

## Оценка точности результатов моделирования циркуляции Черного моря при использовании различных данных о топографии дна

О. А. Дымова\*, Н. А. Миклашевская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*E-mail: [olgadym@yahoo.com](mailto:olgadym@yahoo.com)

Поступила в редакцию 15.01.2019 г., после доработки – 08.02.2019 г.

*Цель.* Проведена оценка точности реконструированных гидрофизических полей, рассчитанных при различных данных о топографии дна, с целью определения массива глубин, соответствующего задачам моделирования циркуляции Черного моря с высоким пространственным разрешением.

*Методы и результаты.* С помощью модели Морского гидрофизического института (МГИ) Российской академии наук выполнены два численных эксперимента по моделированию циркуляции с пространственным разрешением 1,6 км по горизонтали, по вертикали заданы 27 неравномерных  $z$ -горизонтов. Атмосферный форсинг задавался по данным *SKIRON/Eta* за 2011 г. Отличие между экспериментами заключалось в применении различных данных по батиметрии. Топография дна в первом эксперименте задавалась в соответствии с глубинами из банка океанографических данных МГИ с 5-минутным разрешением, во втором эксперименте – на основе массива глубин Европейской сети морских наблюдений и данных *EMODnet* с разрешением 1/8'. Рассчитанные гидрофизические поля сопоставлены с измерениями температуры, солености и спутниковыми изображениями температуры поверхности моря. Показано, что использование батиметрических данных более высокого разрешения позволяет улучшить точность воспроизведения термогидродинамических характеристик циркуляции Черного моря в слое 30–300 м. Рассмотрены интегральные величины потоков вихревой кинетической энергии и кинетической энергии среднего течения для двух экспериментов. Получено, что при учете рельефа дна с более высоким разрешением в моделируемой системе изменились механизмы перераспределения энергии между течениями и вихрями во время интенсивных штормовых воздействий.

*Выводы.* По результатам проведенного исследования можно заключить, что в эксперименте с более гладким рельефом дна увеличение кинетической энергии вихрей и течений было обусловлено баротропной неустойчивостью. При сложной изрезанной батиметрии вихревая кинетическая энергия увеличивалась преимущественно за счет процессов, связанных с бароклинной неустойчивостью.

**Ключевые слова:** Черное море, моделирование, батиметрия, *EMODnet*, данные наблюдений, течения, вихри, кинетическая энергия.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и комментарии. Эксперимент 1 и сравнительный анализ результатов выполнены в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0003 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования». Адаптация данных *EMODnet* для модели МГИ и эксперимент 2 проведены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-05-000353 А).

**Для цитирования:** Дымова О. А., Миклашевская Н. А. Оценка точности результатов моделирования циркуляции Черного моря при использовании различных данных о топографии дна // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 4. С. 341–354. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-341-354

© Дымова О. А., Миклашевская Н. А., 2019

# Accuracy Estimation of the Black Sea Circulation Modeling Results Obtained at Different Bottom Topography

O. A. Dymova\*, N. A. Miklashevskaya

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

*\*e-mail: olgadym@yahoo.com*

*Purpose.* Accuracy of the reconstructed hydrophysical fields calculated using different data on bottom topography is estimated in order to determine the depth array corresponding to the modern tasks of the Black Sea circulation modeling with high spatial resolution.

*Methods and Results.* Two numerical experiments on modeling the circulation were carried out based on the Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences (MHI RAN) ocean model. Horizontal resolution was 1.6 km, 27 irregular  $z$ -horizons were preset vertically and the *SKIRON/Eta* data (2011) were used as the atmospheric forcing for both cases. Difference between the experiments consisted in application of different bathymetry. In the first experiment, the bottom topography was preset in accordance with the Black Sea depths from the MHI Ocean Data Bank with the 5-minute resolution; in the second one – based on the European Marine Observation and Data Network (*EMODnet*) depth array with the 1/8' resolution. The calculated hydrophysical fields were compared with the temperature and salinity measurements, and satellite images of the sea surface temperature. The analysis showed that application of the depths data of higher resolution permitted to improve accuracy of thermohydrodynamic characteristics of the Black Sea circulation in the 30–300 m layer. The integral values of the eddy kinetic energy and the mean current kinetic energy for two experiments were also considered for both of the experiments. The results of the comparative analysis demonstrate the fact that, at the bottom topography with higher resolution taken into account, in the simulated system the mechanisms of energy redistribution between currents and eddies changed during intensive storm impacts.

*Conclusions.* The results of the present research permit to conclude that in the experiment with a smoother bottom relief, increase of kinetic energy both of the eddies and currents was due to barotropic instability. In case of more complex bathymetry, the eddy kinetic energy increased mainly owing to the processes associated with baroclinic instability.

**Keywords:** Black Sea, modeling, bathymetry, *EMODnet*, in situ data, current, eddy, kinetic energy.

**Acknowledgements:** The authors are grateful to the reviewers for their helpful comments. Experiment 1 and comparative analyses were performed in the framework of the state task № 0827-2018-0003 “Fundamental study of oceanological processes conditioning state and evolution of marine environment under affect of anthropogenic factors based on observational and modeling methods”. The *EMODnet* data adaptation for the MHI-model and experiment 2 were carried out under support of the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-05-00353 A).

**For citation:** Dymova, O.A. and Miklashevskaya, N.A., 2019. Accuracy estimation of the Black Sea circulation modeling results obtained at different bottom topography. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(4), pp. 304-315. doi:10.22449/1573-160X-2019-4-304-315

## Введение

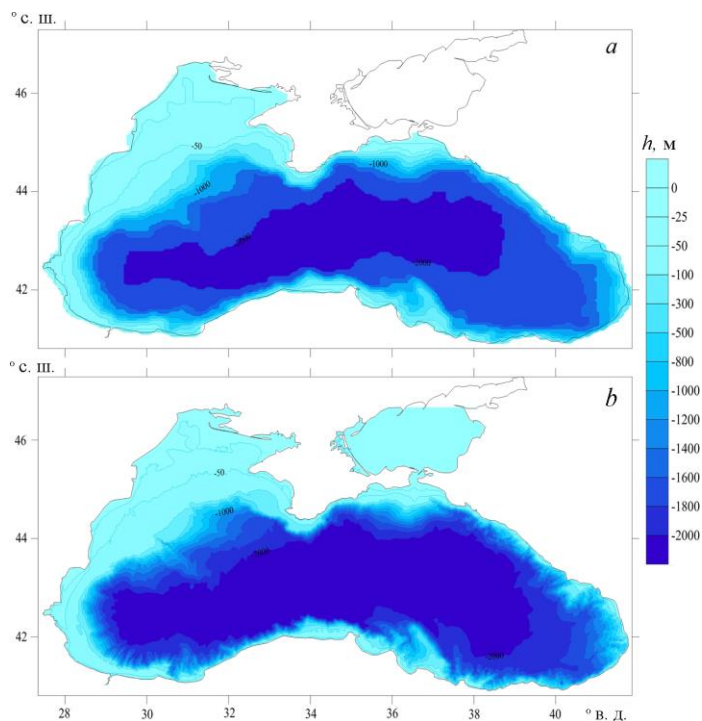
Реконструкция реальной картины физических, биологических, химических и других процессов, протекающих в прибрежных зонах морских акваторий, является актуальной задачей современной океанологии. Многочисленные системы наблюдений, анализа и прогноза изменений морской среды развернуты в окрестностях берегов морей и океанов с целью обеспечить как сохранение ресурсного потенциала гидросферы, так и защиту объектов народного хозяйства от разрушительных последствий природных явлений, возникающих в океане. Одним из основных способов получения информации о прошлом, нынешнем и возможном будущем состоянии водных систем является численное моделирование. При этом качество диагноза и прогноза за-

висит от правильного учета многочисленных факторов, среди которых важную роль играют входные данные, описывающие атмосферное воздействие, стоки рек, батиметрию, орографию береговой черты. Характерной особенностью рельефа дна Черного моря является узость шельфа и крутой континентальный склон (уклон достигает  $20\text{--}30^\circ$ ) в северо-восточной и южной частях моря. Черное море – один из немногих бассейнов с таким отвесным свалом глубин, поэтому топография дна имеет существенное значение для моделирования динамики. Данная работа посвящена анализу влияния особенностей топографии дна на структуру циркуляции Черного моря.

В последние десятилетия в Морском гидрофизическом институте (МГИ) РАН активно ведутся работы по численному моделированию термогидродинамического режима Черного моря [1, 2] на основе модели МГИ [3], где используется батиметрия бассейна, взятая из банка океанографических данных МГИ (БОД МГИ) [4]. Изначально этот массив глубин строился для проведения расчетов циркуляции с пространственным разрешением около 15 км [5]. В дальнейшем с увеличением разрешающей способности модели МГИ [1, 6] проводилась интерполяция массива на более мелкую сетку. При таком подходе в узлах сетки, близких к берегу, не учитываются важные особенности прибрежных зон, что вносит здесь неточность в результаты моделирования [7]. Поэтому актуальной задачей представляется уточнение данных о глубинах моря для более точного описания гидрофизических полей.

В качестве альтернативного варианта нами выбрана батиметрия Черного моря, свободно предоставляемая Европейской сетью морских наблюдений и данных *EMODnet* (<http://portal.emodnet-bathymetry.eu/>). Этот массив имеет разрешение  $1/8'$  (около 200 м) и построен на основе цифровой модели рельефа, которая генерируется из батиметрических съемок, спутниковой информации и данных *GEBCO*. На сегодняшний день это максимальное разрешение по пространству для данных, покрывающих все море, которые имеются в открытом доступе. В [8] показано, что продукт имеет высокую степень показателя целесообразности (более 70%) и рекомендован к использованию. На рис. 1 представлены карты глубин ( $h$ ), построенные по данным БОД МГИ и *EMODnet*. Видно, что данные *EMODnet* воспроизводят такие характерные черты дна моря, как палеоруло реки Дунай, неоднородности рельефа в западном и восточном углах моря, тонкие черты свала глубин в районе северо-западного шельфа и побережья Кавказа. Зона моря, оконтуренная изолинией 2000 м, на рис. 1,  $b$  занимает бóльшую площадь, чем на рис. 1,  $a$ . Также заметно более высокое соответствие изолиний глубины и береговой черты около восточной и западной границ бассейна. Визуальный анализ показал, что изменение глубины на карте, построенной по материалам *EMODnet*, соответствует официальным данным батиметрических карт, утвержденных Федеральным агентством геодезии и картографии России [9].

В работе проведены расчеты по моделированию циркуляции Черного моря с батиметрией, полученной из БОД МГИ и *EMODnet*. Результаты сопоставлены с данными контактных и спутниковых наблюдений. По итогам численных экспериментов выполнены оценки изменения со временем величин кинетической энергии вихрей и течений в зависимости от используемого массива глубин.



**Р и с. 1.** Карты глубин Черного моря, построенные по данным БОД МГИ (a) и *EMODnet* (b)  
**F i g. 1.** Charts of the Black Sea depths constructed based on the MHI Ocean Data Bank (a) and *EMODnet* (b)

### Постановка задачи

Численное моделирование проводилось с использованием вихререзрешающей энергосбалансированной модели МГИ [3]. Модель построена на основе примитивных уравнений термогидродинамики океана, записанных в декартовой системе координат, в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды. Сжимаемостью, а следовательно, зависимостью плотности от давления, мы пренебрегаем, так как глубина в Черном море существенно меньше, чем в океане.

В модели МГИ плотность нелинейно зависит только от температуры и солёности и рассчитывается по формуле О. И. Мамаева [10]. Поле уровня вычислялось с использованием линейризованного кинематического условия на поверхности, что позволяет исследовать быстрые нестационарные процессы, имеющие важное значение в прибрежных зонах [11]. Потoki тепла, осадки, испарение и касательные напряжения трения ветра задавались как граничные условия на поверхности моря. Также в модель включено усвоение температуры поверхности моря (ТПМ). Процедура усвоения заключалась в расчете невязки температуры, с помощью которой затем корректировалась модельная температура. Далее для того чтобы отфильтровать мелкомасштабные возмущения, решалось уравнение диффузии для скорректированной температуры на поверхности. Подробно процедура усвоения, вид уравнений и граничных условий к ним представлены в работе [3]. Коррекция расчетных

температуры и солености по глубине с использованием климатических профилей не проводилась. Вертикальное турбулентное перемешивание параметризовано с помощью модели турбулентного замыкания Меллора – Ямады [12]. Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии постоянны. На дне ставились условия непротекания и отсутствия потоков тепла и соли, трение о дно не учитывалось. На твердых боковых участках границы выполнялись условия скольжения и непротекания, для температуры и солености задавалось равенство нулю нормальных производных. Температура, соленость и скорость течений в устьях рек и проливах соответствовали климатическим данным [13]. В начальный момент времени задавались возвышение уровня, температура, соленость и горизонтальные скорости течений. Модель МГИ реализована на сетке  $C$  [14] с шагом по пространственным координатам 1,6 км. По вертикали выбраны 27 неравномерных  $z$ -горизонтов. Ось  $x$  направлена на восток, ось  $y$  – на север, ось  $z$  – вертикально вниз. Обычно в океанических моделях в качестве прогностической переменной используется потенциальная температура. Так как глубина в Черном море около двух километров, то практически не имеет значения, берется ли в качестве аргумента потенциальная температура или температура *in situ* (ошибка не превышает  $0,001^\circ\text{C}$  [10]). В модели МГИ адиабатическая поправка не учитывается, и далее под термином «температура» мы подразумеваем температуру *in situ*. Полное описание уравнений модели и граничных условий сделано в работе [3].

Проведено два численных эксперимента. В эксперименте 1 массив глубин взят из БОД МГИ. Эксперимент 2 выполнен с использованием данных *EMODnet*, при построении нового массива глубин применялись сглаживающие фильтры. Атмосферный форсинг в двух экспериментах задавался по полям, полученным по данным модели *SKIRON/Eta* (<http://forecast.uoa.gr/forecastnewinfo.php>) на 2011 г. с горизонтальным разрешением  $1/10^\circ$  по широте и долготе. Температура поверхности моря также взята по данным *SKIRON/Eta*. В качестве начальных полей использованы уровень, трехмерные температура, соленость и горизонтальные скорости течений на 1 января климатического года, полученные по данным климатического расчета по модели МГИ на 5-километровой сетке с топографией дна из БОД МГИ [15]. Перед проведением расчетов массивы глубин и граничные поля были линейно интерполированы в узлы модельной сетки. Изначально массивы глубин разные, поэтому количество боксов, заполненных жидкостью, в экспериментах неодинаково. Ранее увеличение пространственного разрешения модели МГИ было реализовано внутри старой расчетной области (идентичной бассейну в работе [15]), поэтому начальное поле для эксперимента 1 строилось путем линейной интерполяции климатических полей в узлы новой сетки. Далее это поле проверялось на соответствие батиметрии *EMODnet*: при отсутствии гидродинамических данных в ячейке поля экстраполировались по горизонтали от ближайших ненулевых значений, при выходе на сушу или материковый склон ячейки маркировались как суша/дно. Новый массив был сглажен, проверен на соответствие граничным условиям и затем использовался как начальное поле для эксперимента 2.

Для согласования начальных и атмосферных полей в каждом эксперименте выполнена процедура быстрого квазигеострофического приспособления, когда в течение первых четырех суток интегрировались уравнения моде-

ли при фиксированном атмосферном воздействии, которое соответствовало 1 января 2011 г. Полученные массивы термогидродинамических характеристик использованы как стартовые точки. Оба эксперимента выполнены сроком на один год. Поля уровня моря, температуры, солёности и компонентов скорости осреднялись за одни сутки, и эти массивы записывались как выходные данные на каждые сутки.

### Сопоставление с данными наблюдений

Для оценки точности результатов моделирования выполнено сравнение гидрофизических полей с данными доступных контактных наблюдений в соответствии с четвертым классом диагностик *MERSEA* [16]. Модельные температура и солёность были сопоставлены с измерениями трех буев *Argo* (1901200, 6900803, 7900466), которые проводили профилирование до глубин 1500 м (<http://usgoda.org/argo/argo.html>). Рассмотрено 192 профиля. Для каждого профиля данные *Argo* и моделирования сведены к 6 характерным слоям на глубинах, соответствующих вертикальным уровням модели, и рассчитаны невязки между измеренными и модельными значениями в определенной точке. Далее по всем профилям найдены среднеквадратические отклонения (СКО) невязок температуры и солёности на характерных горизонтах. Результаты, полученные в первом и втором экспериментах, представлены в таблице. Здесь и далее нижние индексы 1 и 2 соответствуют номеру эксперимента. Для обоих расчетов максимальные значения СКО невязок выявлены в слое 5–30 м для температуры и в слое 30–100 м – для солёности. При этом видно, что максимальные значения СКО<sub>2</sub> невязок как температуры, так и солёности в этих слоях уменьшаются, однако наблюдается увеличение СКО<sub>2</sub> невязок температуры в слое 0–5 м и солёности в слое 5–30 м. На горизонтах 100–300 м для невязок температуры и солёности СКО<sub>2</sub> меньше, чем СКО<sub>1</sub>. Ниже 300 м данные экспериментов 1 и 2 мало отличаются друг от друга: в слое 300–800 м СКО<sub>2</sub> невязок обоих параметров незначительно возрастает, в слое 800–1500 м – уменьшается.

### Среднеквадратические отклонения невязок между измеренными и рассчитанными в экспериментах 1 и 2 температурой и солёностью Root-mean-square deviations between the measured and calculated temperature and salinity in experiments 1 and 2

Глубина, м / Depth, m	Температура / Temperature		Солёность / Salinity	
	СКО <sub>1</sub> / RMS <sub>1</sub>	СКО <sub>2</sub> / RMS <sub>2</sub>	СКО <sub>1</sub> / RMS <sub>1</sub>	СКО <sub>2</sub> / RMS <sub>2</sub>
0–5	0,182	0,239	0,054	0,050
5–30	0,673	0,507	0,035	0,043
30–100	0,212	0,203	0,481	0,424
100–300	0,049	0,035	0,111	0,058
300–800	0,004	0,006	0,041	0,048
800–1500	0,011	0,003	0,011	0,0005

### Анализ полей скорости течений

Сопоставление результатов двух численных экспериментов выявило следующие различия между ними. В расчете с топографическими данными более высокого разрешения снизилась скорость Основного Черноморского течения (ОЧТ). Если при использовании массива глубин БОД МГИ средняя скорость составляла 30–50 см/с, то при использовании данных *EMODnet* она изменялась в диапазоне 15–35 см/с. Кроме того, по результатам эксперимента 2, в летний период усилилось меандрирование ОЧТ в районах формирования Севастопольского и Батумского антициклонов, а также у Кавказского побережья. В эксперименте 2 в районе Крымского и Анатолийского побережий наблюдалось образование большего количества мезомасштабных вихрей, чем в эксперименте 1.

Существенно отличалась картина поверхностных течений в обоих экспериментах на этапе формирования Батумского антициклона. В эксперименте 1 в конце марта – начале апреля в районе 40° в. д. наблюдалась цепочка из двух антициклонов, которые к концу апреля усилились и слились в один. В конце мая к юго-западу от антициклонического круговорота образовался циклонический вихрь. К началу июня он увеличился в размерах и просуществовал до начала июля. В эксперименте 2 вследствие меандрирования ОЧТ в абиссальной зоне юго-восточной части моря сформировался вихревой диполь, из которого потом возник Батумский антициклон в результате усиления антициклонической части диполя за счет мезомасштабных вихрей Анатолийского побережья и затухания циклонической части диполя. В эксперименте 2 образование прибрежного циклона к юго-западу от Батумского вихря не зафиксировано.

В эксперименте 1 в конце июня к северу от Батумского антициклона (внутри ОЧТ) начал формироваться циклонический круговорот. В эксперименте 2 такой вихрь образовался на месяц позже, в конце июля. В эксперименте 1 к концу сентября циклон значительно превосходил антициклон в размерах, но скорость в нем была меньше, чем в антициклоне: 5–20 см/с против 30–50 см/с в антициклоне. В эксперименте 2 циклон также интенсифицировался, но его размеры не превышали диаметр антициклона: в зональном направлении он был значительно уже антициклона. В обоих экспериментах Батумский антициклон усиливался за счет мезомасштабных вихрей, которые формировались в восточной части Анатолийского побережья. Однако в эксперименте 2 фаза слияния мезомасштабных вихрей с Батумским антициклоном была смещена во времени примерно на месяц. Фаза диссипации антициклона в эксперименте 2 также наблюдалась на месяц позже, в конце ноября.

Для Севастопольского антициклона выявлено различие в фазах эволюции вихря в двух экспериментах. Общее количество вихрей, наблюдаемых в районе Севастопольского антициклона в эксперименте 1, больше, чем в этой же зоне по данным эксперимента 2. До конца марта поля течений по результатам обоих расчетов качественно близки. Начиная с середины апреля в эксперименте 2 время жизни Севастопольского антициклона увеличилось по сравнению с вихрями из эксперимента 1. Так, в эксперименте 1 антициклонические вихри, возникающие в районе Крымского п-ова и перемещающиеся вдоль периферии ОЧТ на юго-запад, диссипировали в районе Босфора через 3–4 мес. А в эксперименте 2 последовательно (с разницей почти в 4 мес) форм-

мировались только два круговорота. Первый, возникший в апреле, переносился со струей ОЧТ до западной части Анатолийского побережья и наблюдался до конца расчетного периода. Второй вихрь сформировался в конце августа и также существовал до конца расчетного периода. Отметим, что скорость перемещения обоих круговоротов вниз по течению замедлилась по сравнению с результатами эксперимента 1.

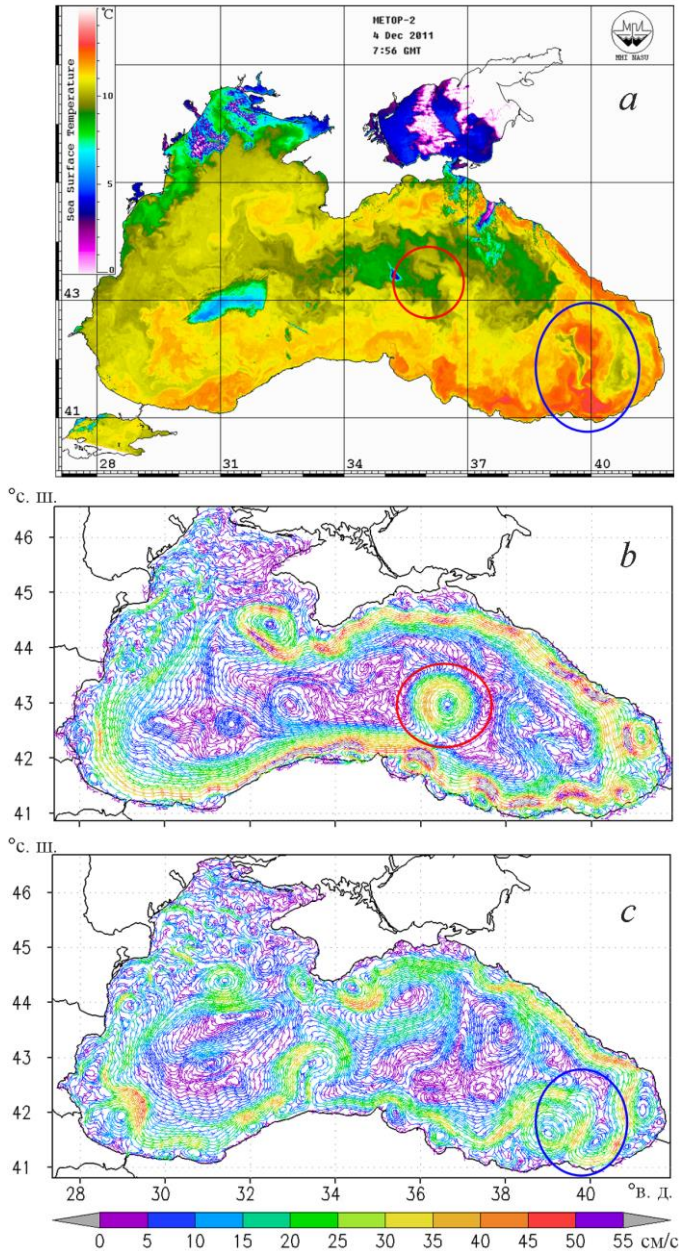
В эксперименте с данными по батиметрии БОД МГИ получено, что в результате меандрирования ОЧТ в начале апреля в восточной части моря сформировался долгоживущий антициклонический круговорот диаметром ~100 км с характерной скоростью 10–25 см/с. Его центр находился в районе 42,5° с. ш., 38,5° в. д. К концу ноября антициклон сместился в северо-западном направлении и его центр фиксировался уже в районе 43° с. ш., 36,5° в. д., при этом скорость увеличилась до 30–40 см/с. Указанный вихрь отчетливо прослеживался от поверхности до горизонта 400 м. В нижних слоях скорость уменьшилась до 3–7 см/с. В эксперименте 2 этот антициклон не воспроизводился.

В эксперименте 2 (*EMODnet*) наблюдалось несколько значительных антициклонических круговоротов, которые отсутствовали в результатах эксперимента 1. Так, с конца апреля в районе Сухума образовался небольшой вихрь антициклонического знака завихренности (Сухумский антициклон) со скоростью 30–35 см/с. К началу июля он сместился на полградуса на север по направлению движения ОЧТ, при этом заметно увеличился в размерах, достигая в диаметре ~100 км. В то же время скорость в антициклоне уменьшилась до 15–20 см/с. С середины августа этот круговорот постепенно затухал до полного исчезновения в конце октября. Сухумский антициклон проявлялся до глубины 300 м. Здесь его скорость не превышала 2–6 см/с.

В начале мая в районе Керченского п-ова также возник антициклонический вихрь со скоростью 15–20 см/с. К середине июня он переместился вдоль Южного берега Крыма на запад до самой южной оконечности Крымского п-ова (м. Сарыч), увеличиваясь в диаметре примерно до 60 км и смещая стрежень ОЧТ мористее. В начале июля антициклон вновь уменьшился и к концу месяца диссипировал. Его можно было проследить до глубины 400 м, где скорость не превышала 5–6 см/с. В эксперименте 1 подобное образование не выявлено.

Карты полей реконструированных течений на горизонте 5 м были сопоставлены с изображениями ТПМ, полученными со спутника *MetOp-2*. Пример такого сравнения для зимнего сезона представлен на рис. 2. Картографический анализ полей скорости течений и спутниковых снимков ТПМ показал, что более точно циркуляция в Черном море была воспроизведена в эксперименте 2. Так, на спутниковых снимках (рис. 2, *a*) не наблюдалась зона повышенной температуры (она характеризует антициклоническое вращение вод) в том месте в восточной части моря, где в эксперименте 1 (красная кривая на рис. 2, *b*) расположен интенсивный антициклон, который отсутствовал в данных эксперимента 2. Батумский антициклон в зимний период воспроизводился точнее в эксперименте 2, что демонстрирует зона, оконтуренная синей кривой на рис. 2, *a, c*, при этом в эксперименте 1 зимой он практически отсутствовал (рис. 2, *b*).





**Р и с. 2.** Поля ТПМ по данным спутника *MetOp-2* ([http://dvs.net.ru/mp/data/201112bs\\_sst\\_ru.shtml](http://dvs.net.ru/mp/data/201112bs_sst_ru.shtml)) (*a*) и скоростей течений на горизонте 5 м по результатам экспериментов *1* (*b*) и *2* (*c*) на 04.12.2011 г.  
**F i g. 2.** SST fields based on the *MetOp-2* satellite data ([http://dvs.net.ru/mp/data/201112bs\\_sst\\_ru.shtml](http://dvs.net.ru/mp/data/201112bs_sst_ru.shtml)) (*a*) and the current velocities at the 5 m horizon based on experiments *1* (*b*) and *2* (*c*) results on 04.12.2011

Согласно спутниковым данным, Батумский антициклон состоял из трех вихрей различного знака завихренности. При этом по результатам эксперимента *1* наблюдалось два вихря – антициклонический и циклонический, тогда

как по данным эксперимента 2 антициклоническое вращение вод охватывало всю юго-восточную часть. Однако следует отметить, что локализация самого Батумского антициклона и ориентация главных осей эллипса вращения вод в эксперименте 2 в большей степени ближе к изображениям со спутниковых снимков, чем в эксперименте 1. Структура Севастопольского антициклона соответствовала спутниковым наблюдениям по результатам обоих расчетов.

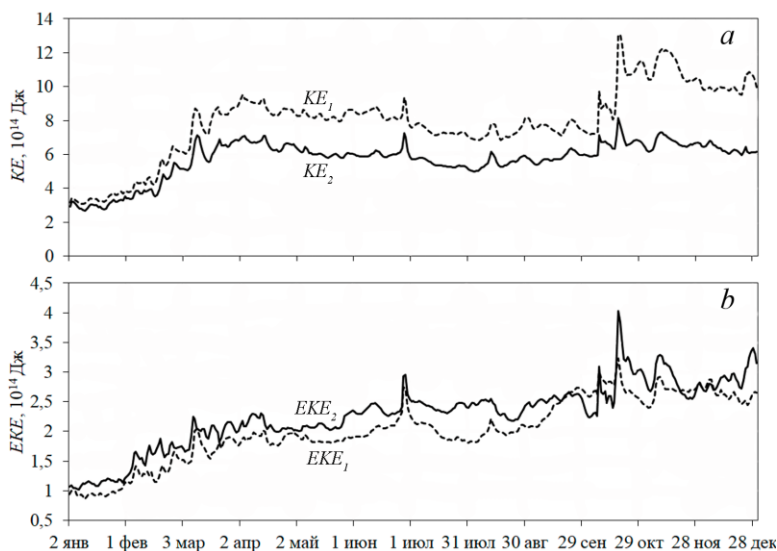
### Оценка энергетических параметров

Как было показано выше, при использовании данных о батиметрии Черного моря более высокого разрешения качественно изменилась картина циркуляции на масштабах 10–100 км, что соответствует мезомасштабным процессам по классификации [17]. Рассмотрим, как при этом изменяется энергия течений и вихрей в бассейне. Далее в тексте для обозначения видов энергии будут использоваться общепринятые англоязычные аббревиатуры.

Бассейновую циркуляцию в Черном море связывают с кинетической энергией среднего течения (*МКЕ*), а мезомасштабную изменчивость – с вихревой кинетической энергией (*ЕКЕ*). Из указанных компонентов складывается общая кинетическая энергия (*КЕ*), которую также можно рассчитать по формуле  $E = (u^2 + v^2)/\rho_0$ . Имея поля температуры, солёности, зональную и меридиональную компоненты скорости на каждые сутки, мы рассчитали их средние за год, а также пульсации (отклонения от среднего на каждые сутки года) полей скорости и плотности. На основе полученных данных для количественных оценок изменения энергетики Черного моря со временем была вычислена проинтегрированная по объёму величина *ЕКЕ* по формуле (4) из работы [18]. Также мы рассмотрели, как менялся со временем объёмный интеграл общей *КЕ*.

Источниками *ЕКЕ* являются пульсации касательных напряжений трения ветра, переход кинетической энергии от среднего течения за счет сдвига скорости и переход потенциальной энергии за счет доступной потенциальной энергии (*ЕРЕ*). В соответствии с [18] обозначим скорость преобразования между *ЕКЕ* и *МКЕ* как  $S(ЕКЕ, МКЕ)$ , между *ЕКЕ* и *ЕРЕ* – как  $S(ЕРЕ, ЕКЕ)$ . Трансформация энергии из *МКЕ* в *ЕКЕ* обусловлена процессами баротропной неустойчивости, а переход энергии из *ЕРЕ* в *ЕКЕ* – процессами бароклинной неустойчивости. Проинтегрированные по объёму величины  $S(ЕКЕ, МКЕ)$  и  $S(ЕРЕ, ЕКЕ)$  рассчитаны по формулам (15), (17) из работы [18].

На рис. 3 показано изменение со временем величин объёмных интегралов *КЕ* и *ЕКЕ* для двух экспериментов. Сопоставление кривых на рис. 3, а показало, что  $КЕ_1$  в течение всего времени интегрирования превышала  $КЕ_2$ . Видно, что кривые качественно похожи и близки по величине в зимние месяцы, затем начиная с весны разница между  $КЕ_1$  и  $КЕ_2$  возрастает, а наибольшие отличия наблюдаются после 19 октября: величина  $КЕ_2$  уменьшилась примерно на 35% за период с середины октября по конец ноября. В тёплый сезон в мае – сентябре в обоих экспериментах наблюдалась тенденция к уменьшению *КЕ*, что связано с ослаблением ветрового воздействия. Анализ поля ветра показал, что резкое увеличение  $КЕ_1$  и  $КЕ_2$  в конце октября было обусловлено действием штормового ветра над юго-западной частью моря. Из рис. 3, а видно, что  $КЕ_2$  после прохождения шторма практически вернулась к уровню  $(6-7)10^{14}$  Дж, близкому к показателям тёплого сезона, тогда как  $КЕ_1$  превышала летние значения до конца периода интегрирования.

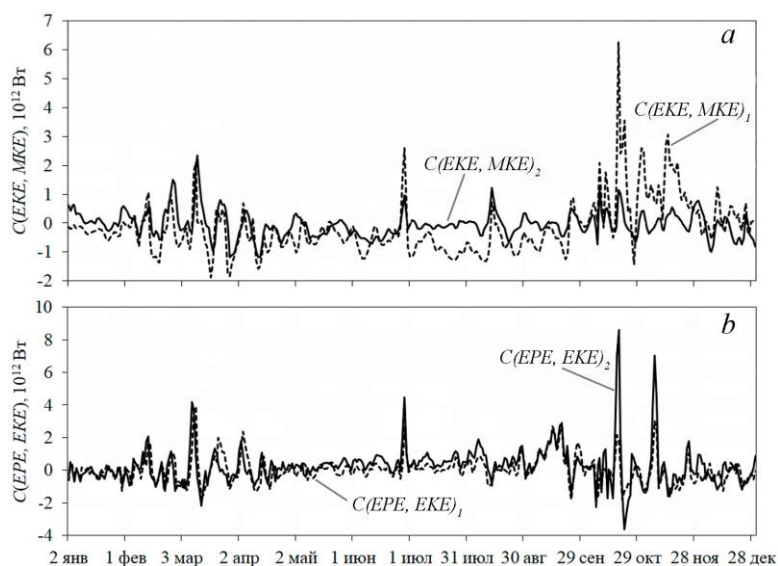


**Р и с. 3.** Изменение со временем проинтегрированных по объему  $KE$  (*a*) и  $EKE$  (*b*) в эксперименте 1 (штриховая) и в эксперименте 2 (сплошная)  
**F i g. 3.** Temporal variation of the volume-integrated  $KE$  (*a*) and  $EKE$  (*b*) in experiment 1 (hatch line) and in experiment 2 (solid line)

Вихревая энергия (рис. 3, *b*) увеличивалась в течение года в обоих экспериментах. При этом  $EKE_2$  в среднем на 12% превышала  $EKE_1$ . Максимальная разница между  $EKE_1$  и  $EKE_2$  наблюдалась 18 октября 2011 г. Таким образом, в эксперименте с более гладким дном экстремальный шторм 18–19 октября 2011 г. привел к последующей интенсификации общей циркуляции и росту  $KE_1$ , при этом  $EKE_1$  составляла четверть от этой величины, тогда как в эксперименте 2 величина  $KE_2$  увеличилась незначительно, при этом  $EKE_2$  составляла около 47% от  $KE_2$ .

Чтобы оценить, какие механизмы вызвали такое перераспределение энергии между течением и вихрями, рассмотрим изменение со временем интегралов  $S(EKE, MKE)$  и  $S(EPE, EKE)$ . На рис. 4 приведены кривые, рассчитанные по данным обоих экспериментов. В течение января – апреля поведение кривых, соответствующих результатам первого и второго экспериментов, было практически идентично: величины потоков были близки по значению, и совпадали их фазы. В июне – сентябре  $S(EKE, MKE)_1$  преимущественно отрицательна, что означает переход энергии из среднего течения в вихри. В октябре наблюдалось резкое увеличение  $S(EKE, MKE)_1$ , которое и привело к росту  $KE_1$  (штриховая линия на рис. 3, *a*). Величина  $S(EKE, MKE)_2$  в этот же период составляла приблизительно 1 ТВт ( $10^{12}$  Вт), тогда как  $S(EKE, MKE)_1$  достигала 6,26 ТВт. Существенное отличие в величине потока  $S(EPE, EKE)$  отражено двумя пиками сплошной кривой (эксперимент 2) на рис. 4, *b* в октябре и ноябре. Максимальное значение  $S(EPE, EKE)_2$  более чем в 4 раза превышало  $S(EPE, EKE)_1$  18 октября 2011 г. Сопоставление максимальных значений интегралов для каждого эксперимента показало, что  $S(EKE, MKE)_1$  было в 3,5 раза больше, чем  $S(EPE, EKE)_1$ , а  $S(EKE, MKE)_2$  в 7,3 раза меньше, чем

$C(EPE, EKE)_2$ . Таким образом, рост  $EKE$  в конце 2011 г. в эксперименте 1 был обусловлен потоком из среднего течения в вихри, в эксперименте 2 – потоком за счет доступной потенциальной энергии.



**Р и с. 4.** Изменение со временем проинтегрированных по объему  $C(EKE, MKE)$  (a) и  $C(EPE, EKE)$  (b) в эксперименте 1 (штриховая) и в эксперименте 2 (сплошная)

**Fig. 4.** Temporal variation of the volume-integrated  $C(EKE, MKE)$  (a) and  $C(EPE, EKE)$  (b) in experiment 1 (hatch line) and in experiment 2 (solid line)

### Заклучение

Проведен сравнительный анализ результатов двух численных экспериментов по моделированию циркуляции Черного моря в 2011 г. с использованием топографии дна, полученной по данным БОД МГИ и *EMODnet*. Рассмотрены поля температуры, солёности, скорости течений и энергетические характеристики, рассчитанные на каждые сутки исследуемого периода. Точность результатов моделирования оценена путем сравнения с данными контактных измерений буями *Argo* и со спутниковыми изображениями ТПМ. Анализ показал, что в эксперименте 2 на глубинах, где наблюдались максимальные невязки между измерениями и данными моделирования (слой 5–30 м для температуры и 30–100 м для солёности), СКО невязок уменьшились. При этом на более высоких горизонтах СКО невязок температуры в слое 0–5 м и солёности в слое 5–30 м возросли. В слое 100–300 м СКО невязок обоих параметров снизились. На горизонтах ниже 300 м данные экспериментов 1 и 2 отличаются друг от друга незначительно. Картографический анализ реконструированных полей течений и спутниковых изображений ТПМ показал, что данные эксперимента 2 в большей степени соответствовали натурным наблюдениям. Таким образом, сопоставление гидрофизических полей, рассчитанных в двух экспериментах, с реальными данными показало, что использование топографии дна Черного моря более высокого разрешения позволило улучшить точность воспроизведения особенностей циркуляции.

Механизмы изменчивости структуры циркуляции исследовались методом сравнительного анализа величин интегральных потоков, характеризующих вихревую энергию и общую кинетическую энергию циркуляции, а также скорость преобразования энергии из одного вида в другой. Анализ изменения со временем интегралов  $C(EKE, MKE)$  и  $C(EPE, EKE)$  свидетельствует о том, что при использовании рельефа дна с более высоким разрешением в моделируемой системе изменились механизмы перераспределения энергии между течениями и вихрями во время интенсивных штормовых воздействий. При более гладком рельефе дна увеличение кинетической энергии вихрей и течений было связано с процессами баротропной неустойчивости. При сложной изрезанной батиметрии вихревая кинетическая энергия увеличивалась преимущественно за счет процессов, связанных с бароклинной неустойчивостью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reanalysis of seasonal and interannual variability of Black Sea fields for 1993–2012 / G. K. Korotaev [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 4. P. 418–430. doi:10.1134/S0001433816040071
2. Dorofeev V. L., Sukhikh L. I. Modeling of Long-Term Evolution of Hydrophysical Fields of the Black Sea // *Oceanology*. 2017. Vol. 57, iss. 6. P. 784–796. doi:10.1134/S0001437017060017
3. Demyshev S. G. A numerical model of online forecasting Black Sea currents // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012. Vol. 48, iss. 1. P. 120–132. doi:10.1134/S0001433812010021
4. Black Sea GIS developed in MHI / E. Zhuk [et al.] // *Proceedings of SPIE 9688, Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2016)*. 2016. 96881C. doi:10.1117/12.2241631
5. Демьяшев С. Г., Коротаев Г. К., Кныш В. В. Моделирование сезонной изменчивости температурного режима деятельного слоя Черного моря // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2004. Т. 40, № 2. С. 259–270.
6. Дымова О. А. Моделирование мезо- и субмезомасштабных динамических процессов в прибрежных зонах Черного моря // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2017. № 8. С. 21–30. doi:10.17076/mat585
7. Demyshev S. G., Evstigneeva N. A. Modeling meso- and sub-mesoscale circulation along the eastern Crimean coast using numerical calculations // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 5. P. 560–569. doi:10.1134/S0001433816050042
8. Black Sea Checkpoint Second Data Adequacy Report / V. Lyubartsev [et al.]. EMODnet, 2018. URL: [http://www.emodnet.eu/sites/emodnet.eu/files/public/Checkpoints/SecondDAR\\_BlackSea.pdf](http://www.emodnet.eu/sites/emodnet.eu/files/public/Checkpoints/SecondDAR_BlackSea.pdf) (дата обращения: 05.01.2019).
9. Национальный атлас России. В 4 томах. Том 2. Природа. Экология. М. : ПКО Картография, 2007. 496 с.
10. Мамаев О. И. Океанографический анализ в системе  $\alpha$ -S-T-p. М. : МГУ, 1963. 228 с.
11. Ibraev R. A. A study of the sensitivity of the model of the Black Sea current dynamics to the surface boundary conditions // *Oceanology*. 2001. Vol. 41, no. 5. P. 615–621.
12. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Reviews of Geophysics*. 1982. Vol. 20, iss. 4. P. 851–875. doi:10.1029/RG020i004p00851
13. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 4. Черное море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / Ред. Э. Н. Альтман, А. И. Симонов. СПб. : Гидрометеоздат, 1991. 429 с.

14. *Arakawa A., Lamb V. R.* A Potential Enstrophy and Energy Conserving Scheme for the Shallow Water Equations // *Monthly Weather Review*. 1981. Vol. 109, no 1. P. 18–36. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0018:APEAEC>2.0.CO;2
15. *Demyshev S. G., Ivanov V. A., Markova N. V.* Analysis of the Black-Sea climatic fields below the main pycnocline obtained on the basis of assimilation of the archival data on temperature and salinity in the numerical hydrodynamic model // *Physical Oceanography*. 2009. Vol. 19, iss. 1. P. 1–12. doi:10.1007/s11110-009-9034-x
16. List of internal metrics for the MERSEA-GODAE Global Ocean: Specification for implementation / F. Hernandez [et al.]. MERSEA, 2006. URL: [http://www.clivar.org/sites/default/files/documents/wgomd/GODAE\\_MERSEA-report.pdf](http://www.clivar.org/sites/default/files/documents/wgomd/GODAE_MERSEA-report.pdf) (дата обращения: 05.01.2019).
17. Report of the High-Resolution Ocean Topography Science Working Group Meeting / Ed. D. B. Chelton. Corvallis, Oregon : Oregon State University, 2001. P. 1–19.
18. 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, no. 12. P. 2185–2205. doi:10.1175/JPO-D-12-079.1

*Об авторах:*

**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: 796-208**, **ORCID ID: 0000-0003-4036-2447**, **ResearcherID: P-9669-2015**, [olgadym@yahoo.com](mailto:olgadym@yahoo.com)

**Миклашевская Надежда Андриановна**, младший научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-2619-343X**, [nmikl@rambler.ru](mailto:nmikl@rambler.ru)