

Оценки бюджета доступной потенциальной энергии в Черном море при различных схемах расчета адвективного переноса тепла и соли

О. А. Дымова

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

Поступила в редакцию 27.03.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2024;
принята к публикации 17.07.2024.

Аннотация

Цель. Проанализирована доступная потенциальная энергия и составляющие ее бюджета в Черном море по результатам численного моделирования циркуляции при использовании новой схемы аппроксимации температуры и солёности в операторе адвективного переноса.

Методы и результаты. На основе версий модели МГИ, различавшихся схемами аппроксимации адвективных членов, проведено два численных эксперимента. Разница между схемами состоит в том, что в эксперименте 1 выполнялось условие сохранения температуры и солёности в первой и второй степени, в эксперименте 2 – температуры в первой и третьей, солёности в первой и пятой степени. Получено, что при использовании новой схемы запас доступной потенциальной энергии увеличивается в среднем за год на 30 %. Разница обусловлена уменьшением горизонтальной диффузии в тёплый сезон года и уменьшением расхода доступной потенциальной энергии за счёт работы силы плавучести в холодный сезон. Валидация результатов моделирования по данным измерений температуры и солёности из Банка океанографических данных МГИ показала, что применение новой схемы аппроксимации позволяет уточнить поле плотности и энергетические характеристики в верхнем слое Черного моря. Ниже горизонта 300 м при незначительных расхождениях между модельными и натурными термохалинными характеристиками в двух расчетах выявлены качественные и количественные различия в энергетических полях: увеличивается разница в значениях доступной потенциальной энергии в центральной части и на периферии бассейна, возрастает площадь зон экстремальных значений работы силы плавучести.

Выводы. Использование новой схемы аппроксимации температуры и солёности в операторе адвективного переноса позволяет уточнить поле плотности и, как следствие, получить более точные оценки доступной потенциальной энергии циркуляции. В верхнем слое Черного моря (слой постоянного пикноклина и выше) разница между полями энергетических характеристик, рассчитанных в двух экспериментах, обусловлена различиями в пространственном распределении аномалий плотности, при этом абсолютные значения аномалий и максимальные значения энергии в экспериментах близки по величинам. Ниже слоя пикноклина доступная потенциальная энергия увеличивается при использовании новой схемы вследствие того, что изменения температуры и солёности приводят к увеличению нормальных к берегу градиентов аномалий плотности.

Ключевые слова: Черное море, моделирование, циркуляция, доступная потенциальная энергия, сила плавучести, аномалия плотности, термохалинные характеристики

Благодарности: работа выполнена в рамках темы госзадания ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2024-0001.

Для цитирования: Дымова О. А. Оценки бюджета доступной потенциальной энергии в Черном море при различных схемах расчета адвективного переноса тепла и соли // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 723–737. EDN WLDWWP.

© Дымова О. А., 2024

Estimates of Available Potential Energy Budget in the Black Sea Using Different Schemes for Calculating Heat and Salt Advective Transport

O. A. Dymova

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

✉ olgadymova@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The study is purposed at analyzing the available potential energy and its budget components in the Black Sea based on the results of numerical circulation modeling using a new temperature and salinity approximation scheme in the advective transport operator.

Methods and Results. Two numerical experiments were carried out based on the MHI model versions differing from each other in their approximation schemes of advective terms. The difference between the schemes is that in experiment 1, the condition of conserving temperature and salinity in the first and second degrees is satisfied, whereas in experiment 2 – temperature in the first and third degrees, and salinity in the first and fifth degrees are conserved. It is found that application of the new scheme is accompanied by an increase in the available potential energy reserve by on average 30 % over a year. The difference is conditioned by a decrease in both the horizontal diffusion in a warm season and the consumption of available potential energy through the buoyancy work in a cold season. The modeling results validated by the temperature and salinity measurement data from the MHI Oceanographic Data Bank show that application of the new approximation scheme permits to specify the density field and the energy characteristics in the Black Sea upper layer. Below the 300 m horizon, the discrepancies between the model and *in-situ* thermohaline fields in two experiments are minor, whereas the qualitative and quantitative distinctions in energy fields are significant: difference in the values of available potential energy in the basin central and periphery parts as well as the area of zones with the extreme buoyancy work values increase.

Conclusions. Application of the new approximation scheme of temperature and salinity in the advective transport operator makes it possible to specify the field density and, as a consequence, to obtain more accurate estimates of the available potential energy of sea circulation. In the Black Sea upper layer (the main pycnocline layer and above), the difference between the fields of energy characteristics calculated in two experiments is due to the differences in spatial distribution of density anomalies, at that the anomaly absolute values and the maximum energy values in the experiments are close in their magnitudes. Below the pycnocline layer, application of the new scheme is followed by the growth of available potential energy since the temperature and salinity changes lead to an increase in the gradients of density anomalies normal to the coast.

Keywords: Black Sea, modeling, circulation, available potential energy, buoyancy work, density anomaly, thermohaline characteristics

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI on theme no. FNNN-2024-0001.

For citation: Dymova, O.A., 2024. Estimates of Available Potential Energy Budget in the Black Sea Using Different Schemes for Calculating Heat and Salt Advective Transport. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 679-693.

Введение

Мезомасштабные вихревые движения в океанах и морях являются одним из основных механизмов вертикального и горизонтального перераспределения вещества и энергии в морских бассейнах. Согласно классическим представлениям [1, 2], формирование таких вихрей связано с высвобождением некоторой

части потенциальной энергии океана, называемой доступной потенциальной (ДПЭ), и преобразованием ее в вихревую кинетическую энергию. Исследование бюджета ДПЭ позволяет оценить роль основных физических сил в мезомасштабной динамике моря. Основываясь на оценках потоков энергии, авторы [3] показали, что для глобального океана бароклинная продукция, обусловленная переносом аномалий плотности течениями, и потенциально-кинетическая конверсия, определяемая вертикальным вихревым потоком силы плавучести, являются основными механизмами преобразования ДПЭ. В работе [4] представлены результаты исследования глобальной вихревой ДПЭ и в дополнение к [3] указано, что в верхнем перемешанном слое океана существенную роль в бюджете ДПЭ играют диабатическое перемешивание, взаимодействие с атмосферой на границе вода – воздух и внутренняя диффузия. В литературе представлены также региональные особенности распределения и эволюции ДПЭ в крупномасштабных океанических течениях. Так, например, в [5] выполнены оценки скорости бароклинной конверсии ДПЭ и получено, что так как она на порядок больше скорости баротропной конверсии вихревой кинетической энергии, именно этот фактор объясняет бароклинный характер неустойчивости Гольфстрима. В [6] показано, что не ветровое воздействие, а вариации ДПЭ в результате теплового взаимодействия океана и атмосферы играют определяющую роль в бюджете вихревой кинетической энергии в районе течения Куроисио.

В современных условиях численное моделирование является одним из основных инструментов диагноза и прогноза гидродинамических и энергетических характеристик циркуляции. Традиционно уравнения скорости изменения энергии выводятся из дифференциальных уравнений энергетики океана [3, 7], однако их дискретные аналоги, не являющиеся точным следствием конечно-разностных уравнений модели океана, будут вносить ошибку в количественные оценки потоков энергии. Кроме того, для правильной оценки ДПЭ при переходе от разностного уравнения адвекции – диффузии плотности к уравнению скорости изменения энергии необходимо корректно аппроксимировать плотность в тех точках разностного шаблона, в которых она не рассчитывается напрямую. Учитывая высказанные соображения, в работе [8] предложена схема аппроксимации уравнения скорости изменения ДПЭ, которая получена в результате строгого алгебраического преобразования конечно-разностных уравнений модели. В [9] описана новая схема аппроксимации температуры и солености на гранях бокса (для конечно-разностного шаблона, где температура и соленость рассчитываются в центре бокса), которая при произвольной полиномиальной зависимости плотности от температуры и солености обеспечивает дивергентный вид уравнения адвекции плотности.

Данная статья представляет собой расширенную версию материалов доклада, представленного на 14-й международной конференции «Волны и вихри в сложных средах» в 2023 г. [10], и является продолжением численного анализа энергетики Черного моря [11]. Чтобы оценить, как влияет схема расчета термохалинных характеристик на пространственную и временную изменчивость энергетических потоков, формирующих ДПЭ, в настоящей работе на основе

аппроксимаций, предложенных в [8, 9], проведено моделирование циркуляции, рассчитаны и проанализированы все слагаемые уравнения бюджета ДПЭ, проведено сопоставление с полученными ранее данными.

Методика расчета и используемые данные

Анализ особенностей распределения ДПЭ в Черном море проведен на примере моделирования циркуляции в 2016 г. Численные эксперименты выполнены при помощи вихререзающей модели Морского гидрофизического института с разрешением 1,6 км [11]. Модель построена на основе полной системы уравнений термогидродинамики океана в приближении Буссинеска и гидростатики. Уравнение состояния представлено нелинейной зависимостью плотности от температуры и солёности. Вертикальное турбулентное перемешивание параметризовано моделью замыкания Меллора – Ямады 2.5 [12], горизонтальная диффузия в уравнениях тепла и соли, а также горизонтальная вязкость в уравнениях движения описываются оператором Лапласа во второй степени с постоянными коэффициентами соответствующей размерности. В качестве граничных условий на свободной поверхности задаются напряжение ветра, потоки тепла, осадки и испарение по данным реанализа ERA5¹. На твердых боковых участках границы для компонент скорости ставятся условия равенства нулю нормальной скорости и производной по нормали касательной скорости, а также равенства нулю их лапласианов, для температуры и солёности задано равенство нулю производных по нормали и их лапласианов. На дне ставится условие прилипания и условие отсутствия нормальных потоков тепла и соли. В модели учитываются климатический сток рек и водообмен через проливы [13], на жидких участках границы ставятся условия Дирихле. Коррекция неточностей задания потока тепла из атмосферы на поверхности моря проводится путем усвоения спутниковой температуры поверхности моря [14]. Батиметрия бассейна построена на основе цифрового массива глубин EMODnet². Конечно-разностная аппроксимация уравнений модели выполнена на сетке C [15]. Полная физическая постановка задачи, используемые коэффициенты и параметризации подробно представлены в [11].

В работе проведено два численных эксперимента по реконструкции циркуляции и точному расчету бюджета ДПЭ. Разница между ними состоит в способе вычисления температуры T и солёности S в конечно-разностном операторе адвективного переноса, который, например, для температуры имеет вид (для солёности аналогично):

$$ADV^T = [u_{i+1/2,j,k}(T_{i+1/2,j,k} - T_{i,j,k}) - u_{i-1/2,j,k}(T_{i-1/2,j,k} - T_{i,j,k})]h_x^{-1} + \\ + [v_{i,j+1/2,k}(T_{i,j+1/2,k} - T_{i,j,k}) - v_{i,j-1/2,k}(T_{i,j-1/2,k} - T_{i,j,k})]h_y^{-1} + \\ + [w_{i,j,k+1/2}(T_{i,j,k+1/2} - T_{i,j,k}) - w_{i,j,k-1/2}(T_{i,j,k-1/2} - T_{i,j,k})](h_z^k)^{-1},$$

где u, v, w – компоненты вектора скорости течения; h – величина шага по пространству в соответствующем направлении; i, j, k – координаты узлов сетки

¹ ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present : data set / H. Hersbach [et al.] // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. (date of access: 25.06.2023). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>

² URL: <https://doi.org/10.12770/ff3aff8a-cff1-44a3-a2c8-1910bf109f85> (дата обращения: 27.08.2024).

модели в пространстве сеточных функций, соответствующие середине бокса на сетке C [15]. Так как на сетке C температура, соленость и плотность рассчитываются в центре модельного бокса, то их величины на гранях бокса (получелые индексы), строго говоря, неизвестны. В [9] показано, что в условиях адиабатичности и отсутствия внешних источников при нелинейном уравнении состояния, не зависящем от давления, для сохранения дискретного интеграла от плотности целесообразно использовать такие аппроксимации нелинейных слагаемых на гранях бокса, чтобы наряду с T и S сохранялись T^m и S^l , где m и l – целые положительные числа больше 2. В эксперименте 1 для вычисления T и S на гранях бокса использовалась формула

$$T_{i+1/2,j,k} = \frac{T_{i+1,j,k} + T_{i,j,k}}{2}, \quad S_{i+1/2,j,k} = \frac{S_{i+1,j,k} + S_{i,j,k}}{2}, \quad (1)$$

в эксперименте 2 – формула, подробный вывод которой показан в [9]:

$$S_{i+1/2,j,k} = \frac{4 S_{i+1,j,k}^4 + S_{i+1,j,k}^3 S_{i,j,k} + S_{i+1,j,k}^2 S_{i,j,k}^2 + S_{i+1,j,k} S_{i,j,k}^3 + S_{i,j,k}^4}{5 S_{i+1,j,k}^3 + S_{i+1,j,k}^2 S_{i,j,k} + S_{i+1,j,k} S_{i,j,k}^2 + S_{i,j,k}^3}, \quad (2)$$

$$T_{i+1/2,j,k} = \frac{2 T_{i+1,j,k}^2 + T_{i+1,j,k} T_{i,j,k} + T_{i,j,k}^2}{3 T_{i+1,j,k} + T_{i,j,k}}.$$

Формулы (1) и (2) описывают изменение T и S по координате x (для y, z аналогично). Для обоих способов расчета конечно-разностный оператор адвективного переноса имеет второй порядок аппроксимации. Разница между экспериментами состоит в том, что в эксперименте (1) сохранялись T, S и T^2, S^2 ; в эксперименте (2) – T, S и T^3, S^3 . Аппроксимация (2) имеет ограничения при $|T| \ll 1$ °C и/или $|S| \ll 1$ ‰. Для условий Черного моря такая ситуация практически не имеет места, и в представленных расчетах она отсутствует.

Скорость изменения ДПЭ рассчитывалась по формуле

$$\frac{\partial APE_{i,j,k}}{\partial t} + \left\{ \delta_x \left(u_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe} \right) + \delta_y \left(v_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe} \right) + \delta_z \left(w_{i,j,k} a_{i,j,k}^{pe} \right) \right\} (\delta_z \rho_k^s)^{-1} =$$

$$= -g \overline{w_{i,j,k}}^z \rho_{i,j,k}^* + \omega_{i,j,k} + (D_H + D_V)_{i,j,k},$$

$$APE_{i,j,k} = a_{i,j,k}^{pe} (\delta_z \rho_k^s)^{-1}, \quad a_{i,j,k}^{pe} = g \frac{(\rho_{i,j,k}^*)^2}{2}, \quad (3)$$

где APE – плотность ДПЭ; δ – конечно-разностный аналог оператора дифференцирования по соответствующей координате; g – ускорение силы тяжести; ρ^s – средняя по площади k -го слоя плотность морской воды; ρ^* – аномалия плотности, рассчитанная как разница между локальной и средней по слою плотностью; D_H, D_V – горизонтальная и вертикальная диффузионные компоненты бюджета ДПЭ; ω – обозначение дополнительных разностных слагаемых, не имеющих аналога в дифференциальном уравнении и возникающих в результате строгого вывода формулы (3) из конечно-разностных уравнений модели. Отметим, что ω включает слагаемые, учитывающие изменение аномалий плотности на гранях бокса и связанные с адвективным переносом, а D – дополнительные диффузионные члены. Вывод и полный вид слагаемых $\omega, D_H,$

D_T представлены в [8]. Для удобства интерпретации результатов экспериментов перепишем уравнение (3) в символическом виде:

$$\frac{\partial APE}{\partial t} = ADV + WRG + DIFH + DIFV,$$

где ADV – изменение ДПЭ за счет адвективного переноса, WRG – за счет работы силы плавучести, $DIFH$ и $DIFV$ – за счет горизонтальной и вертикальной диффузии соответственно.

В результате проведения численных экспериментов на каждые сутки 2016 г. получены трехмерные поля температуры, солёности, плотности, скорости течений, аномалий плотности, поля ДПЭ и компонент ее бюджета. Валидация результатов моделирования термохалинных полей выполнена на основе данных, полученных из Банка океанографических данных МГИ [16]. Контактные измерения температуры и солёности выполнены буями-профилемерами *Argo*, а также в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2016 г. В таблице представлены среднеквадратические отклонения (СКО) между модельными и натурными значениями температуры и солёности для всех имевшихся данных наблюдений. Как видно из таблицы, в эксперименте 2 СКО температуры в слое 30–100 м уменьшается на 25 %, а среднее СКО солёности для горизонтов от 0 до 100 м – на 21 %. Для глубоководных горизонтов ниже 300 м разница между СКО для двух экспериментов незначительна.

СКО между модельными и натурными температурой и солёностью **Root mean square deviation between the model and *in-situ* temperature and salinity**

Глубина, м / Depth, m	Эксперимент 1 / Experiment 1		Эксперимент 2 / Experiment 2	
	Температура, °C / Temperature, °C	Солёность, ‰ / Salinity, ‰	Температура, °C / Temperature, °C	Солёность, ‰ / Salinity, ‰
0–5	0,79	0,28	0,94	0,22
5–30	1,53	0,23	1,54	0,17
30–100	1,12	0,67	0,84	0,56
100–300	0,26	0,48	0,27	0,50
300–800	0,05	0,09	0,07	0,10
800–1500	0,03	0,08	0,03	0,08

Сравнение результатов моделирования с натурными данными показало, что уменьшение СКО в верхнем 100-метровом слое Черного моря при использовании схемы аппроксимации (2) с точки зрения практической гидрологии проявляется в уменьшении толщины верхнего перемешанного слоя в зимний период и уменьшении глубины залегания верхней границы слоя скачка температуры летом в центральной части моря.

Результаты

По результатам численных экспериментов проведен анализ интегральных и пространственных распределений компонент бюджета ДПЭ и сопоставление

с распределением термохалинных и динамических характеристик циркуляции. Оба эксперимента стартовали с одинаковых начальных условий, а значимые различия в значениях модельных параметров проявились с апреля. Получено, что начиная с весны средняя по объему ДПЭ в эксперименте 2 превышает ее значения в эксперименте 1, эта разница составила в среднем за год около 30 %. Так как для Черного моря характерна сильная сезонная изменчивость гидрофизических полей [17], то для более детального сравнения мы рассмотрели летний (май – июнь) и зимний (ноябрь – декабрь) периоды.

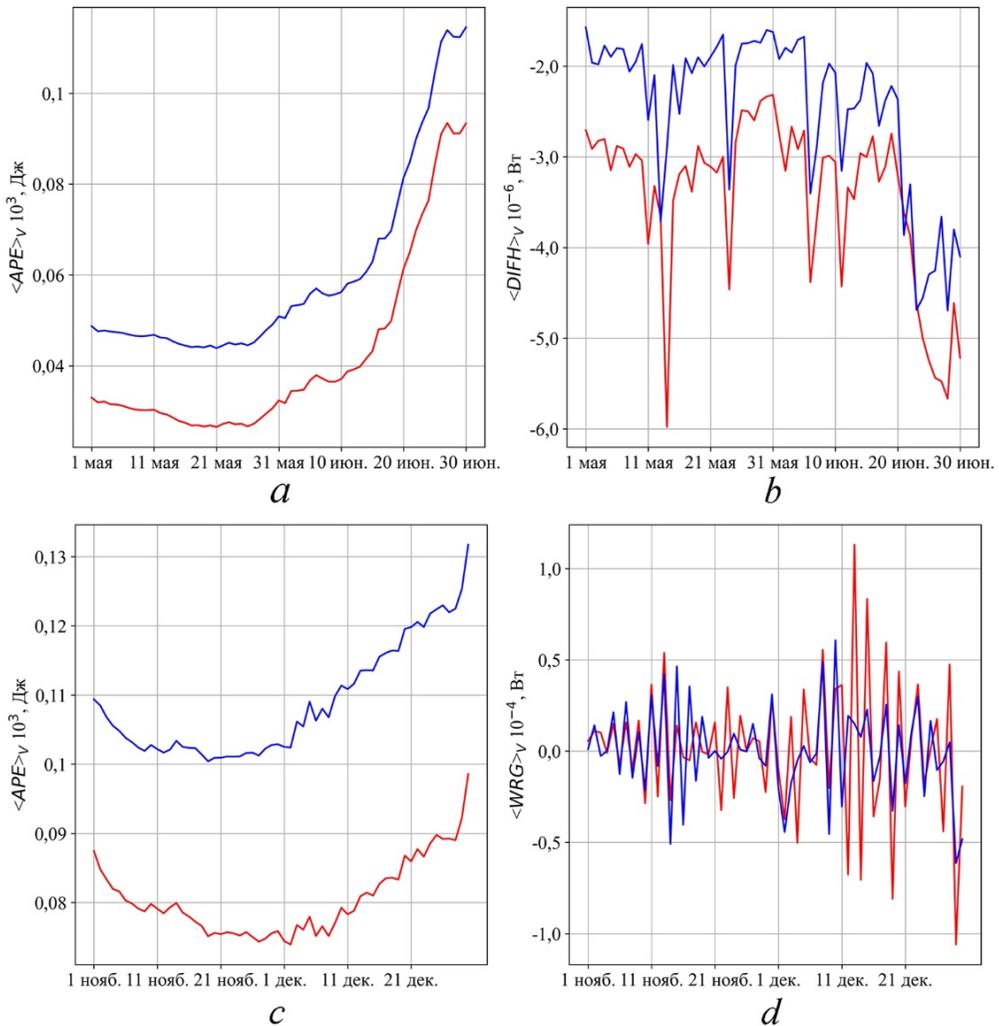


Рис. 1. Изменение со временем средних по объему ДПЭ (*a, c*), горизонтальной диффузии ДПЭ (*b*) и работы силы плавучести (*d*) для двух экспериментов в мае – июне (*a, b*) и ноябре – декабре (*c, d*) 2016 г. Красная кривая – эксперимент 1, синяя кривая – эксперимент 2

Fig. 1. Change over time of volume-average APE (*a, c*), horizontal diffusion of APE (*b*) and buoyancy work (*d*) for two experiments in May – June (*a, b*) and November – December (*c, d*), 2016. Red curves – experiment 1, blue curves – experiment 2

На рис. 1 представлено изменение со временем средних по объему APE , WRG и $DIFH$ для двух экспериментов летом и зимой 2016 г. Анализ изменения со временем компонент бюджета ДПЭ показал, что в летний сезон увеличение ДПЭ в эксперименте 2 (рис. 1, *a*) связано с уменьшением потерь энергии вследствие горизонтальной диффузии (рис. 1, *b*). При этом пространственное распределение компоненты $DIFH$ указывает на ослабление горизонтальной диффузии в прибрежной зоне на северо-западном шельфе (СЗШ) и в глубоководной части моря [10, с. 379, рис. 1, *b*]. При анализе термохалинных характеристик на СЗШ в эксперименте 2 выявлено уменьшение горизонтальных градиентов солёности, что и определяет уменьшение потока энергии, обусловленного горизонтальной диффузией. В центральной части диффузионный поток уменьшается вследствие более однородного пространственного распределения поля плотности.

Согласно математической постановке задачи в модели МГИ положительное значение WRG соответствует преобразованию ДПЭ в кинетическую энергию, т. е. уменьшению ДПЭ. Для представленных на рис. 1, *d* кривых средние значения параметра $\langle WRG \rangle_v$ равны $0,15 \cdot 10^{-5}$ и $0,01 \cdot 10^{-5}$ Вт для экспериментов 1 и 2 соответственно. Таким образом, зимой увеличение запаса ДПЭ в эксперименте 2 (рис. 1, *c*) обусловлено тем, что меньшее количество ДПЭ расходуется на трансформацию в кинетическую энергию. Кроме того, как показано в работе [10, с. 380, рис. 2], в западной и юго-западной частях материкового склона в эксперименте 2 усиливается поток энергии, вызванный трансформацией кинетической энергии в доступную потенциальную. Компонента WRG определяется плотностью и вертикальной скоростью. Следовательно, выхолаживание и интенсификация зимней конвекции являются основными причинами увеличения запаса ДПЭ зимой.

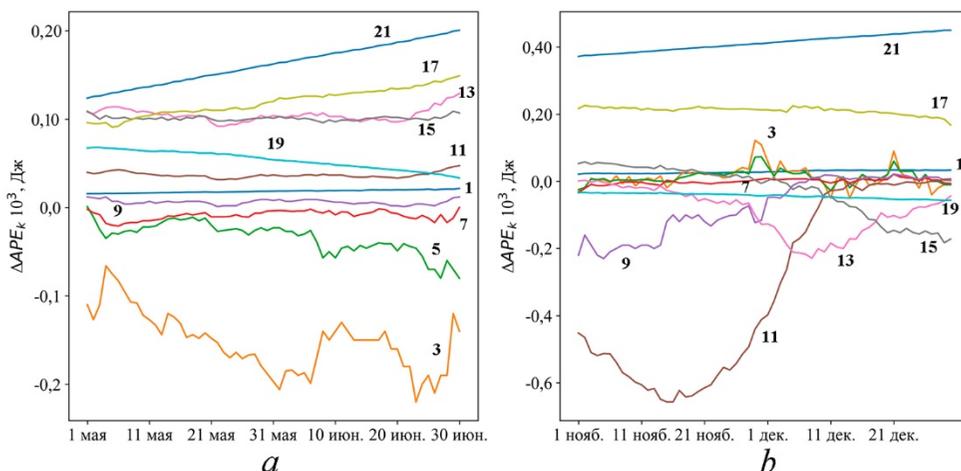


Рис. 2. Изменение со временем разницы ΔAPE_k в мае – июне (*a*) и ноябре – декабре (*b*) 2016 г. Цифры – номер слоя (индекс k)

Fig. 2. Change over time of difference ΔAPE_k in May – June (*a*) and November – December (*b*), 2016. Numerals are the layer numbers (index k)

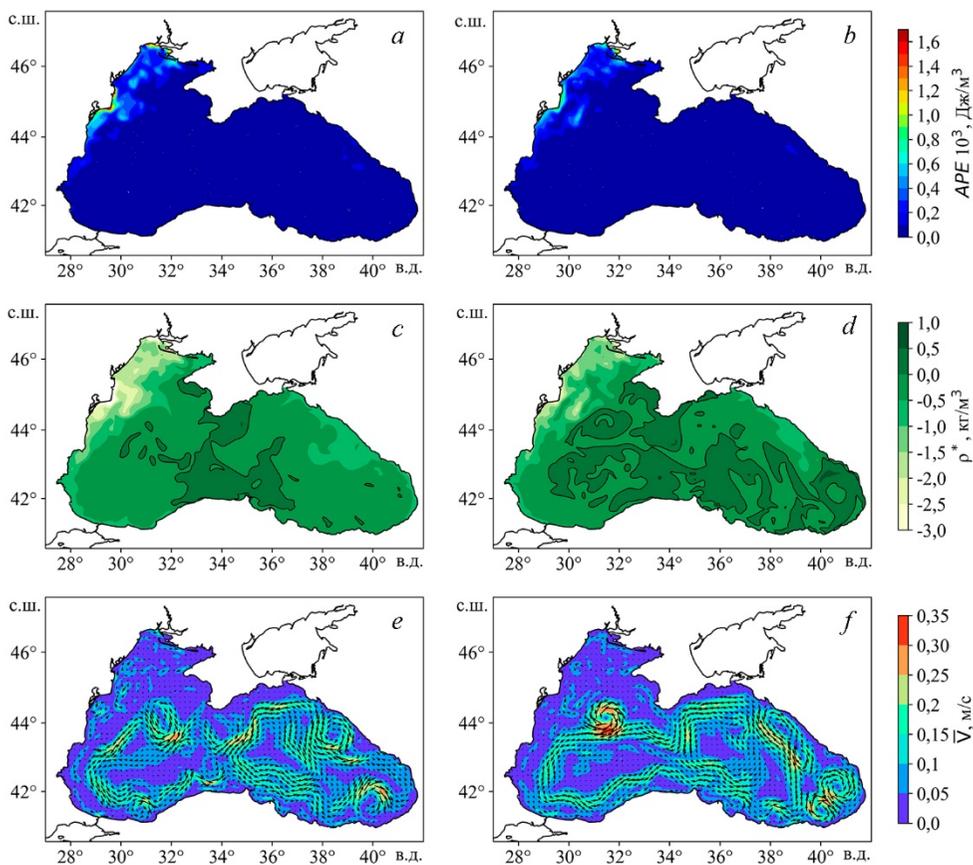
Сравнение кривых APE и $DIFH$ в двух экспериментах, представленных на рис. 1, демонстрирует сходство временной изменчивости средних по объему величин энергетических характеристик. Такое поведение кривых, вероятно, связано с изменчивостью внешних условий. Ранее показано [18], что в запас ДПЭ в Черном море максимальный вклад дает верхний 30-метровый слой моря, наиболее сильно подверженный влиянию термохалинного форсинга. Так как граничные условия для обоих экспериментов одинаковы, то изменчивость со временем средних интегральных величин APE и $DIFH$ практически идентична в экспериментах. Сдвиг кривых по оси ординат обусловлен увеличением средней аномалии плотности вследствие изменения термохалинных характеристик.

Для летнего и зимнего периодов оценено изменение запаса ДПЭ по глубине для двух экспериментов. Для этого в каждом модельном слое рассчитывалась разница между средней по объему k -го слоя ДПЭ в двух расчетах $\Delta APE_k = \langle APE_{\text{exp2}} \rangle_{V_k} - \langle APE_{\text{exp1}} \rangle_{V_k}$. Положительное значение ΔAPE_k указывает, что запас ДПЭ в k -ом слое выше в эксперименте 2. Получено, что летом в слое 5–40 м средняя ДПЭ выше в эксперименте 1 (рис. 2, *a*, кривые 3, 5, 7, 9). Начиная с горизонта 60 м (рис. 2, *a*, кривые 11 и выше), ДПЭ в эксперименте 2 превышает значения в эксперименте 1, достигая максимума на 21-м слое (рис. 2, *a*, кривая 21), соответствующем глубине 500–700 м.

Для зимнего сезона в слое 40–100 м величина ΔAPE_k отрицательна (рис. 2, *b*, кривые 9, 11, 13), следовательно ДПЭ в первом эксперименте выше, чем во втором. Для глубоководных горизонтов зимой, так же как и летом, запас ДПЭ в эксперименте 2 выше, чем в 1. Однако максимальная разница между расчетами зимой почти в два раза больше.

Обсуждение

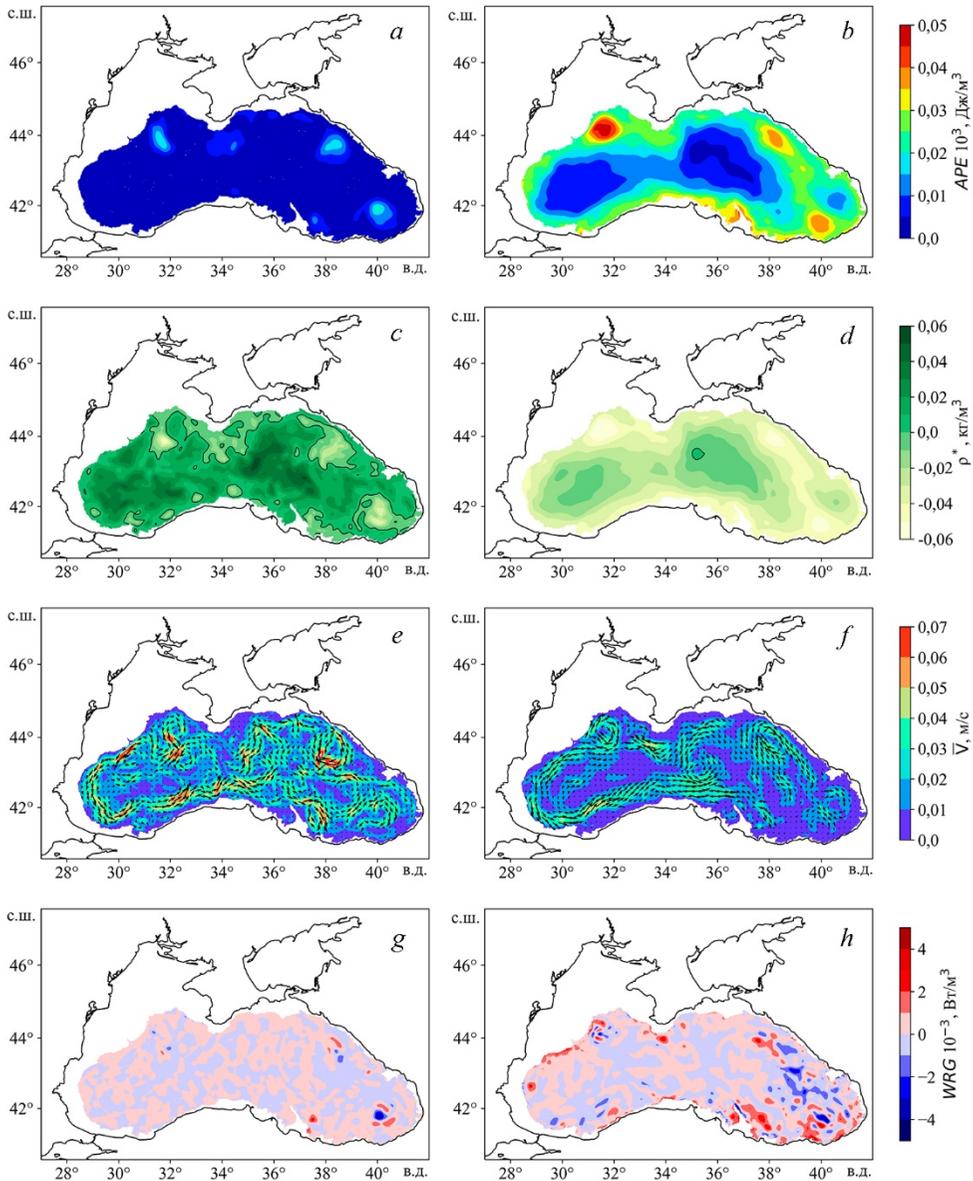
Начальные и граничные условия для численных экспериментов были одинаковыми, различались они только схемой расчета температуры и солёности в операторе адвективного переноса тепла и соли. Других изменений в конечно-разностные уравнения модели или величины модельных констант не вносилось. Все описанные выше различия между результатами расчетов прямо или опосредованно через изменение плотности обусловлены изменением адвекции температуры и солёности. Для определения физических причин выявленных различий, рассмотрим подробнее пространственные распределения энергетических и гидрологических характеристик циркуляции на различных горизонтах в летний и зимний периоды. Как показано выше, летом в верхнем слое моря запас ДПЭ больше в эксперименте 1. Анализ пространственного распределения плотности ДПЭ и аномалии локальной плотности морской воды в июне свидетельствует, что в верхнем слое APE меньше в эксперименте 2 (рис. 3, *b*) вследствие пониженных абсолютных значений аномалии плотности на СЗШ (рис. 3, *d*) по сравнению с экспериментом 1.



Р и с. 3. Пространственные распределения APE (a, b), аномалии плотности (c, d), скорости течений (e, f) на глубине 5 м по результатам экспериментов 1 (a, c, e) и 2 (b, d, f) на 15 июня 2016 г.
F i g. 3. Spatial distributions of APE (a, b), density anomaly (c, d) and current velocities (e, f) at the 5 m depth based on the results of experiments 1 (a, c, e) and 2 (b, d, f) on June 15, 2016

Уменьшение модуля аномалии плотности обусловлено пониженными значениями температуры и повышенной соленостью по сравнению с экспериментом 1. Как видно из результатов валидации термохалинных характеристик (таблица), использование новой схемы аппроксимации (2) позволяет улучшить воспроизведение солености в верхнем 100-метровом слое. А так как в Черном море плотность в преобладающей степени зависит от солености [19], то можно предположить, что и аномалия плотности, используемая в формуле (3), рассчитана более корректно в эксперименте 2. Следовательно, оценки ДПЭ, полученные в эксперименте 2, более реалистичны.

При сравнении рис. 3, c и d наблюдается разница в площади областей положительных аномалий плотности в центральной части моря, которая мало влияет на пространственное распределение APE , однако проявляет сходство с полями скорости течений (рис. 3, e и f). Обширные положительные аномалии соответствуют более плотным водам внутри Основного Черноморского течения в эксперименте 2 летом, что свидетельствует о более интенсивной циклонической циркуляции (рис. 3, f) и подъеме глубинных вод в центральной части моря.



Р и с. 4. Пространственные распределения APE (a, b), аномалии плотности (c, d), скорости течений (e, f), работы силы плавучести (g, h) на глубине 500 м по результатам экспериментов 1 (a, c, e, g) и 2 (b, d, f, h) на 15 июня 2016 г.

Fig. 4. Spatial distributions of APE (a, b), density anomaly (c, d), current velocities (e, f) and buoyancy work (g, h) at the 500 m depth based on the results of experiments 1 (a, c, e, g) and 2 (b, d, f, h) on June 15, 2016

На глубинных горизонтах летом (рис. 4, a, b) различия в величине APE более значимы, чем в верхнем слое: во-первых, экстремумы APE в эксперименте 2 примерно в 2,5 раза больше, чем в эксперименте 1; во-вторых, наблюдается существенная разница в величине APE между периферией и центральной частью моря. Сопоставление с полями аномалии плотности показывает,

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 5 2024 733

что увеличение APE в эксперименте 2 обусловлено большими абсолютными значениями аномалии плотности на периферии бассейна (рис. 4, d), тогда как в эксперименте 1 наибольшие значения расположены в центре (рис. 4, c). Как показано в работе [18], такая структура полей APE и аномалии плотности на глубинных горизонтах определяется мезомасштабной вихревой изменчивостью. Как видно из рис. 4, e и f в эксперименте 2 антициклонические вихри вблизи материкового склона имеют более четкую структуру и их расположение совпадает с повышенными значениями APE . Кроме того, анализ компонент бюджета ДПЭ показал, что во втором эксперименте увеличивается вклад работы силы плавучести в зоне действия вихрей (рис. 4, h).

Для зимнего периода получено, что наибольшие различия между значениями ДПЭ в двух экспериментах наблюдаются в слое 40–100 м (рис. 2, b). Чтобы выявить причины этих различий были проанализированы карты полей APE и аномалии плотности на горизонтах 50, 75 и 100 м. Как видно из рис. 5, в эксперименте 1 повышенные значения APE наблюдаются на периферии бассейна в западной части моря (рис. 5, a) и эти области пространственно соответствуют отрицательным аномалиям плотности (рис. 5, c) в антициклонических вихрях. Также видно, что пространственная структура полей аномалии плотности в эксперименте 2 (рис. 5, d) существенно отличается от данных эксперимента 1 (рис. 5, c).

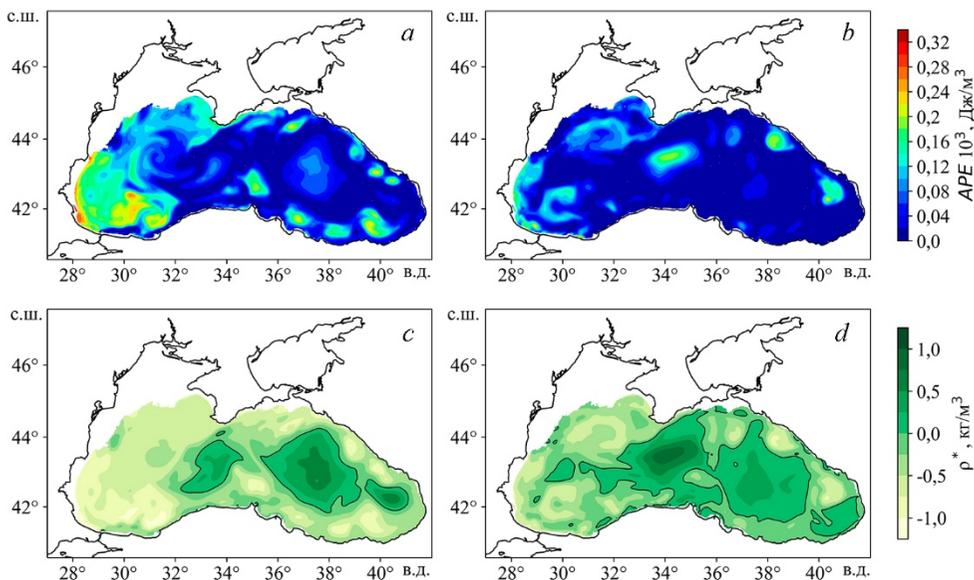
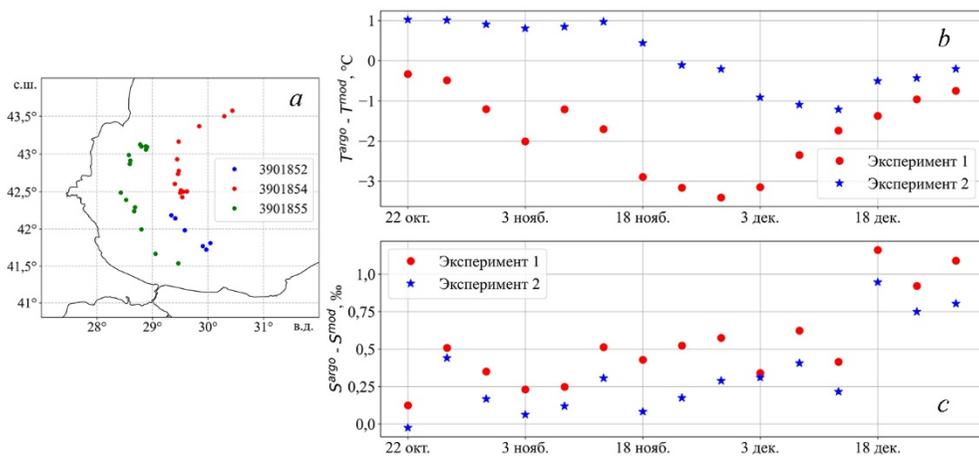


Рис. 5. Пространственные распределения APE (a, b), аномалии плотности (c, d) на глубине 75 м по результатам экспериментов 1 (a, c) и 2 (b, d) на 15 декабря 2016 г.
Fig. 5. Spatial distributions of APE (a, b) and density anomaly (c, d) at the 75 m depth based on the results of experiments 1 (a, c) and 2 (b, d) on December 15, 2016

Поэтому в зимний период дополнительно была проведена оценка изменения со временем отклонения температуры и солёности от данных измерений для юго-западной части моря на глубинах 50–100 м. Были рассмотрены три

буя-профилемера *Argo* № 3901852, 3901854, 3901855 (карта расположения станций профилирования показана на рис. 6, *a*). На рис. 6, *b* и *c* представлены величины отклонений модельных данных от измеренных на горизонте 75 м. Среднее за период 22.10.2016–28.12.2016 отклонение температуры составило $-1,7$ и $+0,1$ °C; отклонение солености 0,5 и 0,3 ‰ для экспериментов 1 и 2 соответственно. Как видно для указанных буев в эксперименте 2 отклонения термохалинных характеристик уменьшаются. Следовательно, данные восстановлены точнее, чем в эксперименте 1. Таким образом, для зимнего сезона 2016 г. оценки ДПЭ, полученные с использованием схем аппроксимации (2), (3), являются более адекватными реальной энергетике циркуляции.



Р и с. 6. Карта расположения станций профилирования буев *Argo* (*a*), отклонение модельной температуры (*b*) и солености (*c*) от данных наблюдений на глубине 75 м в октябре – декабре 2016 г.
F i g. 6. Map of the locations of *Argo* profiling float stations (*a*), deviations of model temperature (*b*) and salinity (*c*) from the observation data at the 75 m depth in October – December, 2016

Для глубинных горизонтов зимой структура поля *АРЕ* похожа на летнюю и повышенные значения в эксперименте 2 также наблюдаются на периферии бассейна и превышают данные эксперимента 1 примерно в два раза.

Заклучение

В работе на примере 2016 г. проведен численный анализ запаса ДПЭ и составляющих ее бюджета в Черном море, полученных при использовании в модели МГИ новой схемы аппроксимации температуры и солености в операторе адвективного переноса для уравнений адвекции – диффузии тепла и соли (эксперимент 2). Выполнено сравнение энергетических характеристик циркуляции с оценками, полученными ранее на основе традиционной схемы аппроксимации (эксперимент 1). Обнаружены различия как в интегральных величинах, так и в пространственном распределении ДПЭ, работы силы плавучести, горизонтальной диффузии. Получено, что запас ДПЭ в эксперименте 2 в среднем за год на 30 % больше, чем в эксперименте 1. Причем в теплый период года эта разница обусловлена уменьшением горизонтальной диффузии, а в холодный – уменьшением количества ДПЭ, которая расходуется на трансформацию в кинетическую энергию вследствие работы силы плавучести.

Как показал анализ, количественные и качественные несоответствия в распределениях ДПЭ и компонентов ее бюджета между результатами двух экспериментов обусловлены различиями в полях аномалии плотности морской воды. Так, в эксперименте 2 летом 2016 г. запас ДПЭ в верхнем слое был меньше, чем в эксперименте 1, вследствие уменьшения модуля аномалии плотности на СЗШ, а зимой, наоборот, выше вследствие формирования обширных областей отрицательных аномалий плотности в западной части моря, соответствовавших антициклоническим вихревым образованиям. В течение всего года повышенные по сравнению с экспериментом 1 значения ДПЭ ниже горизонта 100 м связаны с увеличением аномалий плотности вблизи материкового склона вследствие интенсификации мезомасштабных вихрей.

Как показала валидация модельных термохалинных полей, использование схемы аппроксимации (2) позволяет точнее воспроизвести соленость, а следовательно, и плотность, тем самым обеспечивая более корректный расчет ДПЭ в верхнем слое Черного моря. Ниже горизонта 300 м не обнаружено значимых расхождений между температурой и соленостью в двух расчетах и данными наблюдений, но при этом для энергетических характеристик выявлены существенные качественные и количественные различия: в эксперименте 2 увеличивается разница в значениях ДПЭ в центральной части и на периферии бассейна и возрастает площадь зон экстремальных значений работы силы плавучести.

Как видно из результатов работы, изменение модельных температуры и солености, связанное с новой схемой расчета адвективного переноса тепла и соли, вызывает изменение не только плотности и ДПЭ, но и слагаемых бюджета, описывающих процессы диффузии. Анализ показал, что области уменьшения потока энергии, обусловленного горизонтальной диффузией, пространственно соответствуют зонам уменьшения горизонтальных градиентов солености. Таким образом, использование новой схемы аппроксимации опосредованно через изменение плотности способствует уменьшению диссипации доступной потенциальной энергии. Также следует отметить, что, по предварительным оценкам, полученным в [9], изменение схемы расчета температуры и солености приводит к интенсификации подъема глубинных вод в центральной части моря; следовательно, изменение адвекции влияет на вертикальное перемешивание и глубокую конвекцию, однако данный вопрос выходит за рамки представленной работы и планируется как тема отдельного исследования.

Полученные результаты полезны для анализа механизмов эволюции мезомасштабных вихрей на основе оценки энергетических вкладов таких физических процессов, как диссипация, неустойчивость, работа сил плавучести и давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. Синоптические вихри в океане. Л. : Гидрометеониздат, 1982. 264 с.
2. Гилл А. Динамика атмосферы и океана : в 2 т. М. : Мир, 1986. Т. 2. 415 с.
3. An estimate of the Lorenz energy cycle for the World Ocean based on the 1/10° STORM/NCEP simulation / J.-S. von Storch [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2012. Vol. 42, iss. 12. P. 2185–2205. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-079.1>
4. A global diagnosis of eddy potential energy budget in an eddy-permitting ocean model / Y. Guo [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2022. Vol. 52, iss. 8. P. 1731–1748. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-22-0029.1>

5. *Cronin M., Watts D. R.* Eddy-mean flow interaction in the Gulf Stream at 68°W. Part I: Eddy energetics // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. Vol. 26, iss. 10. P. 2107–2131. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<2107:EFIITG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<2107:EFIITG>2.0.CO;2)
6. Mesoscale air-sea interaction and its role in eddy energy dissipation in the Kuroshio Extension / H. Yang [et al.] // *Journal of Climate*. 2019. Vol. 32, iss. 24. P. 8659–8676. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0155.1>
7. *Holland W. R.* Energetics of baroclinic oceans // *Numerical models of ocean circulation : proceedings of a symposium held at Durham, New Hampshire, October 17–20, 1972*. Washington : National Academy Press, 1975. P. 168–177.
8. *Демьшев С. Г.* Дискретное уравнение для доступной потенциальной энергии как точное следствие конечно-разностных уравнений модели динамики моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 3. С. 239–255. EDN TLFKED.
9. *Демьшев С. Г.* Нелинейные инварианты дискретной системы уравнений динамики моря в квазистатическом приближении // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 5. С. 557–583. EDN JWSUUM
10. *Демьшев С. Г., Дымова О. А.* Оценки бюджета доступной потенциальной энергии в Черном море при использовании новых схем аппроксимации уравнений адвекции-диффузии тепла и соли // *Многофазные системы*. 2023. Т. 18, № 4. С. 378–381. <https://doi.org/10.21662/mfs2023.4.117>
11. *Demyshev S., Dymova O.* Analysis of the annual mean energy cycle of the Black Sea circulation for the climatic, basin-scale and eddy regimes // *Ocean Dynamics*. 2022. Vol. 72, iss. 3–4. P. 259–278. <https://doi.org/10.1007/s10236-022-01504-0>
12. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence close model for geophysical fluid problems // *Review of Geophysics*. 1982. Vol. 20, iss. 4. P. 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>
13. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана СПб. : Гидрометеоиздат, 1991. 426 с.*
14. High and ultra-high resolution processing of satellite sea surface temperature data over Southern European Seas in the framework of MyOcean project / B. Buongiorno Nardelli [et al.] // *Remote Sensing Environment*. 2013. Vol. 129. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.012>
15. *Arakawa A., Lamb V. R.* A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations // *Monthly Weather Review*. 1981. Vol. 109, iss. 1. P. 18–36. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0018:APEAEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0018:APEAEC>2.0.CO;2)
16. Information resources of Marine Hydrophysical Institute, RAS: current state and development prospects / Т.М. Bayankina [et al.] // *Processes in GeoMedia – Volume II*. Cham : Springer, 2021. P. 187–197. (Springer Geology). https://doi.org/10.1007/978-3-030-53521-6_22
17. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с.
18. *Demyshev S., Dymova O., Miklashevskaya N.* Seasonal variability of the dynamics and energy transport in the Black Sea by simulation data // *Water*. 2022. Vol. 14, iss. 3. 338. <https://doi.org/10.3390/w14030338>
19. *Булгаков С. Н., Коротаев Г. К.* Возможный механизм стационарной циркуляции вод Черного моря // *Комплексные исследования Черного моря. Севастополь, 1984. С. 32–40.*

Об авторе:

Дымова Ольга Алексеевна, ведущий научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 7565-1082**, **ORCID ID: 0000-0003-4036-2447**, **ResearcherID: P-9669-2015**, **Scopus Author ID: 6508381809**, olgadymova@mhi-ras.ru