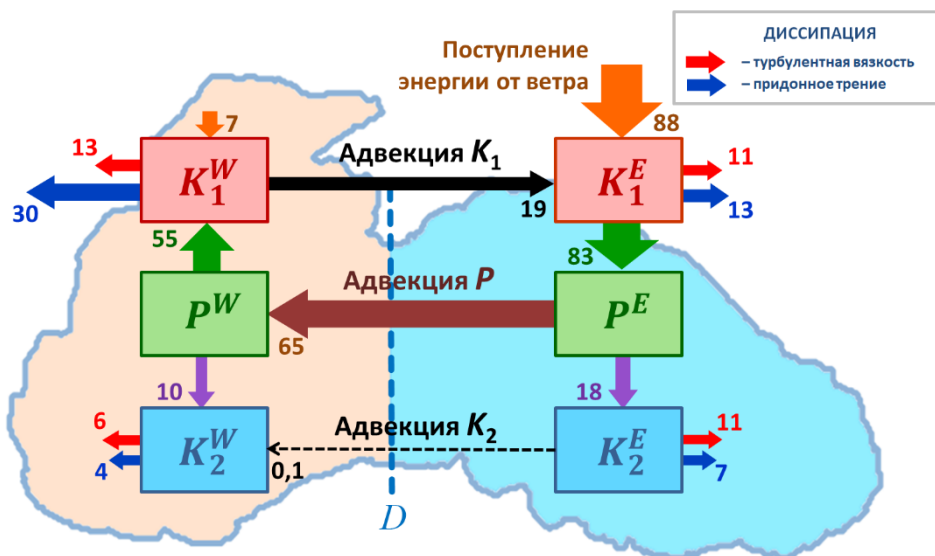
$$\int_D F_P^x dy = - \int_D \rho (g(u_1 h_1 + u_2 h_2) \zeta + g' u_2 h_2 h_1) dy,$$

соответственно для адвективных потоков кинетической энергии через D имеем

$$\int_D F_{K_1}^x dy = \int_D u_1 h_1 e_1 dy, \quad \int_D F_{K_2}^x dy = \int_D u_2 h_2 e_2 dy.$$

С учетом вышесказанного была построена интегральная схема потоков энергии в Черном море при условии разделения акватории на две области

(рис. 5). Согласно этой схеме, поступающая в восточную половину моря ветровая энергия идет на увеличение кинетической энергии течений верхнего слоя, которая в свою очередь вследствие работы сил градиента гидростатического давления переходит в потенциальную энергию. Большая часть P из восточной половины моря адвективным потоком переносится в западную, а меньшая часть переходит в кинетическую энергию течений в нижнем слое.



Р и с. 5. Схема средних потоков и переходов энергии с учетом β -эффекта (цифры – величины потоков энергии в МДж/с)

F i g. 5. Scheme of average flows and energy transitions with the regard for the β -effect (numbers denote the energy flow values, MJ/s)

В западной половине бассейна основным источником пополнения K_1 является переход из потенциальной энергии, перенесенной течениями с востока. Также небольшая часть потенциальной энергии переходит в K_2 .

Кинетическая энергия течений верхнего слоя в западной половине моря активно диссипирует, но довольно значительная ее часть вследствие адвекции течениями переносится обратно в восточную половину, создавая тем самым циркуляцию механической энергии. Источник кинетической энергии в восточной половине моря в виде адвективного потока K_1 по величине примерно равен диссипации энергии в этой области.

Потеря энергии в рассматриваемом численном эксперименте происходит за счет диссипации кинетической энергии течений верхнего и нижнего слоя вследствие придонного трения и горизонтальной турбулентной вязкости. Причем в структуре диссипации в верхнем слое преобладает придонное трение, в нижнем – турбулентная вязкость. Наибольший вклад в диссипацию энергии в целом вносит придонное трение верхнего слоя в западной части моря. Области максимального стока энергии расположены вдоль материкового склона по краю северо-западного и западного шельфа (рис. 1, b).

Адвективный перенос кинетической энергии в нижнем слое направлен с востока на запад, но его величина составляет лишь 0,1% от общего притока энергии, что соизмеримо с точностью вычисления составляющих энергетического баланса в модели.

Наиболее вероятной причиной неравномерности распределения осредненных потоков энергии между восточной и западной частями Черного моря, по мнению автора, является β -эффект. Согласно теории западного пограничного слоя [19, 20], вращение и сферичность Земли в океане приводят к асимметрии циркуляционных круговоротов, проявляющейся в западной интенсификации течений. Перенос энергии с востока на запад осуществляется волнами Россби, которые относятся к классу градиентно-вихревых волн. В ранее проведенных нами численных экспериментах [12] были получены различные типы долгопериодных колебаний в поле крупномасштабных течений Черного моря в виде баротропных, бароклинных и топографических волн Россби, но заметной интенсификации течений у западного берега получено не было.

Чтобы подтвердить гипотезу о влиянии β -эффекта на перераспределение потоков энергии в Черном море, был проведен дополнительный численный эксперимент с параметрами, аналогичными применяемым в первом эксперименте, но при $\beta = 0$. Наглядное представление о циркуляции, которая имела место в этом эксперименте в статистически равновесном режиме, можно получить из рис. 6, *b*.

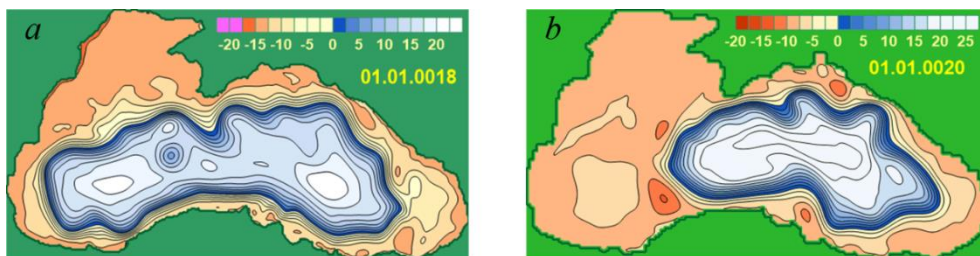


Рис. 6. Мгновенные поля уровня моря ζ , см, в эксперименте с учетом (*a*) и без учета (*b*) β -эффекта

Fig. 6. Instantaneous sea level fields ζ , cm, in the experiment with (*a*) and without (*b*) the regard for the β -effect

Вследствие квазигеострофичности движений рассматриваемых масштабов поля ζ дают хорошее представление о крупномасштабной циркуляции в верхнем слое моря. Изолинии ζ совпадают с линиями тока, а их максимальное сгущение соответствует стрежню Основного Черноморского течения (ОЧТ). На рис. 6, *a* для сравнения показано поле ζ , полученное в эксперименте с учетом β -эффекта. Основное отличие в циркуляции состоит в том, что в эксперименте с постоянным параметром Кориолиса ОЧТ не распространяется в западную часть моря, а сосредоточивается в центральной и восточной частях бассейна. Как показали ранее проведенные эксперименты, такой характер циркуляции объясняется выбором поля касательного напряжения ветра над морем (рис. 1, *c, d*) и определяется в первую очередь формой бассейна, рельефом дна и влиянием нелинейных адвективных членов в уравнениях движения.

Схема энергетических потоков и переходов энергии (рис. 7), построенная для второго эксперимента способом, аналогичным применяемому в первом эксперименте (рис. 4, 5), демонстрирует отсутствие адвективного потока потенциальной энергии из восточной половины бассейна в западную. При этом наблюдается незначительный адвективный поток P в обратном направлении, не оказывающий заметного влияния на другие потоки энергии.

В отличие от первого эксперимента при $\beta = 0$ переходы энергии происходят в направлении от K_1 к P в обеих половинах бассейна. При этом адвективный перенос кинетической энергии в верхнем слое моря происходит из восточной половины бассейна в западную. Очевидно, это связано с пространственной неравномерностью используемого поля касательного напряжения ветра, вследствие чего в восточной половине моря генерируется больше кинетической энергии течений.

Также неравномерностью ветровой накачки энергии можно объяснить большие значения диссипации энергии в восточной половине бассейна во втором эксперименте.

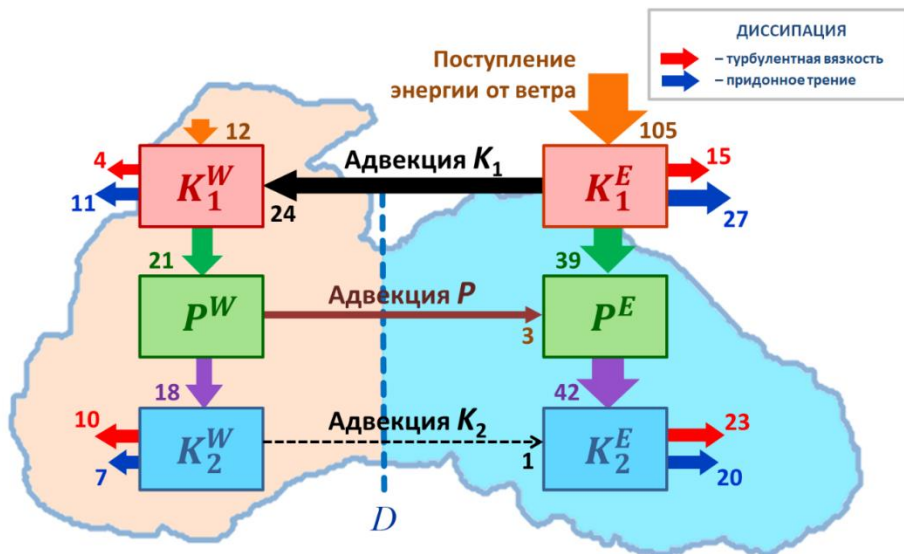


Рис. 7. Схема средних потоков и переходов энергии в эксперименте без учета β -эффекта (обозначения см. на рис. 5)

Fig. 7. Scheme of average flows and energy transitions in the experiment with no regard for the β -effect (see the notation in Fig. 5)

Таким образом, сравнение энергетических характеристик, рассчитанных по результатам двух экспериментов, отличающихся между собой только учетом/неучетом β -эффекта, подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о влиянии совместного эффекта сферичности и вращения Земли (β -эффект) на пространственное перераспределение потоков и переходов механической энергии в Черном море.

Заключение

После анализа данных, полученных в результате численного моделирования в рамках двухслойной вихререзающей модели, установлено, что в энергетике восточной и западной частей Черного моря имеются существенные отличия.

В восточной половине моря происходит основное пополнение кинетической энергии течений верхнего слоя за счет работы касательного напряжения ветра, а в западной половине, наоборот, преобладают процессы диссипации энергии вследствие придонного трения. Также существует различие в направлении средних переходов между потенциальной и кинетической энергией в разных половинах бассейна. На востоке преобладает преобразование кинетической энергии течений верхнего слоя моря в потенциальную, а на западе, наоборот, потенциальная энергия преобразуется в кинетическую. Наблюдаемый дисбаланс в пространственном распределении источников и стоков энергии компенсируется адвективным переносом потенциальной энергии через условную границу D с востока на запад.

Представляет интерес полученный в результате расчетов адвективный поток кинетической энергии в верхнем слое моря из западной половины в восточную. Учитывая, что кинетическая энергия в западной половине формируется из потенциальной, поступающей из восточной части, где она была преобразована из кинетической энергии верхнего слоя, можно сказать, что в Черном море имеет место циркуляция механической энергии.

Важно понимать, что построенная схема переходов энергии отражает среднее состояние энергетических характеристик. В отдельные моменты времени потоки (переходы) энергии могут значительно отличаться от этой схемы по величине и направлению.

Сравнительный анализ энергетических балансов, полученных в экспериментах, выполненных с учетом и без учета β -эффекта, дает основание полагать, что именно β -эффект является причиной описанных выше особенностей пространственной неоднородности потоков энергии в Черном море. Также это косвенно подтверждает ранее сделанный нами вывод о роли β -эффекта в распространении ОЧТ на весь периметр глубоководной части Черного моря.

В данной работе остались не рассмотренными некоторые вопросы, связанные со структурой средних адвективных потоков энергии между восточной и западной частями моря. В частности, не выяснено, каким образом потоки распределены вдоль разреза D и к каким масштабам движения они относятся. Ответам на эти и другие вопросы будет посвящена следующая работа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. P. 386–393. doi:10.1134/S0001433816040046
2. Demyshev S. G., Dymova O. A. Numerical analysis of the Black Sea energy budget in 2011 // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 899, iss. 2. 022004. doi:10.1088/1742-6596/899/2/022004
3. Kang D., Curchitser E. N. Energetics of Eddy–Mean Flow Interactions in the Gulf Stream Region // *Journal of Physical Oceanography*. 2015. Vol. 45, iss. 4. P. 1103–1120. doi:10.1175/JPO-D-14-0200.1

4. *Травкин В. С., Жмур В. В., Белоненко Т. В.* Вклад мезомасштабных вихрей Лофотенской котловины в ее энергетику // Russian Journal of Earth Sciences. 2022. Т. 22, № 4. ES4002. doi:10.2205/2022ES000802
5. *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, iss. 9. P. 2827–2850. doi:10.1175/JPO-D-16-0012.1
6. *Demyshev S. G., Dymova O. A.* Numerical analysis of the Black Sea currents and mesoscale eddies in 2006 and 2011 // Ocean Dynamics. 2018. Vol. 68, iss. 10 P. 1335–1352. doi:10.1007/s10236-018-1200-6
7. *Демьшев С. Г., Дымова О. А.* Анализ энергетического цикла Лоренца для различных режимов циркуляции Черного моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 26–40. doi:10.17076/lim1621
8. *Павлушин А. А., Шапиро Н. Б., Михайлова Э. Н.* Энергетические переходы в двухслойной вихререзающей модели Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 3. С. 201–219. doi:10.22449/0233-7584-2019-3-201-219
9. *Oey L.-Y.* Loop Current and Deep Eddies // Journal of Physical Oceanography. 2008. Vol. 38, iss. 7. P. 1426–1429. doi:10.1175/2007JPO3818.1
10. Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. Part II: Frontal Processes / X. Capet [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2008. Vol. 38, iss. 1. P. 44–64. doi:10.1175/2007JPO3672.1
11. *Пузина О. С., Кубряков А. А., Мизюк А. И.* Сезонная и вертикальная изменчивость энергии течений в субмезомасштабном диапазоне на шельфе и в центральной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 1. С. 41–56. doi:10.22449/0233-7584-2021-1-41-56
12. *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
13. *Павлушин А. А.* Численное моделирование крупномасштабной циркуляции и вихревых структур в Черном море // Труды Государственного океанографического института. 2018. № 219. С. 174–194. EDN UTDXPY
14. *Коротенко К. А.* Моделирование мезомасштабной циркуляции Черного моря // Океанология. 2015. Т. 55, № 6. С. 909–915. doi:10.7868/S0030157415060076
15. *Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием / А. Г. Зацепин [и др.]* // Современные проблемы динамики океана и атмосферы : сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения П. С. Линейкина. Москва : Триада ЛТД, 2010. С. 347–368. EDN TVXEMZ
16. *Шокуров М. В., Шокурова И. Г.* Завихренность напряжения трения ветра на поверхности Черного моря при различных ветровых режимах // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 13–26. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-13-26
17. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с.
18. *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
19. *Педлоски Дж.* Геофизическая гидродинамика. В 2-х т. М. : Мир, 1984.
20. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана. М. : Мир, 1986. Т. 2. 415 с.

Об авторе:

Павлушин Андрей Александрович, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-2098-5068, ResearcherID: R-4908-2018**, pavlushin@mhi-ras.ru