

Научная статья

УДК 551.465  
EDN: RNCPPV

## Механизмы изменчивости циркуляции Черного и Мраморного морей на основе численного анализа энергетики

С. Г. Демьшев, О. А. Дымова , Н. В. Маркова

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

Поступила в редакцию 30.05.2023; одобрена после рецензирования 22.06.2023;  
принята к публикации 06.09.2023.

### Аннотация

*Цель.* Проанализированы физические механизмы формирования структуры циркуляции в Черном и Мраморном морях на основе численных экспериментов с использованием климатических краевых условий.

*Методы и результаты.* Для исследования причин формирования особенностей циркуляции использовался энергетический подход, который позволил рассчитать работу сил, действующих на морскую среду. Расположение в одном географическом регионе обуславливает сходство атмосферных условий для Черного и Мраморного морей, а четко выраженная двухслойная стратификация вод в обоих бассейнах связана со значительным перепадом солёности между черноморскими и средиземноморскими водами. Для анализа механизмов изменчивости циркуляции рассмотрены средние и вихревые поля, сформированные под воздействием климатического атмосферного форсинга и рассчитанные по численной модели динамики моря. Количественные оценки влияния ветра, термохалинных потоков на поверхности морей, работы силы плавучести, трения, диффузии выполнены на основе расчета компонентов энергетического цикла Лоренца. Обнаружены общие черты в механизмах мезомасштабной изменчивости и различия в механизмах изменчивости крупномасштабной циркуляции.

*Выводы.* Основным источником энергии средней циркуляции Черного моря является работа силы ветра, для Мраморного моря доминирующий фактор – работа силы плавучести. Изменчивость вихревой кинетической энергии, характеризующей мезомасштабную динамику, для обоих бассейнов определяется бароклинной неустойчивостью. При этом в Черном море около четверти доступной потенциальной энергии трансформируется в вихревую кинетическую энергию, а в Мраморном – примерно половина.

**Ключевые слова:** Черное море, Мраморное море, циркуляция, кинетическая энергия, доступная потенциальная энергия, энергетический цикл Лоренца, диссипация, бароклинная неустойчивость, плавучесть, ветровое воздействие

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2021-0004.

**Для цитирования:** Демьшев С. Г., Дымова О. А., Маркова Н. В. Механизмы изменчивости циркуляции Черного и Мраморного морей на основе численного анализа энергетики // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 6. С. 893–908. EDN RNCPPV.

## Mechanisms of Variability of the Black and Marmara Seas Circulation Based on Numerical Energy Analysis

S. G. Demyshev, O. A. Dymova , N. V. Markova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
 [olgdymova@mhi-ras.ru](mailto:olgdymova@mhi-ras.ru)

### Abstract

**Purpose.** The study is purposed at analyzing the physical mechanisms of formation of the Black and Marmara seas circulation structures based on the numerical experiments with climatic boundary conditions.

**Methods and Results.** To investigate the reasons for formation of the circulation features, the energetic approach was applied that permitted to calculate the work of the forces affecting the marine environment. Location in the same geographical region determines similarity of the atmospheric conditions for the Black and Marmara seas, and the clearly pronounced two-layer water stratification in both basins is related to a significant difference in salinity of the Black Sea and Mediterranean waters. To analyze the mechanisms of circulation variability, the mean and eddy fields formed under the impact of climatic atmospheric forcing and calculated using a numerical model of sea dynamics were considered. Wind influence, thermohaline fluxes on the sea surface, buoyancy work, friction, and diffusion were quantitatively assessed based on calculation of the Lorenz energy cycle components. The common features were found in the mechanisms of mesoscale variability, and the differences – in the mechanisms of large-scale circulation variability.

**Conclusions.** It is shown that the main source of energy for the Black Sea mean circulation is the wind stress work, and as for the Marmara Sea, the dominant factor is the buoyancy work. For both basins, variability of the eddy kinetic energy characterizing the mesoscale dynamics is conditioned by baroclinic instability. At that, about a quarter of the available potential energy in the Black Sea, and about a half of it in the Marmara Sea is transformed into the eddy kinetic energy.

**Keywords:** Black Sea, Marmara Sea, circulation, kinetic energy, available potential energy, Lorenz energy cycle, dissipation, baroclinic instability, buoyancy, wind stress

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI on theme No. FNNN-2021-0004.

**For citation:** Demyshev, S.G., Dymova, O.A. and Markova, N.V., 2023. Mechanisms of Variability of the Black and Marmara Seas Circulation Based on Numerical Energy Analysis. *Physical Oceanography*, 30(6), pp. 851-865.

### 1. Введение

Черное и Мраморное моря представляют собой внутренние бассейны, в которых водообмен с океаном ограничен узкими проливами. Вместе с Азовским морем они составляют так называемый Эвксинский каскад, где структура циркуляции определяется главным образом атмосферным воздействием и водообменом через проливы. Ряд современных работ посвящен численному исследованию динамики вод как всего каскада [1, 2], так и отдельных его бассейнов (например, <sup>1</sup> [3, 4]), причем основное внимание уделено методикам реконструкции наблюдаемых характеристик циркуляции. Намного меньше исследований, особенно для Мраморного моря, в которых обсуждаются механизмы

---

<sup>1</sup> Black Sea Physical Reanalysis (CMEMS BS-Currents) (Version 1) : [Data set] / L. Lima [et al.]. CMEMS, 2020. [https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA\\_MULTITYEAR\\_PHY\\_007\\_004](https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_MULTITYEAR_PHY_007_004)

изменчивости циркуляции и приведены количественные оценки влияния конкретных физических процессов на термохалинную и динамическую структуру вод.

Для анализа механизмов вихреобразования и формирования течений важным инструментом является исследование энергетики циркуляции. Поскольку энергетический баланс позволяет оценить вклады сил в изучаемые процессы, то на основе этих оценок можно определить физические причины формирования и эволюции особенностей циркуляции. Именно этот подход использован в работе [5], где с помощью анализа энергетики бассейнов исследовалось влияние атмосферного форсинга и потоков через проливы в таких полузамкнутых морях, как Средиземное, Красное, Черное и Балтийское. Численный анализ уравнений скорости изменения кинетической и потенциальной энергии для Черного моря представлен в [6–8]. Отдельные элементы бюджета вихревой кинетической энергии Черного моря, рассчитанные по результатам моделирования, рассмотрены в [9].

В публикациях по оценке динамики Мраморного моря на разных временных интервалах отмечается, что ветровое воздействие и потоки через проливы являются доминирующими факторами, определяющими структуру и пространственно-временную изменчивость мезомасштабных особенностей его циркуляции, и описаны некоторые особенности энергетики моря. Так, в [10] показано, что в отдельные годы кинетическая энергия в северной части Мраморного моря может быть сопоставима с энергией входящего из Босфора потока, а дальнейшее направление струи зависит от расположения максимума ветровых напряжений. В недавнем исследовании на основе модели *SHYFEM* [4] было рассчитано, что поток из Босфора формирует в Мраморном море антициклоническую циркуляцию, а вихревая кинетическая энергия достигает высоких значений вблизи струй, выходящих из проливов Босфор и Дарданеллы, а также с подветренной стороны островов. На основе модели, разработанной в Морском гидрофизическом институте (МГИ), в последние несколько лет также были выполнены расчеты циркуляции Мраморного моря, оценивалось влияние потоков импульса через проливы Босфор и Дарданеллы, атмосферных потоков, а также проведен анализ бюджета кинетической энергии [11].

В отличие от работ по Черному морю, в публикациях о динамике Мраморного моря не была оценена взаимосвязь всех компонентов цикла перераспределения различных видов энергии в бассейне (энергетического цикла Лоренца), не определены количественные соотношения между различными видами поступающей и расходуемой энергии. С целью исследования механизмов изменчивости циркуляции внутренних морей с проливами в настоящей работе на примере Черного и Мраморного морей проведено моделирование климатической циркуляции и выполнены расчет и сравнительная оценка энергетических циклов в этих бассейнах. Численный анализ компонентов цикла Лоренца для Мраморного моря представлен впервые.

## 2. Методы и данные

Численные эксперименты выполнены с использованием нелинейной вихре-разрешающей модели, разработанной в МГИ [12]. Модель построена в декартовой системе координат на базе полной системы уравнений термогидродинамики океана в приближении Буссинеска и гидростатики. Уровень моря вычисляется в предположении выполнения линейризованного кинематического условия на свободной поверхности, вертикальная скорость – из уравнения неразрывности. Плотность нелинейно зависит от температуры и солёности по формуле Мамаева<sup>2</sup>. В качестве граничных условий на свободной поверхности задаются касательные напряжения трения ветра, потоки тепла, осадки и испарение. На твердых боковых границах ставятся условия скольжения для касательных компонент скорости и отсутствия нормальных потоков импульса, тепла и соли. Трение о дно не учитывается. Модель учитывает сток рек и водообмен через проливы. На жидких участках границы ставятся условия Дирихле, в соответствии с которыми скорость рассчитывается из расходов в реках и проливах, температура и солёность заданы. Вертикальный турбулентный обмен параметризован с использованием приближения Пакановски – Филандера [13]. Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии постоянны. Этапы развития модели, особенности численной реализации уравнений и подробное описание модели представлено в [12].

### *Модель Черного моря*

Реконструкция климатической циркуляции Черного моря выполнена при следующих параметрах модели МГИ. Модельный домен представлен равномерной сеткой  $698 \times 390$  узлов с горизонтальным разрешением 1,64 км, что составляет примерно  $(1/48)^\circ$  долготы и  $(1/66)^\circ$  широты. Левый нижний узел сетки соответствует точке с координатами  $27,34^\circ$  в. д.,  $40,81^\circ$  с. ш. По вертикали заданы 27 z-горизонтов с глубинами 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 62,5; 75; 87,5; 100; 112,5; 125; 150; 200; 300; 400; 500; 700; 900; 1100; 1300; 1500; 1700; 2100 м. Батиметрия бассейна построена по данным *EMODnet*<sup>3</sup>. Шаг по времени составляет 96 с. В соответствии с выводами работы [14] пространственное разрешение модели МГИ 1,64 км позволяет явно воспроизвести мезомасштабные особенности циркуляции, так как эта величина значительно меньше радиуса деформации Россби (15–20 км).

На поверхности моря использованы среднемесячные значения полного потока тепла [15] и потока влаги (разница между осадками и испарением) [16]. Поля касательного напряжения трения ветра построены на каждые сутки по распределениям приземного давления [17]. Заданы среднемесячные расходы воды в устьях рек Дунай, Днепр, Днестр, Сакарья, Кизил-Ирмак, Ешиль-Ирмак, Риони, в Керченском проливе и верхнебосфорском течении [18]. Для выполнения закона сохранения массы в бассейне расход в нижнебосфорском течении вычисляется в предположении равенства нулю суммарного за год рас-

---

<sup>2</sup> Мамаев О. И. Т, S-анализ вод Мирового океана. Л. : Гидрометеоздат, 1970. 364 с.

<sup>3</sup> European Marine Observation and Data Network. URL: <https://www.emodnet-bathymetry.eu>  
(дата обращения: 30.05.2023)

хода воды (сумма расходов рек, проливов и разницы между осадками и испарением). Соленость в устьях рек равна 7 ‰, среднемесячная температура задана по данным атласа [18]. Температура и соленость в нижнебосфорском течении соответствуют среднегодовым характеристикам – 12 °С и 35 ‰ соответственно.

Начальное поле (уровень моря, температура, соленость и горизонтальные скорости) на 1 января климатического года построено путем интерполяции в узлы сетки 1,64 км результатов эксперимента [19], выполненного на сетке 5 км с усвоением климатологических профилей температуры и солености. Отметим, что эксперимент [19] проведен при том же атмосферном форсинге, что и анализируемый расчет. Интегрирование уравнений модели выполнено сроком на один год. Выходными данными модели являются среднесуточные поля уровня, температуры, солености и компонент вектора скорости.

### *Модель Мраморного моря*

Для реконструкции климатической циркуляции Мраморного моря применялась модель МГИ [12], адаптированная для указанного бассейна. Условия Дирихле на жидких границах ставятся в проливах Босфор и Дарданеллы. Климатические значения температуры, солености и скорости в проливах определены согласно данным, приведенным в работах [20, 21]. На свободной поверхности задаются среднемесячные климатические потоки тепла, влаги и среднесуточные касательные напряжения трения ветра, полученные в результате осреднения данных атмосферного реанализа ERA5<sup>4</sup> за 30-летний климатический период 1991–2020 гг.<sup>5</sup> Рельеф дна брался аналогичным реализации модели [11].

Расчетный домен расположен между 40,28° и 41,11° с. ш., 26,68° и 29,50° в. д. и содержит 178 × 104 узла, что составляет примерно 1,22 км и 0,83 км в зональном и меридиональном направлениях соответственно. По вертикали заданы 18 z-уровней со значениями глубин от 2,5 до 1100 м (расчетные горизонты 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 62,5; 75; 100; 150; 300; 500; 700; 900; 1100 м). Шаг по времени равен 30 с.

Начальное поле построено в соответствии с данными работы [11]. Расчет выполнен на несколько годовых периодов с повторяющимися из года в год климатическими атмосферными потоками. Период согласования термодинамических полей Мраморного моря и атмосферных условий отслеживался по эволюции рассчитываемых интегральных характеристик. После выхода решения на квазипериодический режим с годовым периодом (после 1000 модельных суток) полученные трехмерные гидрофизические поля были записаны в качестве климатических.

### *Энергетический цикл Лоренца*

Численные оценки влияния основных физических процессов, таких как термохалинное и ветровое воздействие, диссипация, потоки плавучести

---

<sup>4</sup> ECMWF reanalysis v5 (ERA5). URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> (дата обращения: 29.10.2023).

<sup>5</sup> Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. Женева : ВМО, 2017. 21 с. URL: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4168](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4168) (дата обращения: 17.11.2023).

и неустойчивость течений, на структуру циркуляции выполнены на основе расчета компонентов энергетического цикла Лоренца [22] по формулам

$$\begin{aligned}
 K_m &= \frac{1}{2} \int_V \rho_0 (\bar{u}^2 + \bar{v}^2) dV, & K_e &= \frac{1}{2} \int_V \rho_0 (\overline{u'^2 + v'^2}) dV, \\
 P_m &= \frac{1}{2} \int_V \frac{g}{n_0(z)} \overline{\rho^{*2}} dV, & P_e &= \frac{1}{2} \int_V \frac{g}{n_0(z)} \overline{\rho^{* \prime 2}} dV, \\
 n_0(z) &= \frac{\partial \langle \bar{\rho} \rangle}{\partial z}, & \rho^* &= \rho - \langle \bar{\rho} \rangle,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $K_m$  – кинетическая энергия (КЭ) среднего течения;  $K_e$  – вихревая кинетическая энергия;  $P_m$  – средняя доступная потенциальная энергия (ДПЭ);  $P_e$  – вихревая доступная потенциальная энергия;  $\rho_0 = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\rho$  – локальная плотность;  $\rho^*$  – аномалия локальной плотности;  $\langle \bar{\rho} \rangle$  – средняя по площади слоя локальная плотность;  $u$  и  $v$  – зональная и меридиональная компоненты скорости;  $\int_V dV$  – интеграл по объему;  $g$  – ускорение свободного падения. Штрих обозначает отклонение от среднего по времени, черта над символом – осреднение по времени, для всех величин интервал осреднения равен одному году. Скорости преобразования энергии  $C$  между компонентами энергетического цикла можно записать как

$$\begin{aligned}
 C(K_e, K_m) &= \int_V \rho_0 (\overline{u' \mathbf{u}' \cdot \nabla \bar{u}} + \overline{v' \mathbf{u}' \cdot \nabla \bar{v}}) dV, & C(P_e, P_m) &= \int_V \frac{g}{n_0} \overline{\rho' \mathbf{u}' \cdot \nabla_h \bar{\rho}} dV, \\
 C(P_m, K_m) &= \int_V g \overline{\rho w} dV, & C(P_e, K_e) &= \int_V g \overline{\rho' w'} dV,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\mathbf{u}'$  – горизонтальные компоненты скорости;  $w$  – вертикальная компонента скорости;  $\nabla$  – оператор Гамильтона. Для скорости преобразования действительно, что если  $C(X, Y) > 0$ , то  $X$  трансформируется в  $Y$  и наоборот. Конверсия энергии между  $K_m$  и  $K_e$  обусловлена баротропной неустойчивостью, вызываемой сдвигом скорости, а переход энергии из  $P_m$  через  $P_e$  в  $K_e$  – бароклинной неустойчивостью. Работа силы плавучести описывает трансформацию энергии между  $P_m$  и  $K_m$ .

Генерация энергии  $G$  обеспечивается средней и вихревой частями работы силы ветра и потоками плавучести на поверхности моря для КЭ и ДПЭ соответственно

$$\begin{aligned}
 G(K_m) &= \int_S (\overline{\tau_x u} + \overline{\tau_y v}) dS, & G(K_e) &= \int_S (\overline{\tau_x' u'} + \overline{\tau_y' v'}) dS, \\
 G(P_m) &= \int_S \frac{g}{n_0(z)} \overline{\rho^* Q} dS, & G(P_e) &= \int_S \frac{g}{n_0(z)} \overline{\rho^{* \prime} Q'} dS,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $\tau_x, \tau_y$  – компоненты вектора касательного напряжения трения ветра;  $Q$  – поток плавучести на поверхности;  $\int_S dS$  – интеграл по площади верхнего слоя.

Диссипативные слагаемые  $D$  рассчитываются из уравнений бюджета энергии в предположении, что в среднем за год скорость изменения энергии равна нулю. Отметим, что согласно оценкам слагаемых уравнения скорости изменения КЭ, которое получено как точное следствие дифференциальной постановки задачи (рис. 1 в [7, с. 77]), для климатической циркуляции Черного моря диссипация энергии осуществляется в основном вследствие горизонтального и вертикального внутреннего трения, при этом трение о дно мало. В работе [23] также показано, что учет или неучет трения о дно влияет только на время выхода климатической циркуляции на квазипериодический режим. Поэтому неучет трения о дно, допускаемый в модели МГИ, не приводит к росту кинетической энергии. Условия проведения численных экспериментов таковы, что в среднем за год полная КЭ системы изменяется не более чем на 10 %.

### 3. Результаты

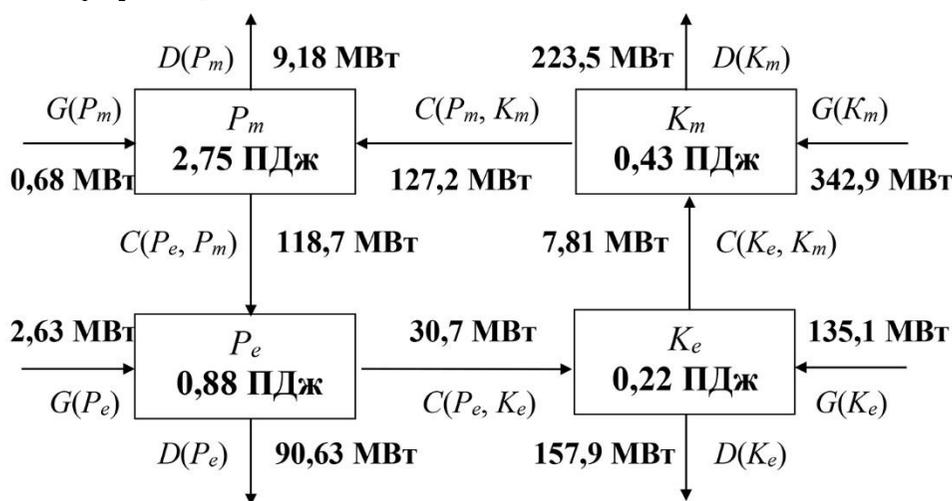
На основе восстановленных полей термогидродинамических характеристик с помощью формул (1)–(3) рассчитаны компоненты энергетического цикла для Черного и Мраморного морей. Предварительные оценки вертикального распределения плотности КЭ и ДПЭ в Черном море показали, что около 80 % средней КЭ и 90 % средней ДПЭ сосредоточены в верхнем 200-метровом слое. Эти данные согласуются с результатами, представленными в работе [18]. Таким образом, в Черном море из верхнего слоя на нижележащие горизонты через вертикальный сдвиг скорости может передаваться не более 20 % КЭ. Значимого потока ДПЭ из верхнего слоя не наблюдается, что связано с ослаблением вертикальных диффузионных процессов и уменьшением потоков плавучести ниже основного пикноклина.

Для Мраморного моря оценки средней КЭ и ДПЭ показали, что плотность КЭ в верхнем 30-метровом слое примерно в 1,5 раза выше, чем в нижележащем (61 и 39 %). Отличие этого соотношения от соотношения для Черного моря можно объяснить наличием в Мраморном море под постоянным пикноклином обратного течения, направленного из Средиземного моря в Черное со скоростью примерно вдвое слабее, чем в верхнем слое. В то же время в Черном море средние скорости с глубиной уменьшаются и под пикноклином их значения на порядок меньше, чем вблизи поверхности. Согласно расчетам плотности средней ДПЭ в Мраморном море, 80 % ДПЭ сосредоточено в верхнем 30-метровом слое. Это объясняется тем, что плотность вод нижнего слоя Мраморного моря обусловлена входящими через пролив Дарданеллы высокосолеными средиземноморскими водами с существенно меньшими вертикальными градиентами.

Таким образом, для обоих морей большая часть как кинетической, так и доступной потенциальной энергии концентрируется именно в верхних слоях, включающих пикноклин.

### Энергетический цикл Лоренца для Черного моря

На рис. 1 показан энергетический цикл Лоренца для климатической циркуляции Черного моря (указаны округленные до сотых значения). Компоненты энергетического цикла представлены для верхнего деятельного слоя 0–200 м, включающего главные особенности термохалинной структуры Черного моря [24]: сезонный термоклин (15–20 м), холодный промежуточный слой (30–100 м) и слой основного галоклина (75–150 м). Как видно из рис. 1, полная КЭ климатической циркуляции на 66 % обеспечивается средним течением и 33 % составляют вихревые движения. При этом основным источником КЭ является работа силы ветра – вклад  $G(K_m)$  наибольший среди всех источников энергии климатической циркуляции. Качественно этот результат соответствует общепринятым представлениям о том, что именно ветровое воздействие формирует крупномасштабную бассейновую циркуляцию в Черном море [25–27].



**Р и с. 1.** Схема энергетического цикла Лоренца для климатической циркуляции в верхнем 200-метровом слое Черного моря

**F i g. 1.** Diagram of the Lorenz energy cycle for climatic circulation in the upper 200-m layer of the Black Sea

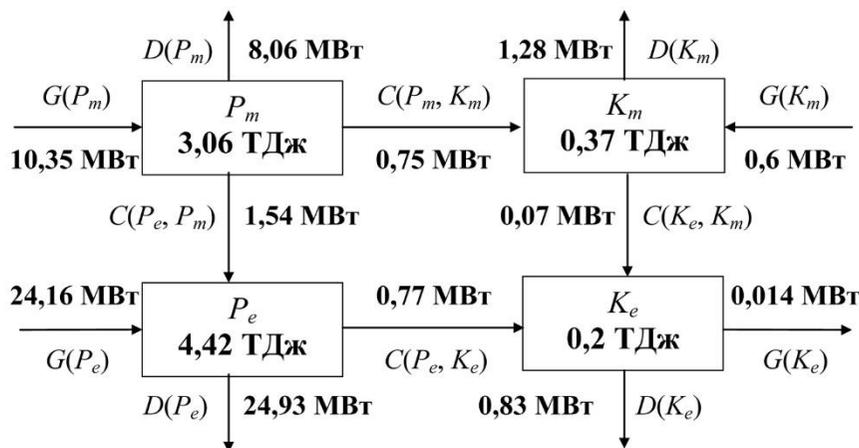
Вихревая КЭ поддерживается двумя источниками – это переменная по времени часть работы силы ветра  $G(K_e)$  и бароклинная неустойчивость  $C(P_e, K_e)$ , однако вклад последней почти в четыре раза меньше вклада от ветра. Поток энергии  $C(K_e, K_m)$ , обусловленный баротропной неустойчивостью, минимален и направлен из вихревого движения в среднее течение. Это указывает на то, что для квазистационарного режима циркуляции эволюция основных мезомасштабных вихрей Черного моря (Севастопольский и Батумский антициклоны) не связана со средней крупномасштабной циркуляцией.

Средняя крупномасштабная циркуляция поддерживает запас средней ДПЭ, что демонстрирует направление потока  $C(P_m, K_m)$ . Основная часть этой энергии трансформируется далее в вихревую ДПЭ. Генерационные и диссипа-

тивные вклады в бюджет изменения  $P_m$  относительно малы. Величина же потока  $D(P_e)$  свидетельствует о том, что почти 74 % поступившей энергии диссипирует вследствие диффузионных процессов. Однако оставшиеся 26 % переходят в вихревую КЭ. Таким образом, для климатической циркуляции в верхнем 200-метровом слое Черного моря процессы бароклинной неустойчивости способствуют трансформации только 26 % имеющейся ДПЭ в КЭ вихревого движения. Если рассмотреть отдельно бюджет  $K_e$ , то, как видно из рис. 1, вертикальная диссипация полностью компенсирует приток энергии от ветра ( $D(K_e) > G(K_e)$ ), следовательно, основную роль в эволюции мезомасштабных вихревых движений играет именно бароклинная неустойчивость.

### Энергетический цикл Лоренца для Мраморного моря

Аналогично исследованию цикла Лоренца в Черном море, для Мраморного был также выбран верхний слой, включающий поверхностные воды с наиболее активной динамикой и слой постоянного пикноклина. Таким образом, в данном бассейне компоненты климатического энергетического цикла рассчитываются до глубины 30 м. Отдельные энергетические характеристики и сезонная циркуляция этого слоя для реальных атмосферных условий 2008 г. исследованы в [11]. Для климатической циркуляции Мраморного моря схема энергетического цикла Лоренца приведена на рис. 2 (значения округлены аналогично рис. 1).



**Р и с. 2.** Схема энергетического цикла Лоренца для климатической циркуляции в верхнем 30-метровом слое Мраморного моря

**F i g. 2.** Diagram of the Lorenz energy cycle for climatic circulation in the upper 30-m layer of the Marmara Sea

Соотношение компонентов энергетического цикла показывает, что вклад КЭ среднего течения в климатическую циркуляцию Мраморного моря составляет примерно 65 % и еще 35 % обеспечивается энергией вихревого движения. В отличие от Черного моря, где основным источником КЭ является ветер, наибольший вклад в генерацию средней КЭ Мраморного моря вносит работа силы плавучести (56 %), превышая влияние ветрового воздействия (44 %).

Вихревая КЭ поддерживается двумя источниками: преобразованием КЭ среднего течения (баротропная неустойчивость) и трансформацией ДПЭ (бароклинная неустойчивость), причём вклад последней доминирует и составляет 91 %. Потоки энергии, пополняющие бюджет вихревой КЭ, почти полностью диссипируют вследствие внутреннего вертикального трения (98 %) и ещё 2 % теряются из-за трения ветра, когда направление пульсаций ветра противоположно направлению пульсаций скорости течения.

Генерационные и диссипативные составляющие бюджета  $P_m$  и  $P_e$  превалируют. Дополнительные оценки слагаемых  $G(P_m)$  и  $G(P_e)$  без учета влияния проливов показали, что в этом случае происходит существенная (примерно на два порядка) недооценка величины притока энергии. Таким образом, основной вклад в генерацию ДПЭ вносят потоки через проливы Босфор и Дарданеллы. Поступающая средняя ДПЭ частично расходуется на работу силы плавучести (7 %), а частично переходит в вихревую ДПЭ вследствие бароклинной неустойчивости (15 %), остальная часть диссипирует. Поток  $C(P_e, P_m)$  является наибольшим по абсолютной величине среди скоростей преобразования энергии на рис. 2. Анализ показывает, что в бюджете вихревой ДПЭ на фоне взаимной компенсации  $G(P_e)$  и  $D(P_e)$  около 50 % потока  $C(P_e, P_m)$  преобразуется в вихревую КЭ.

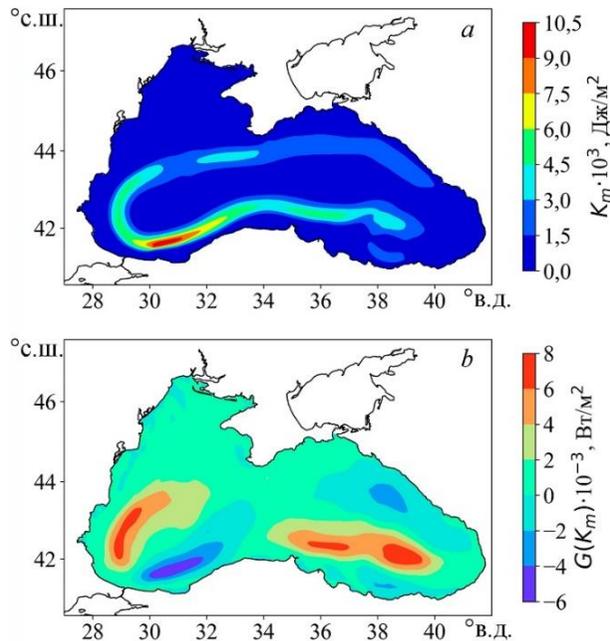
Нужно отметить, что слагаемые бюджетов изменения средней и вихревой ДПЭ по абсолютной величине на порядок больше, чем КЭ, а конверсия энергии из ДПЭ обеспечивает основной приток как в  $K_m$  через работу силы плавучести, так и в  $K_e$  вследствие бароклинной неустойчивости. Таким образом, в верхнем слое Мраморного моря климатическая циркуляция формируется в большей степени путем трансформации ДПЭ, генерируемой потоками через проливы. Потоки плавучести, формируемые термохалинным атмосферным форсингом, мало значимы в энергетическом балансе Мраморного моря. Данное заключение согласуется с результатами работы [28], где показано, что реалистичная циркуляция формируется даже без учета атмосферного форсинга, но при задании потоков через проливы.

#### 4. Обсуждение

Полученные качественные и количественные оценки энергетического цикла Лоренца для климатической циркуляции верхнего деятельного слоя Черного моря с физической точки зрения можно интерпретировать следующим образом. Основным источником энергии Черного моря является ветровое воздействие. Циклоническая завихренность поля ветра формирует крупномасштабный циклонический круговорот. Как видно из рис. 3, зоны экстремальных значений вклада от ветра и КЭ среднего течения совпадают.

Примерно 2/3 поступившей энергии от ветра диссипирует в результате вертикального трения, а оставшаяся часть преобразуется в среднюю ДПЭ. То есть в среднем за год циклоническое вращение вод поддерживает плотностную стратификацию с подъемом более плотных вод в центре моря и опусканием распредельных на периферии бассейна. По сравнению с притоком энергии от среднего течения вклад термохалинного форсинга на поверхности моря в изменчивость ДПЭ незначителен. В результате действия процессов бароклинной неустойчивости около четверти ДПЭ трансформируется в вихревую КЭ.

При этом вследствие взаимной компенсации компонентов, описывающих генерацию и диссипацию вихревой КЭ, изменчивость мезомасштабной циркуляции определяется процессами бароклинной неустойчивости.



**Р и с. 3.** Пространственное распределение кинетической энергии среднего течения (*a*) и вклада работы силы ветра (*b*)

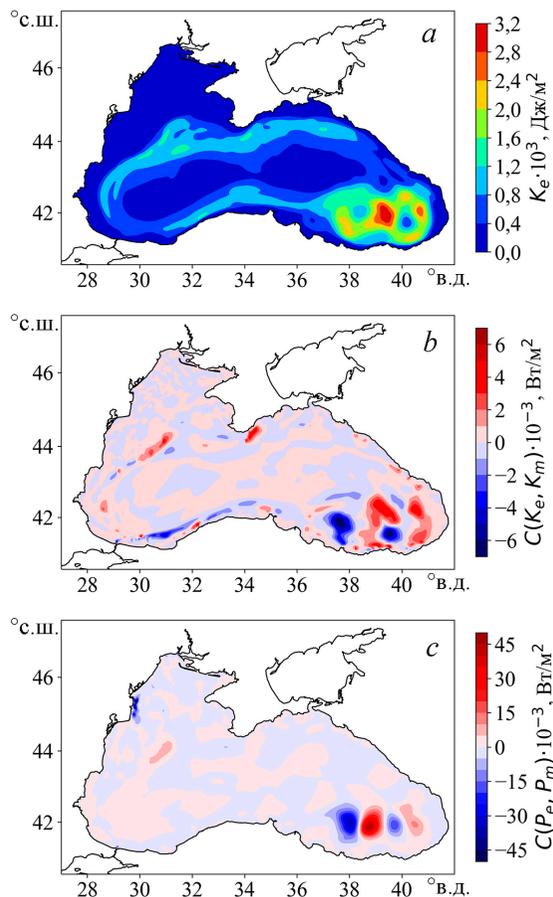
**F i g. 3.** Spatial distribution of the mean current kinetic energy (*a*) and the wind stress work (*b*) contribution

На рис. 4 представлены пространственные распределения проинтегрированных по вертикали величин  $K_e$ ,  $C(K_e, K_m)$  и  $C(P_e, P_m)$ . Как видно, максимальная вихревая КЭ локализована в зоне стационарирования Батумского антициклона (юго-восточный угол моря на рис. 4, *a*). Здесь же наблюдается область наиболее интенсивного энергообмена вследствие процессов баротропной (рис. 4, *b*) и бароклинной (рис. 4, *c*) неустойчивости. При этом экстремальные значения параметра  $C(P_e, P_m)$  примерно в семь раз больше, чем  $C(K_e, K_m)$ .

Как следует из диаграммы на рис. 2, в Мраморном море среднее течение поддерживается вкладами работы силы ветра и силы плавучести. На рис. 5 показаны распределения полей средней ДПЭ, средней работы силы ветра и силы плавучести, проинтегрированные в верхнем 30-метровом слое.

Как видно, повышенные значения  $K_m$  севернее  $40,75^\circ$  с. ш. (рис. 5, *a*) соответствуют зоне положительных значений  $C(P_m, K_m)$  (рис. 5, *c*). В области максимума  $K_m$  к северо-востоку от п-ова Капыдагы (центральная часть южного побережья) наблюдаются повышенные значения  $G(K_m)$  (рис. 5, *b*), которые при этом по абсолютной величине примерно на порядок меньше вклада работы силы плавучести. Рис. 2 и 5 свидетельствуют, что климатическая циркуляция

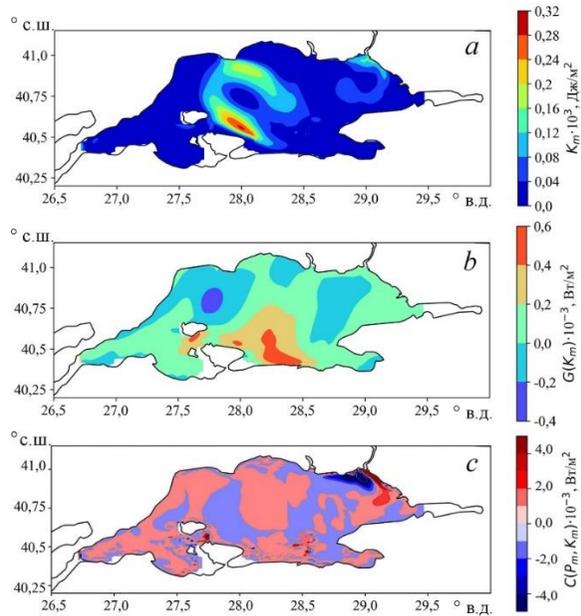
в верхнем слое Мраморного моря в большей степени носит градиентный характер. Интенсивная трансформация ДПЭ не только в районе проливов, но и в центральной части моря, по-видимому, связана с перепадом высоты уровня [29], а также со значительной разницей в солености вод [20, 21] между Черным и Средиземным морями.



**Р и с. 4.** Пространственное распределение вихревой кинетической энергии (а), вкладов баротропной (b) и бароклинной (c) неустойчивости

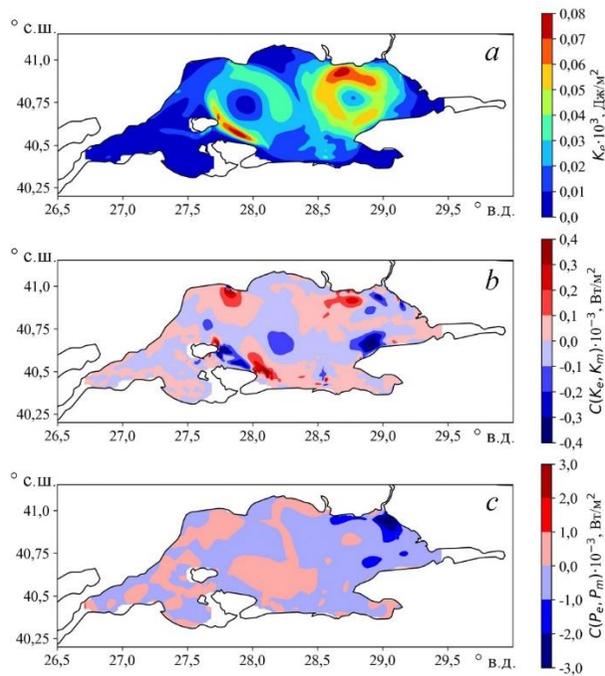
**F i g. 4.** Spatial distribution of the eddy kinetic energy (a), and the barotropic (b) and baroclinic (c) instability contributions

Вихревая КЭ, характеризующая мезомасштабную изменчивость, пополняется вследствие преобразования энергии в результате баротропной и бароклинной неустойчивости. При этом в Мраморном море, так же как и в Черном, трансформация энергии из доступной потенциальной в вихревую кинетическую на порядок превышает приток энергии от среднего течения. На рис. 6 представлены карты проинтегрированных по вертикали  $K_e$ ,  $C(K_e, K_m)$  и  $C(P_e, P_m)$ . На рис. 6, а четко выражены два максимума  $K_e$ : к юго-западу от Босфора и к северо-востоку от п-ова Капыдагы.



**Р и с. 5.** Пространственное распределение кинетической энергии среднего течения (a), вкладов работы силы ветра (b) и работы силы плавучести (c)

**Fig. 5.** Spatial distribution of the mean current kinetic energy (a) and the contributions of wind stress work (b) and buoyancy work (c)



**Р и с. 6.** Пространственное распределение вихревой кинетической энергии (a), вкладов баротропной (b) и бароклинной (c) неустойчивости

**Fig. 6.** Spatial distribution of the eddy kinetic energy (a), and the barotropic (b) and baroclinic (c) instability contributions

Как видно из рис. 6, *c*, вихревая энергия (а следовательно, и мезомасштабная изменчивость) в восточной части моря обусловлена трансформацией ДПЭ ( $C(P_e, P_m) < 0$ ). Вторым максимум  $K_e$  формируется соизмеримыми по величине вкладами  $C(K_e, K_m)$  и  $C(P_e, P_m)$ . Сопоставление рис. 5, *a*, *b*, *a* и *b*, *a* и *b* показывает, что область вблизи п-ова Капыдагы – это зона наиболее интенсивной передачи энергии от среднего течения в вихри.

## 5. Заключение

В работе проведена численная оценка энергетического цикла Лоренца в Черном и Мраморном морях. Реконструкция циркуляции в обоих бассейнах выполнена с высоким пространственным разрешением на основе численной вихреразрешающей модели МГИ. Для выявления общих механизмов изменчивости циркуляции внутренних морей с ограниченным водообменом рассмотрена динамика вод в слое от поверхности до нижней границы основного пикноклина, формируемая в условиях климатического атмосферного форсинга. Физическая интерпретация представленных оценок энергетического цикла согласуется с известными из литературы гидрофизическими особенностями рассматриваемых морей.

Несмотря на геоморфологические различия между бассейнами, в обоих случаях соотношение между средней и вихревой КЭ составляет около 65 и 35 % соответственно от полной КЭ. При этом обнаружены общие черты в механизмах мезомасштабной изменчивости и различия в механизмах изменчивости крупномасштабной циркуляции. Так, основным источником энергии средней циркуляции Черного моря является работа силы ветра, а Мраморного моря – работа силы плавучести. Другими словами, если в Черном море структура среднего течения определяется напрямую внешним (ветровым) воздействием, то в Мраморном море – внутренним перераспределением ДПЭ, поддерживаемой поступлением вод с разными термохалинными характеристиками через проливы. Анализ показал, что в Мраморном море скорость изменения средней ДПЭ, обусловленная водообменом через проливы, на два порядка больше скорости изменения под влиянием атмосферного воздействия.

Скорость изменения вихревой КЭ, характеризующей мезомасштабную изменчивость, для обоих бассейнов определяется бароклиной неустойчивостью. При этом приток энергии в вихри вследствие баротропной неустойчивости на порядок меньше как в Черном, так и в Мраморном море. Отметим, что в результате действия процессов бароклиной неустойчивости в Черном море около четверти ДПЭ трансформируется в вихревую КЭ, а в Мраморном – примерно половина.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stanev E. V., Grashorn S., Zhang Y. J. Cascading ocean basins: numerical simulations of the circulation and interbasin exchange in the Azov-Black-Marmara-Mediterranean Seas system // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 67, iss. 8. P. 1003–1025. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1071-2>
2. Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели / А. И. Мизюк [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 496–510. EDN ХНЗХАР. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-496-510>

3. Система морских ретроспективных расчетов и прогнозов гидрометеорологических характеристик Азовского моря и Керченского пролива / Н. А. Дианский [и др.] // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2020. Т. 2, № 5. С. 131–140. EDN GBWEBF. <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2020-2-5-131-140>
4. Modeling of the Turkish Strait System Using a High Resolution Unstructured Grid Ocean Circulation Model / М. Пикак [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, iss. 7. 769. <https://doi.org/10.3390/jmse9070769>
5. *Cessi P., Pinardi N., Lyubartsev V.* Energetics of Semienclosed Basins with Two-Layer Flows at the Strait // Journal of Physical Oceanography. 2014. Vol. 44, iss. 3. P. 967–979. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0129.1>
6. *Stanev E. V.* On the mechanisms of the Black Sea circulation // Earth-Science Reviews. 1990. Vol. 28, iss. 4. P. 285–319. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(90\)90052-W](https://doi.org/10.1016/0012-8252(90)90052-W)
7. *Демьяшев С. Г.* Энергетика климатической циркуляции Черного моря. Ч. I. Дискретные уравнения скорости изменения кинетической и потенциальной энергий // Метеорология и гидрология. 2004. № 9. С. 65–80. EDN PGCNXF.
8. *Павлушин А. А., Шапиро Н. Б., Михайлова Э. Н.* Энергетические переходы в двухслойной вихреразрезающей модели Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 3. С. 201–219. EDN JMCPNB. doi:10.22449/0233-7584-2019-3-201-219
9. *Пузина О. С., Кубряков А. А., Мизюк А. И.* Сезонная и вертикальная изменчивость энергии течений в суббездомасштабном диапазоне на шельфе и в центральной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 1. С. 41–56. EDN COENRO. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-1-41-56>
10. Circulation of the Turkish Straits System between 2008-2013 under complete atmospheric forcings / А. Aydogdu [et al.] // Ocean Science. 2018. Vol. 14, iss. 5. P. 999–1019. <https://doi.org/10.5194/os-14-999-2018>
11. *Демьяшев С. Г., Довгая С. В.* Анализ сезонных энергетических характеристик динамики верхнего слоя вод Мраморного моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 5. С. 509–524. EDN MBKNOV. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-5-509-524>
12. *Демьяшев С. Г.* Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 137–149. EDN OOWHLL.
13. *Pacanowski R. C., Philander S. G. H.* Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // Journal of Physical Oceanography. 1981. Vol. 11, iss. 11. P. 1443–1451. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<1443:POVMIN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<1443:POVMIN>2.0.CO;2)
14. Оценки параметров краевых внутренних волн в Черном море / В. М. Грузинов [и др.] // Труды Государственного океанографического института. 2018. Вып. 219. С. 205–226. EDN XSEMDZ.
15. *Ефимов В. В., Тимофеев Н. А.* Теплобалансовые исследования Черного и Азовского морей. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 1990. 236 с.
16. *Staneva J. V., Stanev E. V.* Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black Sea // Oceanologica Acta. 1998. Vol. 21, iss. 3. P. 393–417. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(98\)80026-1](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(98)80026-1)
17. *Дорофеев В. Л., Коротаев Г. К.* Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрезающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 1. С. 52–68. EDN YXQYNN.
18. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. СПб. : Гидрометеоздат, 1991. 428 с.

19. Демьшев С. Г., Иванов В. А., Маркова Н. В. Анализ климатических полей Черного моря ниже основного пикноклина, полученных на основе усвоения архивных данных по температуре и солёности в численной гидродинамической модели // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 1. С. 3–15. EDN VOAIVZ.
20. The circulation and hydrography of the Marmara Sea / S. T. Besiktepe [et al.] // Progress in Oceanography. 1994. Vol. 34, iss. 4. P. 285–334. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90018-3)
21. Запезалов А. С. Сезонная изменчивость вертикальных распределений температуры и солёности в Мраморном море // Метеорология и гидрология. 2005. № 2. С. 78–84. EDN KUHKB.
22. Lorenz E. N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation // Tellus. 1955. Vol. 7, iss. 2. P. 157–167. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v7i2.8796>
23. Пузина О. С., Мизюк А. И. Исследование влияния придонного трения на крупномасштабную циркуляцию Черного моря на основе численного моделирования // Комплексные исследования Мирового океана : Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. Севастополь : ФГБУН МГИ, 2019. С. 145–146. EDN YKWNFQ.
24. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с.
25. Oguz T., Malanotte-Rizzoli P., Aubrey D. Wind and thermohaline circulation of the Black Sea driven by yearly mean climatological forcing // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1995. Vol. 100, iss. C4. P. 6845–6863. <https://doi.org/10.1029/95JC00022>
26. Effect of bottom slope and wind on the near-shore current in a rotating stratified fluid: laboratory modeling for the Black Sea / A. G. Zatsepin [et al.] // Oceanology. 2005. Vol. 45, suppl. 1. P. S13–S26. EDN LJLSWD.
27. Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem / A. A. Kubryakov [et al.] // Journal of Marine Systems. 2016. Vol. 163. P. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.06.006>
28. Sannino G., Sözer A., Özsoy E. A high-resolution modelling study of the Turkish Straits System // Ocean Dynamics. 2017. Vol. 67, iss. 3–4. P. 397–432. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1039-2>
29. Alpar D., Yuçe H. Sea-level variations and their interactions between the Black Sea and the Aegean Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 1998. Vol. 46, iss. 5. P. 609–619. <https://doi.org/10.1006/ecss.1997.0285>

*Об авторах:*

**Демьшев Сергей Германович**, заведующий отделом теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 1848-2350, ORCID ID: 0000-0002-5405-2282, ResearcherID: C-1729-2016, Scopus Author ID: 57862712800**, demyshev@gmail.com

**Дымова Ольга Алексеевна**, старший 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**, olgdymova@mhi-ras.ru

**Маркова Наталья Владимировна**, старший научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 3625-6866, ORCID ID: 0000-0002-7123-6657, ResearcherID: Q-2638-2017, Scopus Author ID: 57198013260**, n.v.markova@mail.ru