

Трехмерная идентификация синоптических вихрей Черного моря по расчетам численной модели *NEMO*

А. А. Кубряков*, А. И. Мизюк, О. С. Пузина, М. В. Сендеров

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: arskubr@ya.ru*

Поступила в редакцию 14.06.2017 г. После доработки 17.07.2017 г.

Предложен новый метод трехмерной идентификации синоптических вихрей на основе результатов численного моделирования гидродинамики Черного моря. Метод базируется на выделении замкнутых линий тока в полях скорости течений. С помощью данного метода и расчета модели *NEMO* за 2005–2008 гг. идентифицировано более 1000 вихревых образований. По этим данным определены характерные траектории вихрей, рассчитана пространственная изменчивость скорости, радиуса и частоты наблюдения циклонов и антициклонов. Полученные результаты согласуются с опубликованными ранее исследованиями характеристик вихрей по спутниковым и контактными данным. Результаты моделирования позволили изучить особенности вертикального распределения характеристик вихрей. Наиболее часто вихри наблюдаются в слое 0–150 м с максимумом на глубинах 20–50 м; в слое 150–300 м частота наблюдения в два раза ниже, но также существенна; ниже 300 метров она быстро убывает с глубиной. Аналогичное распределение характерно для радиусов и орбитальной скорости вихрей: наибольшие значения фиксируются в слое 0–150 м, ниже они резко уменьшаются с глубиной. Анализ сезонной изменчивости показал, что антициклоническая вихревая динамика активизируется в летний период, а циклоническая – в зимний, что соответствует материалам ряда предыдущих работ. Представленный метод дает дополнительные возможности для исследования особенностей генерации и эволюции вихрей Черного моря по данным численного моделирования.

Ключевые слова: синоптические вихри, Черное море, моделирование, вертикальная структура, автоматическая идентификация.

Для цитирования: Трехмерная идентификация синоптических вихрей Черного моря по расчетам численной модели *NEMO* / А. А. Кубряков [и др.] // Морской гидрофизический журнал. Т. 34, № 1. С. 20–28. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-20-28

Three-dimensional identification of the Black Sea mesoscale eddies based on the numerical model *NEMO* calculations

A. A. Kubryakov*, A. I. Mizyuk, O. S. Puzina, M. V. Senderov

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

**e-mail: arskubr@ya.ru*

A new method of three-dimensional identification of mesoscale eddies based on the results of the Black Sea hydrodynamics modeling is proposed. It is grounded on identifying the closed streamlines in the velocity fields. This method and the data resulted from the *NEMO* calculations for 2005–2008 are used to identify more than 1000 mesoscale eddies in the basin. These data permit to define the eddies' characteristic trajectories, to calculate spatial variability of their velocities and radii, and to assess frequency of detection of cyclones and anticyclones. The obtained results are in good agreement with the earlier published studies of the eddies' characteristics derived from satellite and direct data. The modeling results permit to investigate the features of vertical distribution of these characteristics. The eddies are most often detected in the 0–150 m layer (the highest detection frequency F is within 20–50 m). In the 150–300 m layer this value is two times smaller, but still is substantial. Below 300 meters F quickly decreases with depth. The analogous distribution is characteristic of the eddies' radii and orbital velocity: the highest values are observed in the upper 0–150 m layer, and in the lower layers they sharply decrease with depth. Being analyzed, seasonal variability the eddies' characteristics shows that the anticyclonic dynamics intensifies in summer, whereas the cyclonic one – in winter, that is consistent with the previous studies. The developed method provides additional opportunities for investigating the features of the eddies' generation and evolution in the Black Sea.

Keywords: mesoscale eddies, Black Sea, modeling, vertical structure, automatic identification.

For citation: Kubryakov, A.A., Mizyuk, A.I., Puzina, O.S. and Senderov, M.V., 2018. Three-dimensional identification of the Black Sea mesoscale eddies based on the numerical model *NEMO* calculations. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, 34(1), pp. 20-28. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-20-28 (in Russian).

Введение. Синоптические вихри играют большую роль в циркуляции, водообмене, транспорте тепла, соли и биогенных элементов, вертикальном перемешивании в Черном море [1–11]. Развитие методов автоматической идентификации вихрей на основе альтиметрических измерений дало возможность получить большое количество статистических данных о параметрах вихрей в океане. В работах [6–8] эти методы были использованы для исследования динамических и геометрических характеристик вихрей Черного моря, эволюции вихрей в процессе существования [6], их сезонной и межгодовой изменчивости и связи с крупномасштабными течениями [7, 8].

В отличие от спутниковых данных, которые дают информацию только о процессах на морской поверхности, современные численные модели позволяют исследовать трехмерную изменчивость динамических и термохалинных характеристик синоптических вихрей. Данные численного моделирования были использованы в ряде работ [5, 12–14] для изучения формирования, взаимодействия, энергетики вихрей Черного моря и их влияния на горизонтальный транспорт в бассейне. В этих работах для получения качественных результатов выделение вихрей по данным численных моделей проводилось визуально, что не давало возможности получить большое количество статистической информации и затрудняло анализ вихревой динамики Черного моря.

Методы автоматической идентификации вихрей, используемые при анализе двухмерных полей скорости по измерениям альтиметров, можно развить для трехмерной идентификации вихрей по данным численного моделирования [15]. В настоящей работе применяется процедура идентификации вихрей по результатам расчетов модели *NEMO* (*Nucleus for European Modelling of the Ocean*), базирующаяся на выделении замкнутых линий тока в поле скорости [16] на каждом горизонте модели. На основе расчетов за 2005–2008 гг. исследовано горизонтальное и вертикальное распределение характеристик вихрей в Черном море, продемонстрированы примеры эволюции отдельных вихрей в бассейне.

Описание модели. В настоящем исследовании использовалась региональная конфигурация численной модели для бассейна Черного моря из работы [17], полученная на основе модельного комплекса *NEMO* [18]. Она основана на приведенной в работе [18] системе примитивных уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска и гидростатики. Данная региональная конфигурация [17] представляет собой замкнутый бассейн Черного моря с пространственным разрешением 10 км. По вертикали задаются 35 z -горизонтов с улучшенным разрешением в верхнем слое. Для нелинейных слагаемых в уравнениях переноса – диффузии применяется схема с коррекцией потока. Вертикальное турбулентное перемешивание рассчитывается с помощью модели Меллора – Ямады [19]. Для параметризации горизонтального турбулентного обмена используется бигармонический оператор с коэффициентами вязкости и диффузии тепла и соли, равными $-2 \cdot 10^{10}$ и $-10^{10} \text{ м}^4/\text{с}$ соответственно. Расчет проводился для периода 2005–2008 гг. с шагом по времени 10 мин. Начальные условия подготовлены на основе реанализа гидрофизических полей Черного моря, выполненного Центром морских прогнозов Морского гидрофизического института (МГИ) РАН (URL: <http://mis.bsmfc.net/>).
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ Т. 34, № 1 2018

В качестве атмосферного воздействия брались данные регионального реанализа, рассчитанные моделью *MM5* [20].

Описание процедуры автоматической идентификации вихрей. В основе алгоритма трехмерной автоматической идентификации вихрей лежит метод *winding angle* («угол намотки») [16], использованный в работе [6] для исследования характеристик вихрей Черного моря по полям поверхностных геострофических скоростей, полученным по данным альтиметров. Метод базируется на выделении замкнутых линий тока в поле скорости.

Чтобы идентифицировать вихрь в двумерном поле скорости в конкретный момент времени, в каждом узле сетки запускается виртуальная частица. Ее траектория в стационарном поле скорости рассчитывается методом Эйлера с шагом dt . На каждом шаге работы алгоритма рассчитывается суммарный угол отклонения частицы – угол намотки. При превышении суммарным углом значения 360° частица совершает круговой оборот, т. е. располагается на замкнутой линии тока. Это означает, что соответствующий узел сетки находится в вихревом образовании. Расчет ведется в течение определенного количества времени T , которое представляет собой верхнюю границу периода обращения частицы в вихре. При этом ставится ограничение на максимальную длину траектории частицы L , соответствующее максимально возможному радиусу вихря.

Объединение соседних выделенных узлов сетки образует области с идентифицированными вихрями. Пример выделенных кластеров частиц со значением угла намотки более 360° для поля скорости на глубине 20 м за 03.09.2007 г. представлен на рис. 1, *a*.

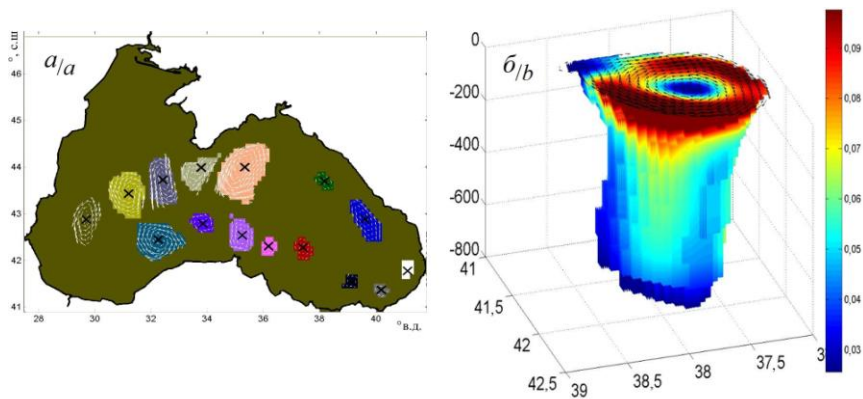


Рис. 1. Пример выделенных вихрей на горизонте 20 м за 03.09.2007 г. (*a*); идентифицированный трехмерный вихрь в поле скорости (*b*)

Fig. 1. Example of selected eddies on 20 m horizon for 03.09.2007 (*a*); identified three-dimensional eddy in the velocity field (*b*)

Для каждого двумерного идентифицированного вихря определялись радиус R (по площади вихря), средняя v и максимальная v_{\max} орбитальная скорость, завихренность W .

Для определения трехмерных характеристик вихрей по данным модели *NEMO* процедура идентификации вихрей *winding angle* выполнена на каждом

горизонте модели. Далее проводилась процедура объединения вихрей по вертикали. Для этого определялось расстояние между центрами двумерных вихрей на соседних вертикальных горизонтах. Если данное расстояние не превышало среднего радиуса вихрей на этих горизонтах, то данные двумерные вихри объединялись в трехмерный. Пример идентифицированного трехмерного вихря в поле скорости показан на рис. 1, б.

После выделения вихревых образований определялись траектории перемещения отдельных вихрей. Для этого вычислялись расстояния между центром вихря за данную дату и центрами всех вихрей на следующий момент времени. Пара вихрей с минимальным расстоянием между ними, не превышающим радиус вихря, считалась двумя последовательными положениями одного и того же вихря.

Существенное влияние на полученные характеристики вихрей могут оказывать используемые параметры алгоритма: максимальная длина траектории частицы $L = 2\pi R_{\max}$ (R_{\max} – максимальный радиус вихря) и максимальный период обращения частиц $T = 2\pi R_{\max} / v_{\text{lim}}$. Период обращения связан с минимальной завихренностью синоптического вихря, которая должна быть больше, чем завихренность в крупномасштабных круговоротах. Параметр v_{lim} соответствует минимально допустимой орбитальной скорости на периферии крупных вихрей радиусом R_{\max} , для того чтобы они были идентифицированы как синоптические вихри, а не как крупномасштабные замкнутые циркуляции. Параметры R_{\max} и v_{lim} выбраны на основе сопоставления результатов идентификации с существующими данными о размерах и скорости вихрей в Черном море. На всех горизонтах R_{\max} задавался равным 80 км, что соответствует данным о максимальных размерах вихрей в Черном море из работ [1–11]. Минимальная скорость v_{lim} менялась по вертикали. В верхних слоях ее значение принималось равным 0,1 м/с, что соответствует наиболее слабым вихрям в бассейне. В нижних слоях скорость вихрей обычно затухает, и для слоя глубже 200 м v_{lim} принималась равной 0,02 м/с. Такое значение примерно равно средней скорости перемещения вихрей c в Черном море, которая составляет 0,02–0,04 м/с [6]. Это соответствует значению параметра нелинейности $P = v_{\text{lim}} / c > 1$, что характерно для нелинейных вихрей, способных переносить вещество [21].

Траектории и частота наблюдения вихрей. Рассчитанные по данным модели за 2005–2008 гг. траектории вихревых образований со временем жизни более 90 сут изображены на рис. 2, а. Вихри в бассейне Черного моря движутся преимущественно в циклоническом направлении вместе со струей Основного Черноморского течения (ОЧТ), что согласуется с предыдущими работами [4–6]. По данным расчетов, наиболее долгоживущие вихри образуются в районе Севастопольского антициклона, Кавказского побережья, Батумского антициклона и у центральной части Анатолийского побережья [5, 9]. В северной части бассейна, где движение вихрей и ОЧТ совпадает с направлением распространения волн Россби (на запад), долгоживущих вихрей

наблюдается больше, чем в южной части, где вихри движутся на восток. Аналогичные результаты были получены и в работе [6] по альтиметрическим данным.

Карты вероятности наблюдения вихрей на всех глубинах (рис. 2 в, з) показывают, что в районе континентального склона вихри в среднем наблюдаются в 40–70 % ситуаций. При этом частота наблюдения циклонов и антициклонов примерно одинакова, но существуют особенности их пространственного распределения. Чаще всего антициклонические вихри встречаются в районе формирования Севастопольского антициклона (> 40 % времени), а также Батумского антициклона в юго-восточной части моря (30–40 %) и Кавказского вихря в северо-восточной части (30–40 %). В этих районах вихри приостанавливают свое движение, становятся квазистационарными и поэтому наблюдаются наибольшее количество времени.

По данным модели, циклоны встречаются чаще, чем антициклоны, в западной части моря и к югу от Южного побережья Крыма (35–45 %), и несколько реже наблюдаются в районе Батумского антициклона и восточного побережья. В районе Севастопольского антициклона вероятность наблюдения циклонов и антициклонов примерно одинакова.

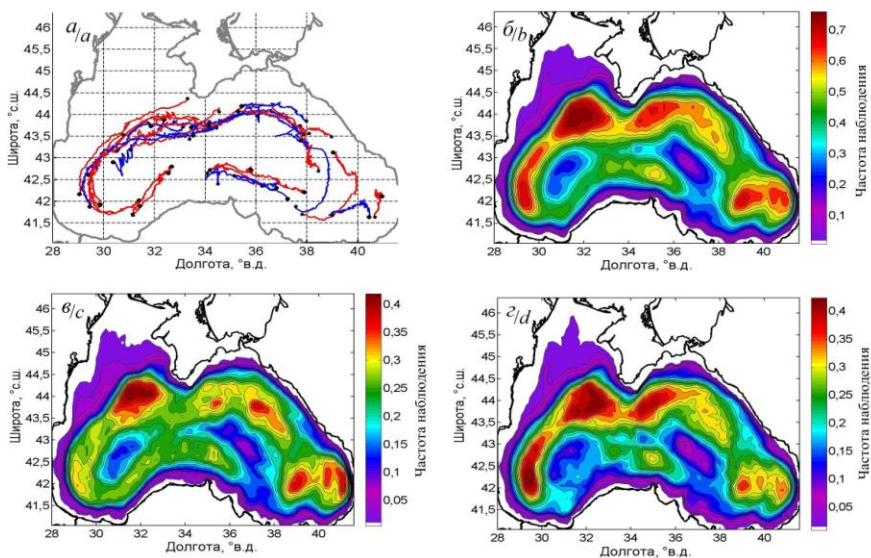


Рис. 2. Траектории вихревых образований со временем жизни более 90 сут (а) (красный цвет – антициклоны, синий – циклоны); пространственное распределение частоты наблюдения вихрей в целом (б) и отдельно антициклонов (в), циклонов (з)

Fig. 2. Trajectories of eddy formations with more than 90 days lifetime (a) (red – anticyclones, blue – cyclones); spatial distribution of eddy observation frequency as a whole (b) and separately of anticyclones (c), cyclones (d)

Минимумы повторяемости вихрей обоих знаков отмечаются в глубоководной части моря – в центрах восточного (37° з. д., 43° с. ш.) и западного (31° з. д., 43° с. ш.) циклонического круговорота.

Радиус и орбитальная скорость вихрей. Среднее по времени пространственное распределение максимального по глубине радиуса и максимальной орбитальной скорости вихрей представлено на рис. 3. Средний радиус вихрей равен ~ 20–30 км.

На картах хорошо видно, что размеры вихрей в южной части моря (~ 15–20 км) значительно меньше, чем в остальной акватории (~ 25–30 км). Такое уменьшение радиуса вихрей известно по данным спутниковых оптических и альтиметрических измерений [5, 6, 22]. В южной части акватории отмечена и наименьшая орбитальная скорость вихрей. Данный факт обусловлен особенностями взаимодействия волновых движений с топографией в этой зоне и направленностью движения вихрей на восток против движения волн Россби [22]. Результаты моделирования успешно воспроизводят эту особенность вихревой динамики Черного моря.

Минимальные значения радиуса и орбитальной скорости вихрей отмечены также в районе мелководного северо-западного шельфа, где обыкновенно наблюдаются небольшие короткоживущие, в основном баротропные вихри.

Наибольшие значения радиуса (~ 30–35 км) и орбитальной скорости наблюдаются на континентальном склоне в западной части моря. Здесь скорости в среднем превышают 0,2 м/с. В этом районе бассейна наблюдается прохождение образующегося с западной стороны Крыма Севастопольского антициклона вместе со струей ОЧТ в циклоническом направлении. В данном модельном расчете он наиболее интенсивен. Относительно высокие орбитальные скорости отмечаются также в районе Батумского антициклона и узкого северо-восточного континентального склона бассейна.

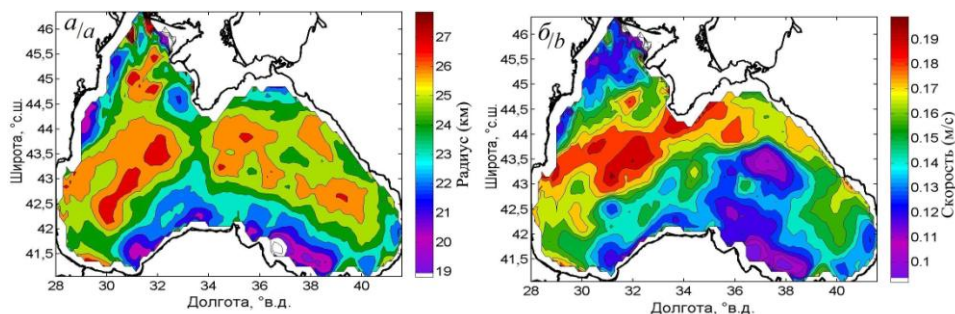


Рис. 3. Среднее по времени пространственное распределение максимального по глубине радиуса (*a*) и максимальной орбитальной скорости (*b*) вихрей

Fig. 3. The time-averaged spatial distribution of the maximum radius by depth (*a*) and maximum orbital velocity (*b*) of eddies

Вертикальное распределение частоты наблюдения, радиуса и орбитальной скорости вихрей. Количество вихрей и частота их наблюдения существенно снижаются в нижних слоях бассейна (рис. 4, *a*). Частота наблюдения вихрей F рассчитывалась как доля времени наблюдения вихря в определенной расчетной точке. Далее для построения графика на рис. 4, *a* значения усреднялись по площади на каждом горизонте модели. На графике можно визуальнo выделить три слоя: наибольшие значения F приходятся на верхний слой 0–150 м с максимумом на глубинах 30–40 м; далее до глубин 300 м значения F практически постоянны и в два раза меньше, чем на поверхности; ниже 300 м они начинают убывать до нуля. Сходная изменчивость характерна и для радиуса вихрей (рис. 5, *b*). Максимальные размеры наблюдаются на поверхности бассейна (28–30 км), ниже радиус уменьшается до значения 22 км на глубине 150 м. В слое 150–300 м размеры остаются практически постоянными и резко уменьшаются в нижележащих слоях.

Максимальная по площади орбитальная скорость вихрей (см. рис. 2) наиболее высока на поверхности, где она составляет 0,15 м/с для антициклонических и 0,13 м/с для циклонических вихрей. С глубиной орбитальная скорость практически линейно убывает до 0,1 м/с на горизонте 100 м; 0,05 м/с на 200 м и 0,02 м/с на 400 м.

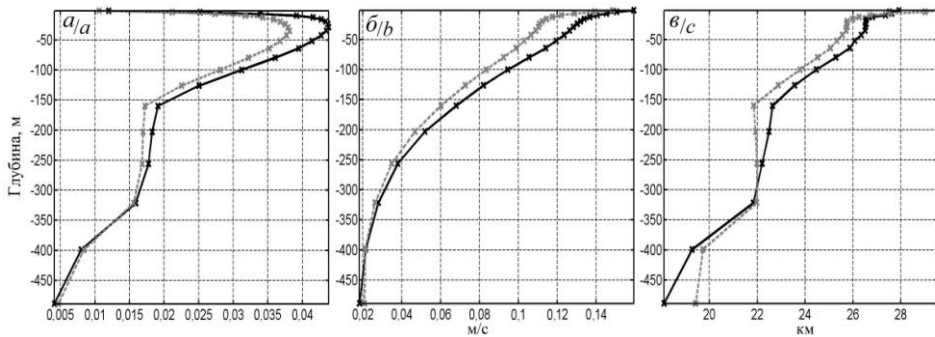


Рис. 4. Вертикальное распределение частоты наблюдения (*a*), средней орбитальной скорости (*b*) и радиуса (*c*) антициклонов (черная линия) и циклонов (серый пунктир)

Fig. 4. Vertical distribution of observation frequency (*a*), mean orbital velocity (*b*) and radius (*c*) of anticyclones (black line) and cyclones (gray dotted line)

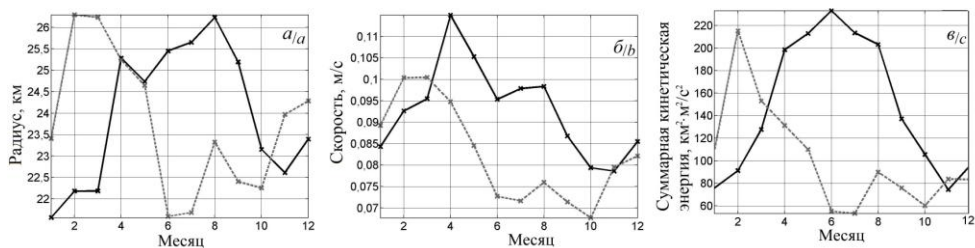


Рис. 5. Сезонная изменчивость радиуса (км) (*a*), максимальной орбитальной скорости (м/с) (*b*) и суммарной кинетической энергии (км²·м²/с²) (*c*) антициклонов (черная линия) и циклонов (серая) на глубине 100 м

Fig. 5. Seasonal variability of radius (km) (*a*), maximum orbital velocity (m/s) (*b*) and total kinetic energy (km²·m²/s²) (*c*) of anticyclones (black line) and cyclones (grey) at 100 m depth

Сезонная изменчивость. На рис. 5 изображены графики сезонной изменчивости радиуса, орбитальной скорости и суммарной кинетической энергии

($E_k = \sum_i^N S_i v_i = \sum_i^N \pi R_i^2 v_i$) на глубине 100 м.

Сезонная изменчивость основных характеристик циклонов и антициклонов находится в противофазе, что было установлено ранее в работе [7] по данным альтиметров. Антициклоническая активность в Черном море возрастает в летний период во время уменьшения циклонической завихренности ветра и интенсивности ОЧТ. Ослабевающее ОЧТ становится неустойчивым и распадается с образованием большого количества крупных антициклонов [23]. Энергия ОЧТ переходит в энергию антициклонических образований. В апреле, когда ОЧТ еще достаточно интенсивно, образующиеся в результате его распада вихри имеют наибольшие значения орбитальной скорости. По данным модели, наибольшее количество антициклонов, а также максимальные значения их суммарной кинетической энергии и занимаемой ими площади наблюдаются в июне. Начиная

с августа – сентября энергия антициклонов резко убывает. Она характеризуется минимальными значениями в ноябре – феврале, когда ОЧТ максимально интенсивно. В то же время циклоническая активность активизируется в феврале – марте. Циклоны образуются в основном слева от ОЧТ, в зоне максимального циклонического сдвига скорости течения. Сдвиг скорости течений, возможно, является основным механизмом их генерации в зимний период [7, 11].

Заключение. В работе предложен метод трехмерной автоматической идентификации вихрей Черного моря по данным численного моделирования. Он базируется на выделении замкнутых линий тока в поле скорости на каждом расчетном горизонте. Данный метод был использован для анализа различных геометрических и кинематических характеристик вихрей Черного моря, их пространственной и временной изменчивости, в том числе их вертикального распределения. Полученные по данным модели *NEMO* результаты достаточно хорошо согласуются с данными спутниковых и гидрологических исследований, что свидетельствует о высоком качестве воспроизведения моделью вихревой динамики Черного моря. Представленный метод трехмерной идентификации позволяет исследовать как статистические характеристики большого количества наблюдаемых вихрей в модели, так и особенности эволюции отдельных вихревых образований, что дает возможность более глубоко понять механизмы генерации, эволюции и диссипации вихрей в океане.

Анализ характеристик вихрей выполнен при поддержке гранта РФФИ 16-05-00714 а, разработка метода трехмерной автоматической идентификации вихрей при поддержке Госзадания № 0827-2015-0001, моделирование численной динамики выполнено при поддержке гранта 17-05-41089 РГО_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь: МГИ НАНУ, 2011. 212 с.
2. Влияние циркуляции вод и вихревых образований на глубинное положение верхней границы сероводородной зоны Черного моря / В. Г. Кривошея [и др.] // *Океанология*. 2000. Т. 40, № 6. С. 816–825.
3. *Латун В. С.* Антициклонические вихри в Черном море летом 1984 года // *Морской гидрофизический журнал*. 1989. № 3. С. 27–35.
4. Anticyclonic eddies in the northwestern Black Sea / A. I. Ginzburg [et al.] // *J. Mar. Syst.* 2002. Vol. 32, iss. 1–3. P. 91–106. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00035-0)
5. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / G. Korotaev [et al.] // *J. Geophys. Res.* Vol. 108, iss. C4, 3122. P. 19-1–19-5. doi:10.1029/2002JC001508
6. *Кубряков А. А., Станичный С. В.* Синоптические вихри в Черном море по данным спутниковой альтиметрии // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 1. P. 65–77. doi:10.7868/S0030157415010104
7. *Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // *Deep-Sea Res. I*. 2015. Vol. 97. P. 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.12.002>
8. Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem / A. A. Kubryakov [et al.] // *J. Mar. Syst.* 2016. Vol. 163. P. 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.06.006>
9. Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea / T. Oguz [et al.] // *Deep-Sea Res. I*. 1993. Vol. 40, iss. 8. P. 1597–1612. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(93\)90018-X](https://doi.org/10.1016/0967-0637(93)90018-X)

10. *Shapiro G. I., Stanichny S. V., Stanychna R. R.* Anatomy of shelf–deep sea exchanges by mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data // *Remote Sens. Environ.* 2010. Vol. 114, iss. 4. P. 867–875. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.020>
11. Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing / A. G. Zatsepin [et al.] // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, iss. C8, 3246. P. 2-1–2-27. doi:10.1029/2002JC001390
12. Rim current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving Black Sea general circulation model / J. V. Staneva [et al.] // *J. Mar. Syst.* 2001. Vol. 31, iss. 1–3. P. 137–157. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(01\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(01)00050-1)
13. *Демьшев С. Г., Дымова О. А.* Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2013. Т. 49, № 6. С. 655–663. doi:10.7868/S0002351513060035
14. Восстановление синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря на основе реанализа за 1980–1993 годы / П. Н. Лишаев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал.* 2014. № 5. С. 49–65.
15. Three-dimensional properties of mesoscale eddies in the South China Sea based on eddy-resolving model output / X. Lin [et al.] // *Deep-Sea Res. I.* 2015. Vol. 99. P. 46–64. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.01.007>
16. *Chaigneau A., Gizolme A., Grados C.* Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns // *Prog. Oceanogr.* 2008. Vol. 79, iss. 2–4. P. 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.013>
17. *Пузина О. С., Мизюк А. И.* Влияние параметров вертикального перемешивания на температуру верхнего слоя Черного моря // *Комплексные исследования Мирового океана: материалы II Всероссийской науч. конф. молодых ученых, г. Москва, 10–14 апреля 2017 г. М. : ИО РАН, 2017. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30062965> (дата обращения: 11.12.2017).*
18. *Madec, G.* NEMO Ocean Engine. Note du Pôle de modélisation. Technical Report. France : Institut Pierre-Simon Laplace, 2008. No. 27. URL: https://www.nemo-ocean.eu/doc/NEMO_book.html (дата обращения: 11.12.2017).
19. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys.* 1982. Vol. 20, iss. 4. P. 851–875. doi:10.1029/RG020i004p00851
20. *Шокуров М. В.* Численное моделирование атмосферной циркуляции над Черным морем // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. Вып. 25, Т. 2. С. 91–113.
21. *Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Prog. Oceanogr.* 2011. Vol. 91, iss. 2. P. 167–216. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>
22. *Blokhina M.D., Afanasyev Y.D.* Baroclinic instability and transient features of mesoscale surface circulation in the Black Sea: Laboratory experiment // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, iss. C10. 3322. doi:10.1029/2003JC001
23. 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.] // *Ibid.* 2005. Vol. 45, suppl. 1. P. S13– S26.

Сведения об авторах:

Кубряков Арсений Александрович, старший научный сотрудник отдела дистанционных методов исследования ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-3561-5913, arskubr@mhi-ras.ru.

Мизюк Артем Игоревич, научный сотрудник отдела динамики океанических процессов ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-4885-354X, artem.mizyuk@mhi-ras.ru.

Пузина Оксана Сергеевна, старший инженер-исследователь отдела динамики океанических процессов ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), ORCID: 0000-0002-1637-4475, oksa-na_puzina@mhi-ras.ru.

Сендеров Максим Владимирович, старший инженер-исследователь отдела динамики океанических процессов ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), ORCID: 0000-0002-1025-590X, maxim.senderov@mhi-ras.ru.