

УДК 551.465

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЗО- И СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБРЕЖНЫХ ЗОНАХ ЧЕРНОГО МОРЯ

О. А. Дымова

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь*

В работе представлен анализ результатов моделирования циркуляции в Черном море. Расчеты выполнены с горизонтальным разрешением 1,6 км и учетом реального атмосферного воздействия за 2006 и 2011 гг. В поле течений воспроизведены вихри, имеющие характерные мезомасштабные и субмезомасштабные пространственно-временные параметры. Показано, что реконструированные гидрофизические поля соответствуют данным наблюдений. Наиболее интенсивное образование вихрей с масштабами менее 10 км и орбитальными скоростями 20–30 см/с наблюдалось в окрестностях Крымского полуострова, в северо-восточной и юго-восточной частях моря. Вихревые структуры в шельфовых зонах формировались во все сезоны при слабых ветрах любого направления. Их размеры зависели от глубины и протяженности шельфа, а также величины береговых выступов. На основе анализа пространственно-временной изменчивости полей солёности и вдольбереговой компоненты скорости на вертикальных сечениях, проходящих через центры вихрей, получено, что в Черном море преобладают два основных механизма формирования прибрежных вихрей. Первый – это бароклинная неустойчивость, возникающая при увеличении горизонтального градиента плотности за счет подъема/опускания вод на периферии крупных вихрей или течений. Второй механизм – это обтекание неоднородностей берега набегающим прибрежным потоком, скорость которого превышает 40 см/с.

Ключевые слова: вихрь; прибрежные течения; плотность; бароклинная неустойчивость; орография берега.

### **O. A. Dymova. MODELING OF THE MESO- AND SUBMESOSCALE DYNAMIC PROCESSES IN THE BLACK SEA COASTAL ZONES**

The article presents an analysis of simulation results for the Black Sea circulation. The calculations were carried out with a horizontal resolution of 1.6 km and taking into account the real atmospheric forcing for 2006 and 2011. Eddies with characteristic mesoscale and submesoscale spatio-temporal parameters were reconstructed in the velocity fields. It is shown that the simulated hydrophysical fields correspond to observed data. The most intensive generation of eddies with the scale of less than 10 km and orbital velocities of 20 – 30 cm/s was observed in the neighborhood of the Crimean Peninsula, in the north-eastern and south-eastern parts of the sea. Vortex structures in the shelf zones were formed in all seasons with weak winds of directions. Their size depended on the depth and length of the shelf, as well as on the dimensions of coastal capes. The analysis of spatial and temporal variability of salinity fields and the longshore velocity component in the vertical cross-section passing through eddy centers showed that two main mechanisms of coastal eddies formation dominated in the Black Sea. The first mechanism is baroclinic instability, which arises with increasing horizontal density gradient in the periphery of large eddies or currents due to water rising/lowering. The second mechanism is the streamlining of shore inhomogeneities by the coastal current with a velocity higher than 40 cm/s.

## ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные современные спутниковые и контактные (например, [16, 17]) наблюдения подтверждают существование в океанах и морях круговых динамических структур с характерными масштабами по пространству порядка нескольких километров и временем жизни от нескольких суток до недель. Относительно локального бароклинного радиуса деформации Россби  $R_d$  их разделяют на мезомасштабные квазигеострофические вихри, для которых число Россби  $Ro$  гораздо меньше единицы, а размер больше  $R_d$ , и субмезомасштабные агеострофические вихри, радиус которых меньше радиуса  $R_d$ , а  $Ro$  порядка единицы [21]. Бароклинный радиус деформации, рассчитанный по формуле (1), для прибрежной зоны Черного моря в среднем равен 8 км.

$$R_d = \frac{\sqrt{gH(\Delta\rho/\rho)}}{f}, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $H$  – толщина верхнего квазиоднородного слоя,  $\Delta\rho$  – перепад плотности,  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $f$  – параметр Кориолиса. Обладая большими запасами энергии, вихри играют доминирующую роль в процессах трансформации гидрофизических полей, особенно в прибрежной зоне, поэтому их изучение представляет большой интерес. Так как по объективным причинам спутниковые методы не могут предоставить непрерывные по времени и пространству данные об изменчивости вод, то одним из наиболее востребованных инструментов изучения динамики жидкости является компьютерное моделирование.

Для Черного моря построен/адаптирован целый ряд вихреразрешающих моделей, позволяющих воспроизводить пространственно-временную изменчивость на масштабах от сотен метров до нескольких километров, например [1, 13, 15, 22]. В рамках европейского проекта «МуОсеан» проведено сравнение результатов численных экспериментов по реконструкции циркуляции с разрешением от 5 до

8 км по горизонтали, выполненных с использованием моделей РОМ [5], NEMO [6] и МГИ [9] (МГИ – Морской гидрофизический институт). Авторы указывают, что горизонтальное разрешение существенно влияет на качество воспроизведения гидрофизических характеристик. К настоящему времени в соответствии с мировой тенденцией к увеличению разрешения моделей океана в целом ряде работ (например, [11, 18, 23]) сделан акцент на изучение мезо- и субмезомасштабной динамики в Черном море методами математического моделирования.

Целью представленной работы было реконструировать циркуляцию Черного моря с высоким пространственным разрешением и учетом реального атмосферного воздействия и на основе анализа полученных гидрофизических полей исследовать возможные физические механизмы формирования мезо- и субмезомасштабных вихрей. Версия модели МГИ с разрешением 5 км [9] успешно используется в системе прогноза гидрофизических полей Черного моря [8]. Актуальность работы обусловлена необходимостью увеличения разрешающей способности модели, что связано с задачами рационального природопользования и мониторинга состояния прибрежных акваторий Азово-Черноморского региона.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Численные эксперименты выполнены с помощью нелинейной вихреразрешающей модели МГИ [3]. Модель основана на полной системе уравнений гидротермодинамики океана в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды. Динамика поверхности моря определяется в рамках применения линеаризованного кинематического условия, вследствие чего мы можем исследовать быстрые нестационарные процессы. Уравнения модели записаны в декартовой системе координат. Ниже представлены уравнения для горизонтальных компонентов скорости течений:

$$\frac{du}{dt} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} + \nu_h \nabla^4 u, \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} + \nu_h \nabla^4 v. \quad (3)$$

В уравнениях (2)–(3) обозначения общепринятые. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости  $\nu_h$  – константа, коэффициент вертикальной турбулентной вязкости  $\nu_v$  рассчитывается с применением теории Меллора – Ямады 2,5 [19]. Турбулентные слагаемые описываются бигармоническим оператором  $\nabla^4 u, v$ , что сделано в целях обеспечения стабильности численного решения. В качестве граничных условий на поверхности задаются касательные напряжения трения ветра:

$$\nu_v \frac{\partial u}{\partial z} = -\tau^x, \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} = -\tau^y. \quad (4)$$

На дне задаются условия непротекания:

$$u = 0, v = 0. \quad (5)$$

На твердых участках границы области ставятся условия непротекания для нормальной составляющей скорости и скольжения – для касательной. Для меридиональных участков:

$$u = 0, \nabla^2 u = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \nabla^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Для зональных участков границы:

$$v = 0, \nabla^2 v = 0, \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \nabla^2 \frac{\partial u}{\partial y} = 0. \quad (7)$$

В устьях рек и проливах задаются нормальные компоненты скорости (условия Дирихле II рода). Конечно-разностный аналог системы дифференциальных уравнений модели построен на сетке С. Дискретные уравнения являются точным следствием конечно-разностной формулировки модели, что обеспечивает выполнение основных интегральных соотношений и законов сохранения. В [10] представлены подробная постановка задачи, описание полной системы уравнений модели, начальных и граничных условий.

Гидрофизические поля рассчитывались на равномерной сетке с шагом по горизонтальным координатам 1,6 км, что позволило воспроизвести динамические структуры с масштабами меньше радиуса деформации Россби. По вертикали использовалось 27 z-горизонтов с глубинами 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 62,5; 75; 87,5; 100; 112,5; 150; 200; далее через каждые 100 м до 500 м, затем через 200 м до 1700, 2100 м. Шаг по времени равнялся 96 сек. Атмосферное воздействие задавалось по данным реанализа ALADIN (1/4 °) за 2006 г. [14] и реанализа SKIRON (1/10 °) за 2011 г. [20]. Также на верхнем расчетном горизонте каждые сутки усваивалась температура поверхности моря, которая была получена по данным спутника NOAA [7]. Граничные поля были линейно проинтерполированы на модельную сетку.

Для задания температуры, солёности и скорости в устьях рек и проливах использовались климатические данные, в верхнебосфорском течении температура и солёность та же, что и в море. В нижнебосфорском потоке солёность принималась равной 25 ‰ и температура – 12 °С, что соответствует среднегодовым показателям вод Мраморного моря. Принималось, что верхнее течение в Босфоре распространяется до глубины 27,5 м, нижнее – до 68,75 м. Коэффициенты при бигармонических операторах в слагаемых, описывающих горизонтальную турбулентную вязкость в уравнениях движения и горизонтальную турбулентную диффузию в уравнениях переноса тепла и соли, равны соответственно  $10^{16}$  см<sup>4</sup>/с,  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>4</sup>/с.

В начальный момент времени задавались поля уровня, температуры, солёности и скоростей течений. В модели использована процедура квазигеострофического приспособления.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам двух численных экспериментов были реконструированы трехмерные поля течений, температуры и солёности, а также поле уровня в 2006 и 2011 гг. Для верификации результатов расчетов было проведено сопоставление со спутниковыми и контактными данными наблюдений. Сравнение с измеренными профилями температуры и солёности, а также сопоставление со снимками концентрации хлорофилла показало хорошее соответствие модельных и натурных данных для 2006 г. [4]. В качестве примера приведем результаты верификации модельных скоростей течений в январе 2011 г. с доступными данными. На рисунке 1, а представлены скорости течений на глубине 3,2 м для января 2011 г. по данным ADCP-измерений и расчета по модели DHI MIKE [11] и на рисунке 1, б – аналогичные данные в той же точке, рассчитанные по модели МГИ. Видно, что наблюдается качественное соответствие временной изменчивости натурных и расчетных данных. Отличие пиковых значений модуля скорости можно объяснить влиянием задаваемого в модели ветра, который определяет скорости течений на верхнем расчетном горизонте. При сопоставлении карт поверхностных течений со снимками концентрации хлорофилла и яркости восходящего излучения по данным спутника MODIS [7] в весенне-летний сезон 2011 г. также выявлено удовлетворительное совпадение с реальными данными.

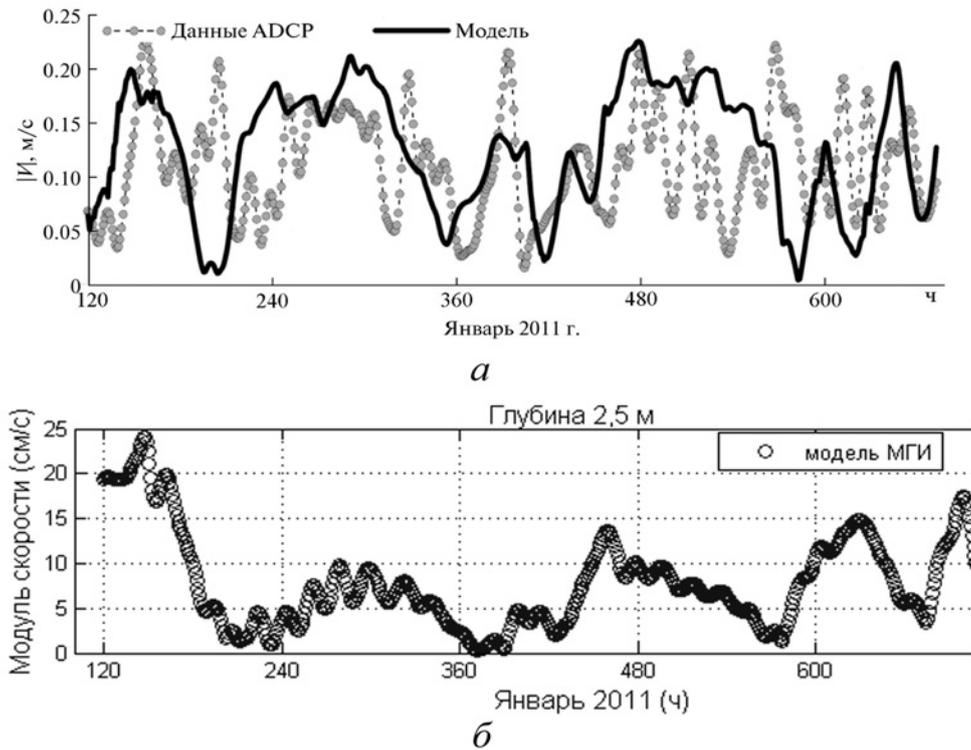


Рис. 1. Модуль скорости поверхностных течений в январе 2011 г.: а – по результатам работы [11] (рис. 3), м<sup>2</sup>/с; б – по данным модели МГИ, см<sup>2</sup>/с

В настоящей работе рассмотрены динамические характеристики вихрей и течений, полученные по результатам расчетов. Анализ полей скорости показал, что в целом для Черного моря воспроизводятся известные из литературы и данных наблюдений особенности циркуляции. Глубоководную часть охватывает крупномасштабный циклонический круговорот – Основное черноморское течение (ОЧТ), которое интенсифицируется в холодный период года и ослабевает в летний. По периферии ОЧТ квазипериодически формируются мезомасштабные вихри, воспроизводятся Севастопольский и Батумский антициклоны. Наиболее интенсивное образование мезо- и субмезомасштабных вихрей происходит на северо-западном шельфе (СЗШ), в окрестностях Крымского полуострова, около Кавказского и Анатолийского побережий. Преимущественно круговороты, формирующиеся в этих районах, имеют антициклонический знак завихренности, они возникают квазипериодически и переносятся ОЧТ по направлению движения. Время жизни таких вихрей составляет от десятков часов до нескольких суток, орбитальные скорости в среднем равны 10–15 см<sup>2</sup>/с. Сравнение карт течений с картами полей ветра показало, что мезо- и субмезомасштабные вихревые структуры над кромкой

шельфа формировались во все сезоны при слабых ветрах любого направления, когда величина вектора касательного напряжения трения не превышала 0,6 дин/см<sup>2</sup>. При усилении ветра струя ОЧТ была прижата к берегу, и вихри с размерами меньше радиуса деформации Россби в представленных экспериментах не развивались.

Рассмотрим детально субмезомасштабную изменчивость в прибрежных областях на примере вихрей, реконструированных у юго-восточного побережья Крыма в июне 2006 г. На 30.05.06 юго-восточнее мыса Меганом в поле скорости было обнаружено возмущение линий тока на периферии мезомасштабного антициклонического круговорота, принесенного с востока ОЧТ. Через сутки в поле скорости уже наблюдалось циклоническое вихревое образование, просуществовавшее три дня. Динамические характеристики этого вихря представлены в таблице. Из нее видно, что в первые двое суток вихрь являлся субмезомасштабным и агеострофическим: его размер был меньше  $R_d$ , а число Россби порядка единицы. Ко 2 июня за счет взаимодействия с более крупным мезомасштабным вихрем рассматриваемый круговорот увеличился в размерах, а 3 июня в поле скорости он уже не наблюдался, по-видимому, диссипировав на шельфе.

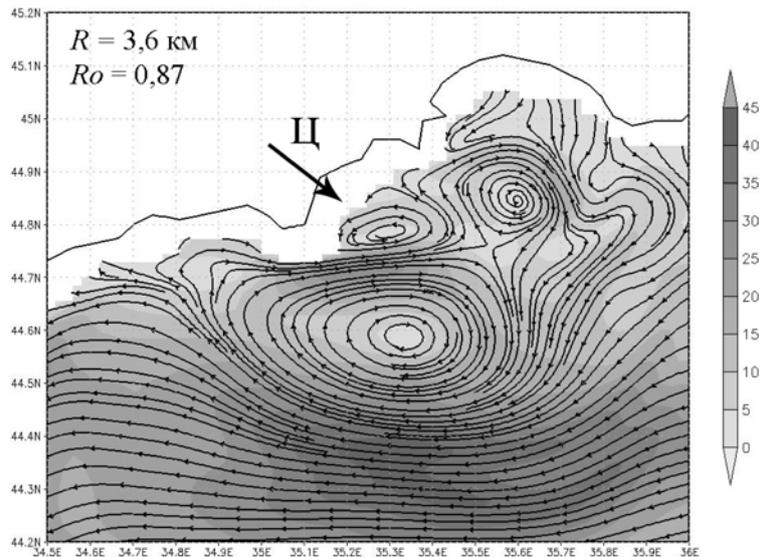
### Динамические характеристики вихрей

Дата	Радиус вихря $R$ , км	Орбитальная скорость $V_{orb}$ , см <sup>2</sup> /с	$Ro$
31.05.06	2,3	16	0,72
01.06.06	3,6	22	0,87
02.06.06	5	28	0,56
06.04.11	4,5	40	0,88
07.04.11	5	41	0,81
08.04.11	7,7	35	0,45

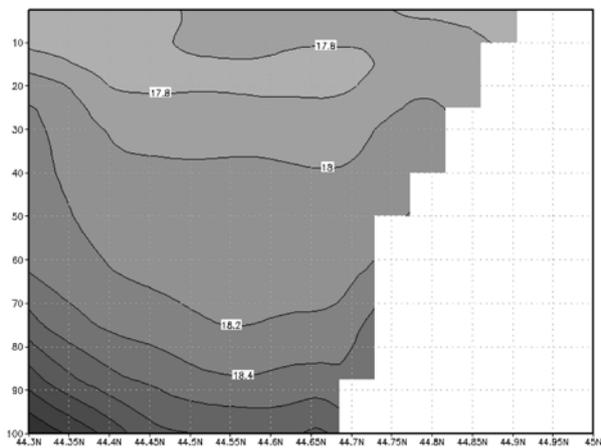
Обзор литературы, посвященной исследованию причин возникновения мелкомасштабной изменчивости в прибрежных районах Мирового океана, говорит о том, что авторы выделяют четыре основных механизма генерации вихрей: неоднородность ветрового воздействия, неустойчивость струйных течений и течений на периферии крупных вихрей, неоднородность поля плотности, топографические и орографические эффекты. Для выявления механизмов формирования мезо- и субмезомасштабных вихрей, реконструированных в наших экспериментах, были проанализированы меридиональные сечения в полях плотности и скорости, проходящие через центры вихрей. На рисунке 2 представлено поле течений 01.06.06 и соответствующие ему поля вдольбереговой компоненты скорости и солёности на разрезе вдоль 35,3° в.д. Вихрь, описанный выше, обозначен буквой «Ц» и стрелкой (рис. 2, а). Видно, что структура поля скорости однородна по глубине (рис. 2, б), по горизонтали четко прослеживается смена знака вдольбереговой компоненты скорости: у берега вектор скорости направлен на запад и модуль скорости равен 10 см<sup>2</sup>/с, в мористой части поток имеет скорость более 20 см<sup>2</sup>/с и направлен на восток. Вихрь прослеживается до глубины 40 м. При этом в поле солёности наблюдается увеличение изгиба изохалин над материковым склоном (рис. 2, в). Можно предположить, что механизм формирования рассмотренного вихря следующий. В центре относительно мощного мезомасштабного антициклона происходит опускание вод, что вызывает перепад плотности между периферией и центром вихря. На рисунке 2, в такой перепад ярко выражен у берега для изохалины 18‰. При этом увеличиваются отклонения изопикнических поверхностей и, следовательно, растёт запас доступной потенциальной

энергии. Над кромкой шельфа происходит переход энергии из потенциальной в кинетическую, и в поле скорости возникает вихрь. Анализ временного ряда синхронных разрезов в полях солёности и скорости показал, что первичной являлась аномалия плотности. Таким образом, субмезомасштабный вихрь у мыса Меганом в начале июня 2006 г. сформировался вследствие развития процессов бароклинной неустойчивости. Данный вывод согласуется с предыдущими работами автора [2], где проведен анализ работы силы плавучести, характеризующей изменение запаса доступной потенциальной энергии.

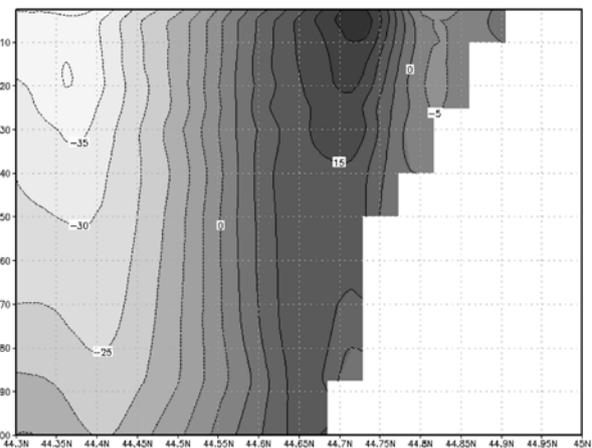
Другой процесс, приводящий к возникновению вихрей и проявления которого обнаружены в результатах наших экспериментов, – взаимодействие прибрежных течений с неоднородностями берега. Анализ поля скорости для обоих расчетов показал, что при набегании вдольберегового потока со скоростями более 40 см<sup>2</sup>/с на выступы берега (мысы) за ними образуются вихри. Области, где наиболее часто наблюдаются подобные вихри, – это акватории Керченского и Гераклеийского п-ова Крыма, побережье Северного Кавказа, Анатolianское побережье восточнее 34° в.д. Причем в южной части моря преимущественно возникают мезомасштабные вихри, что связано с пространственными размерами неоднородностей берега и топографией дна. В качестве примера рассмотрим динамику течений у мыса Боз-тепе (Турция) в апреле 2011 г. В результате набегания на мыс потока ОЧТ со скоростью более 50 см<sup>2</sup>/с в поле скорости 05.04.11 возникло возмущение линий тока. На следующие сутки за мысом сформировался вихрь (рис. 3, а), который под воздействием ОЧТ интенсифицировался, оторвался от препятствия и начал перемещаться в восточном направлении.



*a*



*б*



*в*

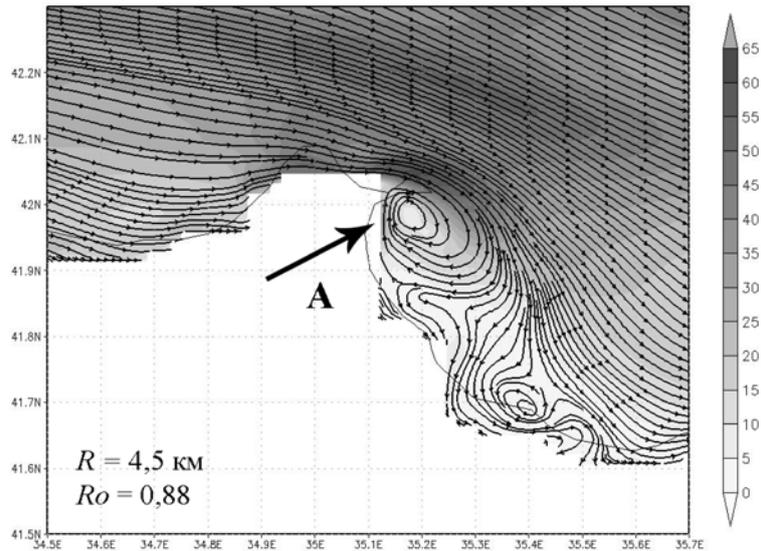
Рис. 2. Поля скорости ( $\text{cm}^2/\text{c}$ ) и солёности ( $\text{‰}$ ) 01.06.06: *a* – линии тока на горизонте 2,5 м; *б* – вдоль-береговая компонента скорости на разрезе  $35,3^\circ$  в.д.; *в* – солёность на разрезе  $35,3^\circ$  в.д.

В таблице представлены характеристики вихря с 6 по 8 апреля 2011 г. Видно, что к моменту формирования вихря число Россби было близко единице, а диаметр соизмерим с радиусом деформации, т. е. вихрь можно считать субмезомасштабным. С течением времени вихрь увеличился в размере, орбитальные скорости уменьшились и круговорот приобрел признаки уже мезомасштабного вихря. По глубине вихрь прослеживался до горизонта 30 м. Анализ изменения со временем полей солёности и вдольбереговой компоненты скорости на меридиональном разрезе вдоль  $35,25^\circ$  в.д. показал, что причиной генерации вихря послужило торможение набегающего потока на расширяющемся за мысом шельфе в слое 0–60 м (рис. 3, б), в то время как в поле солёно-

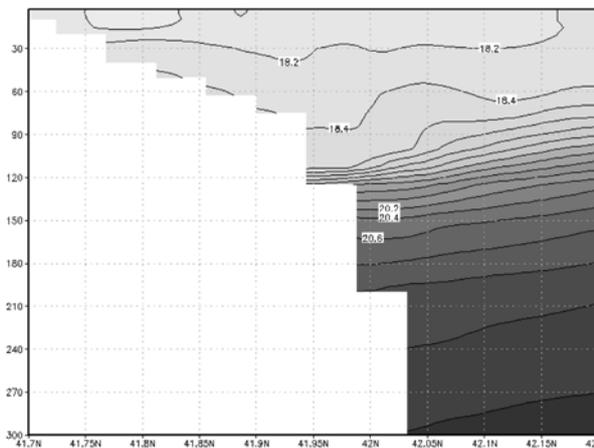
сти значительных изменений наклона изопоки не наблюдалось (рис. 3, в). Они проявились несколько позже, когда вихрь был уже сформирован. Таким образом, антициклонической вихрь за мысом Боз-тепе (Турция) в апреле 2011 г. сформировался вследствие обтекания препятствия тормозящим потоком. Анализ результатов наших расчетов подтвердил, что подобная картина наблюдалась для обоих экспериментов в различных частях моря. Данный вывод хорошо согласуется с работами [12, 24].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

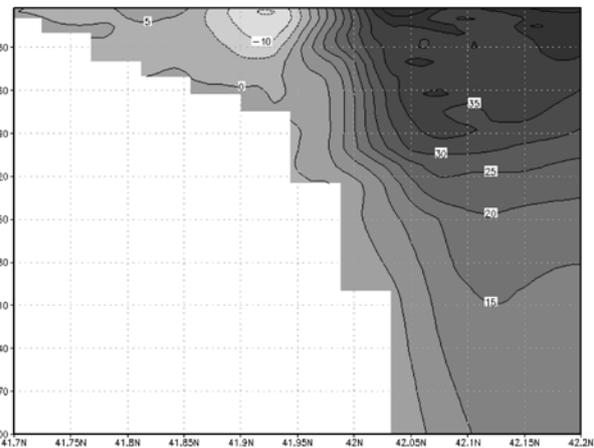
В результате работы были рассчитаны гидрофизические поля Черного моря в 2006 и 2011 гг. с высоким пространственным разрешением. Анализ полей скорости течений по-



*a*



*б*



*в*

Рис. 3. Поля скорости ( $\text{cm}^2/\text{c}$ ) и солёности ( $\text{‰}$ ) 06.04.11: *a* – линии тока на горизонте 2,5 м; *б* – вдольбереговая компонента скорости на разрезе  $35,25^\circ$  в.д.; *в* – солёность на разрезе  $35,25^\circ$  в.д.

казал, что модель МГИ с достаточной степенью точности воспроизводит мезомасштабные и субмезомасштабные особенности динамики с размерами менее 10 км. Результаты моделирования подтверждаются данными спутниковых и контактных наблюдений. Наиболее интенсивное образование мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей наблюдается в прибрежных зонах между берегом и Основным черноморским течением в окрестностях Крымского полуострова, в северо-восточной и юго-восточной частях моря при слабых ветрах любого направления.

Анализ пространственно-временной изменчивости полей солёности и вдольбереговой компоненты скорости на вертикальных сечениях, проходящих через центры вихрей, показал, что в Черном море преобладают два

основных механизма формирования прибрежных круговоротов. Первый – это бароклинная неустойчивость, возникающая при увеличении горизонтального градиента плотности за счет подъема/опускания вод на периферии крупных вихрей или течений. В результате этого процесса увеличиваются наклоны изопикнических поверхностей, запас доступной потенциальной энергии растёт и ее часть преобразуется в вихревую энергию. Вторым механизмом – это обтекание неоднородностей берега набегающим тормозящим потоком. Анализ данных эксперимента показал, что необходимым условием формирования подобных вихрей является резкое уменьшение глубины за препятствием (мысом), при этом скорость прибрежного течения должна быть более  $40 \text{ cm}^2/\text{c}$ .

Работа выполнена по теме госзадания № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гриттехнологий».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Архипкин В. С., Косарев А. Н., Гиппиус Ф. Н., Мигали Д. И. Сезонная изменчивость климатических полей температуры, солености и циркуляции вод Черного и Каспийского морей // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2013. № 5. С. 33–44.
2. Демьяшев С. Г., Дымова О. А. Исследование механизмов формирования субмезомасштабной и мезомасштабной динамики вод у побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. Вып. 28. С. 442–447.
3. Демьяшев С. Г., Кортаев Г. К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. М.: ИВМ РАН, 1992. С. 163–231.
4. Дымова О. А. Численный анализ динамики и энергетики мезомасштабных особенностей циркуляции Черного моря: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Севастополь, 2014. 151 с.
5. Кубряков А. И. Применение технологии вложенных сеток при создании системы мониторинга гидрофизических полей в прибрежных районах Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2004. Вып. 11. С. 31–50.
6. Мизюк А. И., Кортаев Г. К., Ратнер Ю. Б. Адаптация модели NEMO для выполнения прогнозов в Черном море // Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России: тезисы докл. междунауч. конф. (Казивели, 15–18 сент. 2014 г.). Севастополь, 2014. С. 181–184.
7. Морской портал МГИ [Электронный ресурс]. URL: [http://dvs.net.ru/mp/data/main\\_ru.shtml](http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml) (дата обращения: 26.10.2015).
8. Экспериментальный Центр Морских прогнозов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.innovation.org.ru/index.php> (дата обращения: 13.01.2017).
9. Demyshev S. G. A numerical model for online forecasting the Black Sea currents // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2012. Vol. 48, no. 1. P. 120–132. doi: 10.1134/S0001433812010021
10. Demyshev S. G., Dymova O. A. Numerical analysis of the mesoscale features of circulation in the Black Sea coastal zone // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2013. Vol. 49, no. 6. P. 603–610. doi: 10.1134/S0001433813060030
11. Divinsky B. V., Kuklev S. B., Zatsepin A. G., Chubarenko B. V. Simulation of submesoscale variability of currents in the Black Sea coastal zone // *Oceanology*. 2015. Vol. 55, no. 6. P. 814–819. doi: 10.1134/S000143701506003X
12. Elkin D. N., Zatsepin A. G. Laboratory study of the mechanism of the periodic eddy formation behind capes in a coastal sea // *Oceanology*. 2013. Vol. 53, no. 1. P. 24–35. doi: 10.1134/S0001437012050062
13. Enriquez C., Shapiro G., Souza A., Zatsepin A. Hydrodynamic modelling of mesoscale eddies in the Black Sea // *Ocean Dynamics*. 2005. 55(5-6): 476–489. doi: 10.1007/s10236-005-0031-4
14. Farda A., Deue M., Somot S., Horónyi A., Spiridonov V., Tóth H. Model ALADIN as a regional climate model for Central and Eastern Europe // *Studia Geophysica et Geodaeica*. 2010. 54(2): 313–332. doi: 10.1007/s11200-010-0017-7
15. Grayek S., Stanev E., Kandilarov R. On the response of the Black Sea level to external forcing: altimeter data and numerical modelling // *Ocean Dynamics*. 2010. Vol. 60, no. 1. P. 123–140. doi: 10.1007/s10236-009-0249-7
16. Karimova S. Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // *Advances in Space Research*. 2012. Vol. 50, no. 8. P. 1107–1124. doi: 10.1016/j.asr.2011.10.027
17. Klein P., Morrow R., Samelson R., Chelton D. et al. Mesoscale/sub-mesoscale dynamics in the upper ocean // *NASA Surface Water and Ocean Topography (SWOT)* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.avisio.altimetry.fr/fileadmin/documents/missions/Swot/WhitePaperSWOTSubmesoscale.pdf> (дата обращения: 14.09.2016).
18. Korotenko K. Modelling mesoscale circulation of the Black Sea // *Oceanology*. 2015. Vol. 55, no. 6. P. 820–826. doi: 10.1134/S0001437015060077
19. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. 20(4): 851–875. doi: 10.1029/RG020i004p00851
20. NonHydrostatic SKIRON/Eta Modelling System [Электронный ресурс]. URL: <http://forecast.uoa.gr/forecastnew.php> (дата обращения: 18.11.2015).
21. Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // *Ocean Modelling in an Eddy Regime*. Geophys. Monogr. Ser. 2008. Vol. 177. P. 17–38. doi: 10.1029/177GM04
22. Zalesnyi V. B., Gusev A. V., Moshonkin S. N. The numerical model of the hydrodynamics of the

Black Sea and the Sea of Azov with variational initialization of temperature and salinity // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2013. Vol. 49, no. 6. P. 642–658. doi: 10.1134/S0001433813060133

23. Zalesnyi V. B., Gusev A. V., Agoshkov V. I. Modelling the Black Sea circulation with high resolution in the coastal zone // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016. Vol. 52, no. 3. P. 277–293. doi: 10.1134/S0001433816030142

## REFERENCES

1. Arkhipkin V. S., Kosarev A. N., Gippius F. N., Migali D. I. Sezonnaya izmenchivost' klimaticheskikh polei temperatury, solenosti i tsirkulyatsii vod Chernogo i Kaspiiskogo morei [Seasonal variations of climatic fields of temperature, salinity, and water circulation in the Black and Caspian Seas]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. [Moscow Univ. Herald. Ser. 5. Geography]*. 2013. No. 5. P. 33–44.

2. Demyshev S. G., Dymova O. A. Issledovanie mekhanizmov formirovaniya submezomasshtabnoi i mezomasshtabnoi dinamiki vod u poberezh'ya Kryma [Study of formation mechanisms of submesoscale and mesoscale water dynamics near the Crimean Coast]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*. 2014. Vol. 28. P. 442–447.

3. Demyshev S. G., Korotaev G. K. Chislennaya energosbalansirovannaya model' baroklinnykh techenii okeana s nerovnym dnom na setke C [The numerical energy-balanced model of baroclinic currents of the ocean with a rough bottom grid C]. Chislennye modeli i rezul'taty kalibrovochnykh raschetov techenii v Atlanticheskom okeane [Numerical Models and the Results of Metering Calculations of the Currents in the Atlantic Ocean]. Moscow: IBM RAS, 1992. P. 163–231.

4. Dymova O. A. Chislennyi analiz dinamiki i energetiki mezomasshtabnykh osobennostei tsirkulyatsii Chernogo morya [Numerical analysis of the dynamics and energetics of the Black Sea mesoscale variability]: PhD (Cand. of Phys.-Math.) thesis. Sevastopol, 2014. 151 p.

5. Kubryakov A. I. Primenenie tekhnologii vlozhennykh setok pri sozdaniy sistemy monitoringa gidrofizicheskikh polei v pribrezhnykh raionakh Chernogo morya [The use of nesting technology to create monitoring system of the hydrophysical fields in the Black Sea coastal zones]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*. 2004. Vol. 11. P. 31–50.

24. Zatsepin A. G., Baranov V. I., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Kremenetskii V. V., Ostrovskii A. G., Soloviev D. M. Submesoscale eddies at the Caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation // *Oceanology*. 2011. Vol. 51, no. 4. P. 554–567. doi: 10.1134/S0001437011040205

Поступила в редакцию 07.02.2017

6. Mizyuk A. I., Korotaev G. K., Ratner Ju. B. Adaptatsiya modeli NEMO dlya vypolneniya prognozov v Chernom more [NEMO model adaptation for forecasting in the Black Sea]. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy narashchivaniya morskogo resursnogo potentsiala yuga Rossii: tezisy dokl. mezhd. nauch. konf. (Katsiveli, 15-18 sent. 2014 g.) [Modern Status and Prospects of Increasing Marine Resource Potential in Southern Russia: Abstracts of the Int. Sci. Conf. (Katsiveli, Sept. 15–18, 2014)]*. Sevastopol, 2014. P. 181–184.

7. Morskoi portal MGI [Marine Portal of the MHI]. URL: [http://dvs.net.ru/mp/data/main\\_ru.shtml](http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml) (accessed: 26.10.2015).

8. *Ekspperimental'nyi tsentr morskikh prognozov [Experimental centre of marine forecasting]*. URL: <http://www.innovation.org.ru/index.php> (accessed: 13.01.2017).

9. Demyshev S. G. A numerical model for online forecasting the Black Sea currents. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2012. Vol. 48, no. 1. P. 120–132. doi: 10.1134/S0001433812010021

10. Demyshev S. G., Dymova O. A. Numerical analysis of the mesoscale features of circulation in the Black Sea coastal zone. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2013. Vol. 49, no. 6. P. 603–610. doi: 10.1134/S0001433813060030

11. Divinsky B. V., Kuklev S. B., Zatsepin A. G., Chubarenko B. V. Simulation of submesoscale variability of currents in the Black Sea coastal zone. *Oceanology*. 2015. Vol. 55, no. 6. P. 814–819. doi: 10.1134/S000143701506003X

12. Elkin D. N., Zatsepin A. G. Laboratory study of the mechanism of the periodic eddy formation behind capes in a coastal sea. *Oceanology*. 2013. Vol. 53, no. 1. doi: 10.1134/S0001437012050062

13. Enriquez C., Shapiro G., Souza A., Zatsepin A. Hydrodynamic modelling of mesoscale eddies in the Black Sea. *Ocean Dynamics*. 2005. 55(5-6): 476–489. doi: 10.1007/s10236-005-0031-4

14. Farda A., Deue M., Somot S., Horányi A., Spiridonov V., Tóth H. Model ALADIN as a regional climate model for Central and Eastern Europe. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2010. 54(2): 313–332. doi: 10.1007/s11200-010-0017-7

15. Grayek S., Stanev E., Kandilarov R. On the response of the Black Sea level to external forcing: altimeter data and numerical modelling. *Ocean Dynamics*. 2010. Vol. 60, no. 1. P. 123–140. doi: 10.1007/s10236-009-0249-7
16. Karimova S. Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data. *Advances in Space Research*. 2012. Vol. 50, no. 8. P. 1107–1124. doi: 10.1016/j.asr.2011.10.027
17. Klein P., Morrow R., Samelson R., Chelton D. et al. Mesoscale/sub-mesoscale dynamics in the upper ocean. NASA Surface Water and Ocean Topography (SWOT). URL: <http://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/missions/Swot/WhitePaperSWOTSubmesoscale.pdf> (accessed: 14.09.2016).
18. Korotenko K. Modelling mesoscale circulation of the Black Sea. *Oceanology*. 2015. Vol. 55, no. 6. P. 820–826. doi: 10.1134/S0001437015060077
19. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. 20(4): 851–875. doi: 10.1029/RG020i004p00851
20. *NonHydrostatic* SKIRON/Eta Modelling System. URL: <http://forecast.uoa.gr/forecastnew.php> (accessed: 18.11.2015).
21. Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics. *Ocean Modelling in an Eddy Regime. Geophys. Monogr. Ser.* 2008. Vol. 177. P. 17–38. doi: 10.1029/177GM04
22. Zalesnyi V. B., Gusev A. V., Moshonkin S. N. The numerical model of the hydrodynamics of the Black Sea and the Sea of Azov with variational initialization of temperature and salinity. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2013. Vol. 49, no. 6. P. 642–658. doi: 10.1134/S0001433813060133
23. Zalesnyi V. B., Gusev A. V., Agoshkov V. I. Modelling the Black Sea circulation with high resolution in the coastal zone. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016. Vol. 52, no. 3. P. 277–293. doi: 10.1134/S0001433816030142
24. Zatsepin A. G., Baranov V. I., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Kremenetskii V. V., Ostrovskii A. G., Soloviev D. M. Submesoscale eddies at the Caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation. *Oceanology*. 2011. Vol. 51, no. 4. P. 554–567. doi: 10.1134/S0001437011040205

Received February 7, 2017

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Дымова Ольга Алексеевна**  
научный сотрудник, к. ф.-м. н.  
Морской гидрофизический институт РАН  
ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия, 299011  
эл. почта: [olgadym@yahoo.com](mailto:olgadym@yahoo.com)  
тел.: +79788890293

#### CONTRIBUTOR:

**Dymova, Olga**  
Marine Hydrophysical Institute,  
Russian Academy of Sciences  
2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia  
e-mail: [olgadym@yahoo.com](mailto:olgadym@yahoo.com)  
tel.: +79788890293