

УДК 551.465

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2015 г. К. А. Коротенко

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: kkorotenko@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.06.2015 г., после доработки 21.07.2015 г.

Представлена вихререзающая  $(1/30)^\circ$  версия слабодиссипативной модели DieCAST, адаптированная для расчета циркуляции Черного моря. При среднеклиматическом форсинге, модель реалистично имитирует многие из доминирующих крупномасштабных и мезомасштабных структур сезонной циркуляции моря, включая Основное черноморское течение, антициклонические прибрежные вихри, грибовидные течения и др. Благодаря своей чрезвычайно слабой диссипативности и высокому разрешению, модель позволяет проследить развитие бароклинной неустойчивости вдоль побережья Турции и Кавказа, воспроизводить мезомасштабные структуры, порождаемые этим механизмом и оценить их масштабы. Модель также реалистично воспроизводит короткопериодные воздействия штормовых ветров (бора) на эволюцию приповерхностного слоя моря.

DOI: 10.7868/S0030157415060076

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследованию мезомасштабных структур циркуляции моря уделяется особое внимание, поскольку они играют важную роль в процессах обмена между открытыми водами и прибрежной зоной моря. Каждый элемент циркуляции играет определенную роль в этих процессах переноса. Так, устойчивость течений, способствует аккумуляции загрязнений в прибрежной зоне моря, а их неустойчивость – рассеянию и процессам самоочищения прибрежных вод. Важную роль, при этом, играют прибрежные антициклонические вихри (ПАЦВ), которые часто аккумулируют загрязнения, поступающие, например, со стоком рек, и вентилируют окружающие воды. Вихревые диполи и грибовидные течения также способствуют процессам обмена вод между прибрежной зоной и открытым морем. Важную роль в процессах обмена играют также зоны апвеллинга, приводящие к очищению прибрежных вод и/или насыщению их питательными веществами. На рис. 1 приведен снимок спутникового сканера цвета SeaWiFS, иллюстрирующий многообразие мезомасштабных структур в приповерхностном слое Черного моря.

Изучение мезомасштабных структур циркуляции Черного моря имеет многолетнюю историю [1, 2, 6, 9, 10, 14, 17–19]. На схеме, показанной на рис. 2, обобщается разномасштабная структура циркуляции вод Черного моря, составленная на основе многолетних инструментальных и спутниковых наблюдений [9]. Главным элементом этой схемы является Основное черноморское течение (ОЧТ) – кольцевое вдольбереговое цикло-

ническое течение, стрежень которого находится над изобатой 500 м, а ширина составляет 20–50 км. Как показывают натурные исследования, ОЧТ имеет четкие сезонные различия: оно слабеет в летний период и усиливается в зимний. По периферии ОЧТ окружают многочисленные, преимущественно прибрежные антициклонические вихри, которые вклиниваются между ОЧТ и континентальным шельфом. Кроме того, небольшие ПАЦВ аperiodически появляются вдоль берегов Турции и Кавказа и, которые могут играть роль ловушек загрязнения и его доставки вдоль побережья, как показывают спутниковые наблюдения, в места далекие от их происхождения.

Следует заметить, что не все ПАЦВ показанные на рис. 2, возникают одновременно. Наблюдения показывают, что формирование ПАЦВ идет более интенсивно в теплое время года, когда ОЧТ значительно меандрирует, теряя устойчивость. Так, количество образующихся ПАЦВ в весенне-летний период отмечались в течение 16–18 суток, в то время как в летне-осенний в течение 9–10 суток. “Время жизни” ПАЦВ в летний период составляет 6–14, а в зимний период уменьшается до 3–6 суток [9]. Наряду с ПАЦВ, которые встречаются чаще в прибрежной зоне, в открытом море слева от ОЧТ, как показывает рис. 2, генерируются циклонические мезомасштабные вихри, время жизни у которых значительно меньше, чем у ПАЦВ.

Отметим, что долгоживущие вихри открытого моря диаметром 80–100 км наблюдаются в слое от поверхности до 300–400 м, а вихри с малым “временем жизни” слое 0–50 м. Как показывают чис-

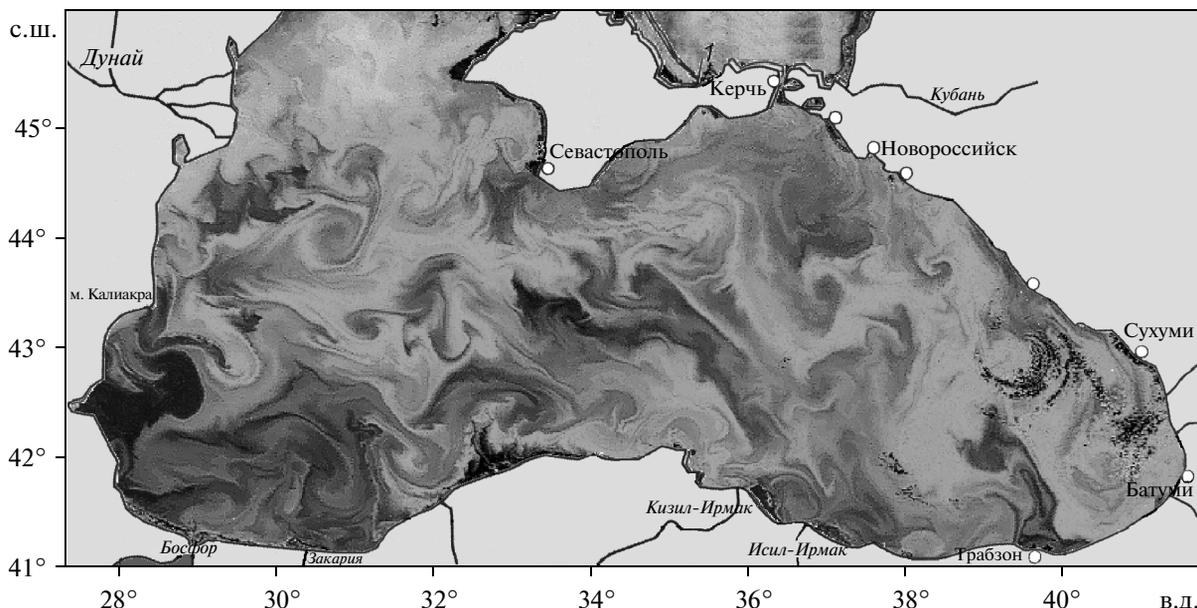


Рис. 1. Мезомасштабные структуры Черного моря. Снимок спутникового сканера цвета SeaWiFS (11.06.2000).

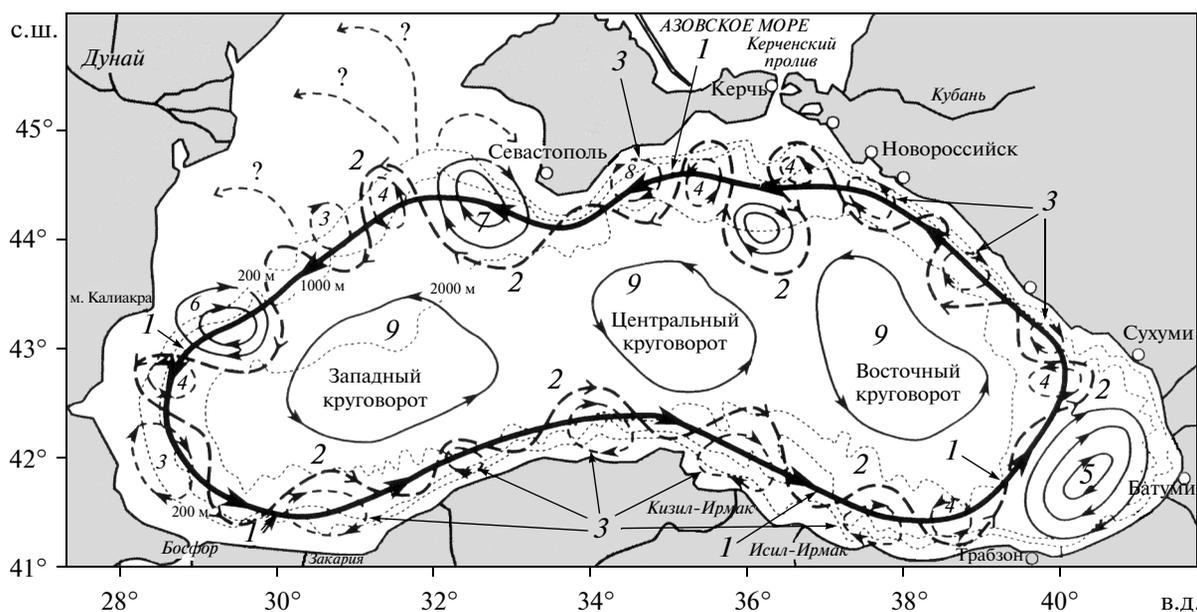


Рис. 2. Сводная схема циркуляции Черного моря. Обозначения: 1 – ОЧТ; 2 – меандры ОЧТ; 3 – ПАЦВ; 4 – циклонические вихри; 5 – БАЦВ; 6 – Калиакринский АЦВ; 7 – САЦВ; 8 – Ялтинский АЦВ; 9 – квазистационарные циклонические круговороты (по [9]).

ленные расчеты, крупнейшие антициклонические вихри могут расти до 100–150 км в диаметре, а их толщина достигать 100–200 м [8, 17]. Так называемый Батумский антициклонический вихрь (БАЦВ) может расти и заполнить весь восточный угол Черного моря, оставаясь там в течение нескольких месяцев. Другой крупнейший т.н. Севастопольский антициклонический вихрь (САЦВ) периодически генерируется (с периодом ~3 недели) над очень крутым континентальным

склоном, лежащим к югу от п-ва Крым. В отличие от БАЦВ, который диссипирует, не выходя из восточной части моря, САЦВ отрывается от Крымского п-ва и перемещается на периферии ОЧТ как замкнутое вихреобразование вдоль континентального склона в юго-западном направлении [14].

Следует отметить, что схема, приведенная на рис. 2, не является полной. Как показывают интенсивные исследования последнего десятилетия [4] прибрежные антициклонические вихри,

порождаемые ОЧТ, могут, в свою очередь, способствовать генерации прижатых к берегу субмезомасштабных циклонических вихрей, размеры которых не превышают 2–4 км. Такие вихри появляются весной и летом, в периоды наиболее интенсивного меандрирования ОЧТ и генерации ПАЦВ. Одним из механизмов генерации их является сдвиговая неустойчивость вдольберегового течения [4]. Аналогичная система вихрей, как показали численные эксперименты по моделированию циркуляции Адриатического моря [12], периодически возникала за мысом Гаргано (Италия).

## 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для исследования мезомасштабной циркуляции Черного моря выбрана  $z$ -координатная слабо-диссипативная модель циркуляции океана DieCAST с приближением “твердой крышки”. Детальное описание архитектуры модели можно найти на сайте <http://efdl.as.ntu.edu.tw/research/diecast> и в работах [13, 16, 17], поэтому остановимся лишь на особенностях адаптации ее к Черному морю.

Расчетная сетка модели охватывает весь бассейн Черного моря от  $27.2^\circ$  до  $42^\circ$  в.д. и от  $40.9^\circ$  до  $46.6^\circ$  с.ш. и содержит  $426 \times 238$  ячеек по горизонтали и 30 неравномерно расположенных уровней по вертикали. Разрешение по долготе выбиралось равным 2 морским минутам (в работе использовалась несглаженная топография дна ETOPO2), а по широте оно менялось так, чтобы отношение размеров горизонтальных ячеек  $\Delta X/\Delta Y$  сохранялось равным единице. Таким образом, размеры квадратных ячеек менялись только с широтой от 2.6 до 2.8 км.

Шаг по вертикали был неоднороден, со сгущением сетки у поверхности моря для лучшего разрешения сезонного термоклина. Так, положение интерфейсов ячеек было выбрано на горизонтах 0, 3, 6, 10, 14, 18, 23, 29, ..., 17892 и 2221 м. Разрешение по вертикали 3 м у поверхности обеспечивало адекватное описание динамики квазиодного слоя. При ступенчатом представлении топографии дна донное трение (его коэффициент взят постоянным и равным 0.0025) прикладывается только к горизонтальным поверхностям. Для вертикальных поверхностей оно принято равным нулю.

Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии тепла и соли (КГТВид) задавались постоянными и равными  $3\text{--}10 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ , что и определяло низкую диссипативность модели и позволяло воспроизводить мезомасштабные ПАЦВ. Заметим, что для устойчивости модели в течение первых 5 расчетных года модель запускалась с максимальными КГТВид, затем счет проводился с минимальными КГТВид. Численная схема 4-го порядка аппроксимации обеспечивала

устойчивость счета при выбранном шаге по времени 10 мин.

Для расчета вертикальной диффузии тепла и соли, а также вязкости в модели использовалась “ $k\text{--}\varepsilon\text{--}\tau$ ” модель турбулентности с замыканием второго порядка для диффузионных членов, описывающих кинетическую энергию турбулентности  $k$  и ее диссипации  $\varepsilon$ . Для оценок напряжений Рейнольдса  $\tau$  в модели турбулентности использовались алгебраические выражения Лаундера–Сполдинга [7]. Применение “ $k\text{--}\varepsilon\text{--}\tau$ ” модели вместо модели Пакановского–Филандера, используемой в оригинальной версии DieCAST [13], позволило адекватно описывать процессы генерации и диссипации турбулентной энергии в приповерхностном слое, что существенно сказалось на адекватности воспроизведения годового цикла процесса прогрева–охлаждения поверхностного активного слоя моря и воздействия аномально сильных ветров типа боры.

Особенностью модели является использование четвертого порядка точности для аппроксимации всех адвективных членов и членов горизонтального градиента давления за исключением тех контрольных объемов, которые примыкают к границам расчетной области. Здесь эти члены рассчитываются со вторым порядком точности. Кроме того, в модели применяется комбинация численных сеток: сетка “А” и сетка “С” так, что DieCAST может рассматриваться как “А” сеточная модель, в которой на сетке “С” решается уравнение неразрывности. Заметим, что при расчете члена Кориолиса, дающего значительный вклад в величину скорости течения, на коллокационной сетке “А” ошибка интерполяции по пространству минимальна.

Для инициализации модели использовались среднемесячные январские данные температуры и солёности. Модель запускалась из состояния покоя (т.е. везде скорость течения была равна нулю), а для ее “раскрутки” использовались средне-многолетние (ежемесячные) данные по напряжению ветра, потокам тепла, испарению  $E$ , осадкам  $P$  и стоку рек [17]. Сток рек – 31 река по периметру Черного моря – задавался по среднеклиматическим данным [15], которые интерполировались так, чтобы годовой цикл был непрерывен. Для 11-ти основных рек (кроме Дуная) задавался среднемесячный сток. Стоки пресной воды добавлялись к отношению  $P\text{--}E$  через области проникаемой поверхности моря вблизи устьев рек. С учетом объема стока каждой реки рассчитывалась вертикальная скорость в соответствующей точке сетки. Детально этот алгоритм описан в [17]. Для задания стока р. Дунай ее дельта представлялась в виде 4 точек на сетке.

Поскольку обмен через Босфор играет важную роль в водном балансе и циркуляции Черного мо-

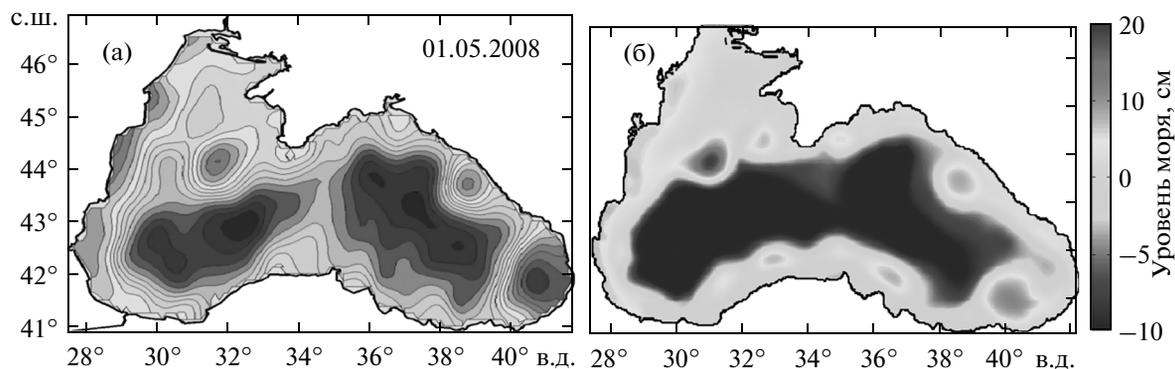


Рис. 3. Аномалии уровня моря по данным спутниковых наблюдений для 01.05.2008 г. (а) и рассчитанных в модели по давлению на поверхности моря (б).

ря, то для его реалистического описания, аналогично [17], был задан двухслойный поток для поддержания сохранения объемов воды и соли. Для верхне- и нижне-босфорского течений применялись граничные условия Дирихле. Приток воды из Азовского моря через Керченский пролив принимался аналогичным речному стоку и равным среднегодовому объему  $15.5 \text{ км}^3 \text{ год}^{-1}$ .

Время “раскручивания” модели для получения квазипериодического режима циркуляции составило 24 года, хотя основные черты циркуляции Черного моря, такие как ОЧТ и циклонические круговороты, волны Россби и захваченные прибрежные волны появляются уже спустя 5 расчетных лет. Модель хорошо воспроизводит интенсификацию ОЧТ в зимний период и его ослабление и меандрирование в теплое время года, как это следует из натуральных наблюдений. Контроль квазипериодичности режима проводился по средней по объему и по горизонтам кинетической энергии. Особое внимание при этом уделялось придонному слою, который будет исследоваться в дальнейших работах. В приповерхностных слоях выделяется характерный сезонный ход интегральной кинетической энергии, отражающий большую интенсивность ветра в зимний период и меньшую — в летний.

Проверка модели включала сравнение с известными характеристиками общей циркуляции и мезомасштабными структурами Черного моря, полученными по данным спутниковых наблюдений [12, 14, 19], измерений [6, 9, 10] и экспериментов с дрейфующими буями [3, 19]. Полученные результаты также сравнивались с теми, что были получены с помощью более грубой модели с разрешением  $(1/12)^\circ$  [8, 17].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты численного моделирования показывают, что модель адекватно воспроизводит

фундаментальные особенности динамики Черного моря. Видны сезонные колебания ОЧТ, циклонические круговороты в глубоководной части моря, многочисленные антициклонические меандры ОЧТ и вихри, находящиеся между ОЧТ и берегом, и другие структуры, которые схематично показаны на рис. 2. На рис. 3 дано сравнение возвышений уровня моря, полученных по данным спутниковых наблюдений (<http://www.avisioceanobs.com>) для 1 мая 2008 г. и полученного по расчетам для среднеклиматического мая. Хорошо прослеживаются БАЦВ, САЦВ и малые ПАЦВ вдоль кавказского, турецкого и крымского побережий, такие как Босфорский, Синопский, Кизилрмакский, Кавказский и Керченский и др.

Заметим, что квазистационарность САЦВ, отмечающаяся во многих натуральных исследованиях, следует понимать условно так, что к западу от Севастополя периодически формируется мощный антициклонический вихрь, который затем “скачивается” по ОЧТ к берегам Болгарии, где он диссипирует. Траекторию САЦВ ранее удалось детально воспроизвести по результатам спутниковых съемок температуры поверхности моря. В работе [14] дан анализ траектории движения этого вихря в июне—августе 1998 г., показавший, что время перемещения вихря от места зарождения до м. Калиакра (Болгария) составляет около 3-х месяцев. Это хорошо согласуется с полученными в данной работе оценками по движению САЦВ.

Модель показывает, что к западу от Крыма, время от времени, появляются трипольные структуры из двух последовательно сформированных антициклонов и циклона. Такие структуры ранее удалось зарегистрировать по данным гидрографических съемок и по спутниковым наблюдениям [6, 14].

Из модельных расчетов следует, что процесс формирования и последующего распада БАЦВ отчетливо прослеживается в период с апреля по сентябрь. При этом БАЦВ при определенных

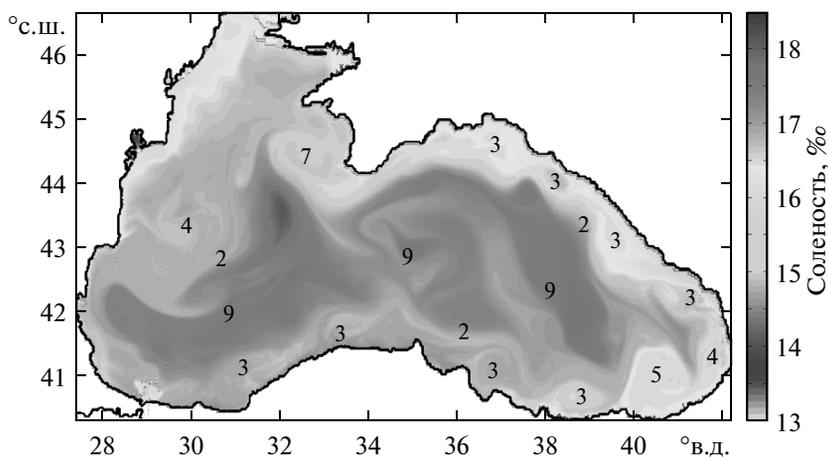


Рис. 4. Распределение солености на поверхности моря. Номера мезомасштабных структур соответствуют обозначениям на рис. 2.

условиях (обычно апреле–мае) формируется из ПАЦВ, зарождающегося у берега Турции в районе  $38^\circ$  в.д. Увлекаемый и подпитываемый ОЧТ этот ПАЦВ, разрастаясь в летний период в восточной части моря на траверзе г. Батуми, приводит к отклонению ОЧТ к западу. Далее, в сентябре БАЦВ вытесняется двумя циклоническими вихрями, в результате чего появляется трипольная структура в восточной части моря. В дальнейшем БАЦВ диссипирует в районе к северу от г. Сухуми (Грузия), а на его месте в октябре формируется мощный циклонический круговорот, который прослеживается вплоть до января. Отметим, что применявшаяся ранее  $(1/12)^\circ$  версия модели [8, 17] не позволила выявить упомянутые выше трипольную структуру при диссипации БАЦВ.

В согласии с натурными наблюдениями, модель показывает, что процесс интенсивного формирования ПАЦВ у берегов Турции и северо-восточного побережья Черного моря наблюдается с марта по август. При этом сформированные вихри движутся вдоль берега, “увлекаемые” ОЧТ.

Генерация ПАЦВ происходит, в основном, при обтекании мысов и подводных хребтов, а также за счет бароклинной неустойчивости прибрежных течений. Высокое разрешение модели (размер ячейки  $\ll$  внутреннего радиуса деформации  $\sim 5\text{--}15$  км) позволяет воспроизводить этот механизм, как показано ранее в [12]. Особенно этот эффект может проявляться в районах стока рек вдоль кавказского и турецкого берегов, а также на северо-западном шельфе, где значительно влияние стока р. Дунай. На рис. 4 показано модельное распределение солености, на котором виден каскад антициклонических вихрей вдоль побережья Кавказа и Турции, а также БАЦВ и САЦВ. На рис. 4 показаны также другие элементы мезомасштабной циркуляции, соответствующие рис. 2. Эти структуры хорошо видны также и в поле скорости (см. рис. 5 в работе [16]).

Отметим, что описанные выше мезомасштабные структуры Черного моря хорошо согласуются с аналогичными структурами, полученными с помощью высокоразрешающей модели, разработанной в [1, 2].

Важным этапом валидации модели является проверка реакции поверхностного моря на эпизодические воздействия сильного ветра. Примером может служить т.н. Новороссийская бора — сильный северо-восточный ветер, который возникает в периоды, когда холодный атмосферный фронт подходит к прибрежному хребту с северо-востока. Холодный фронт сразу же переваливает через невысокий хребет. Под воздействием силы тяжести холодный воздух “скатывается” вниз по горному хребту, приобретая при этом большую скорость. Вследствие неравномерного экранирующего действия гор воздействие боры на поверхность моря становится пространственно неоднородным [11]. Максимальные значения магнитуды северо-восточного ветра наблюдаются в районе Анапа–Туапсе. Южнее Туапсе блокирующее влияние высоких Кавказских гор подавляет бору.

При моделировании влияния боры вместо среднеклиматического ветра для апреля были использованы данные с портала <http://dvs.net.ru/np/index.shtml> для апреля 2013 г. В период боры отмечался сильный северо-восточный ветер, достигавший 17 апреля 2009 г. в районе Новороссийска 35 м/с (рис. 5а). Как показало моделирование, бора вначале способствовала кратковременной интенсификации прибрежной ветви ОЧТ и связанного с ним переноса прогретых вод из грузинского сектора Черного моря на север акватории. Затем, с 17.04.2009 сильный северо-восточный ветер стал причиной стога в северной части российского сектора Черного моря. В результате этого явления в прибрежной зоне произошел подъем глубинных вод, из-за чего температура поверхности моря здесь упала ниже  $10^\circ\text{C}$ ,

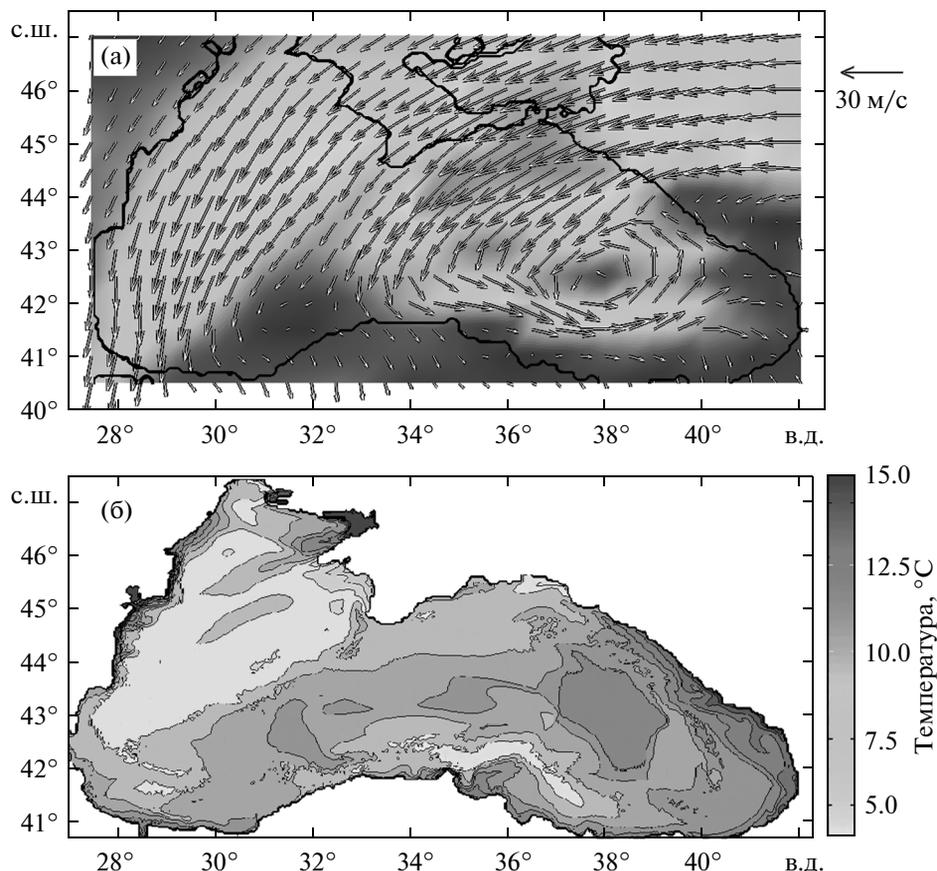


Рис. 5. Северо-восточный ветер (бора) 17.04.2013 г. (а) и модельная температура поверхности моря (б).

а в районе Керченского пролива и на северо-западном шельфе — ниже  $5^{\circ}\text{C}$  (рис. 5б). Интересным проявлением воздействия боры явилось прерывание теплой струи, идущей вдоль берега от побережья Грузии. На рис. 5б видно, что теплая струя ОЧТ с температурой  $\sim 15^{\circ}\text{C}$ , ранее достигавшая Крыма, при боре обрывается в районе Новороссийска, что подтверждалось также спутниковыми наблюдениями. Важно отметить, что сразу же после ослабления боры началось быстрое распространение теплой воды на северо-запад вдоль побережья в виде узкой (порядка 20 км) струи. По результатам моделирования, передний фронт этой струи менее чем за неделю достиг Керченского пролива. Подобная эволюция прибрежной струи при усилении северо-восточного ветра была ранее исследована инструментально Зацепиным с соавт. [5] при схожих метеоусловиях, наблюдавшихся в июне—июле 2006 г. Следует однако отметить, что северо-восточный ветер 15—19 апреля 2013 г. охватывал практически все Черное море, поэтому понижение температуры воды также наблюдалось и в северо-западной части моря.

#### 4. ВЫВОДЫ

В работе предложена  $(1/30)^{\circ}$  версия вихререшающей модели DieCAST для Черного моря с “ $k-\epsilon-\tau$ ” модулем турбулентности. Модель позволяет воспроизводить основные черты крупно- и мезомасштабной циркуляции Черного моря. Применение “ $k-\epsilon-\tau$ ” модели позволило более точно описать годовой цикл прогрева—охлаждения поверхностного слоя моря и его отклик на воздействия сильных ветров типа Новороссийской боры. Годовой цикл прогрева—охлаждения показал достаточно хорошее совпадение с климатическими данными Белокопытова (см. рис. 6б в [17]).

Как показали расчеты Севастопольский, Босфорский, Синопский, Кизилирмакский, Кавказский и Керченский антициклонические вихри являются квазипериодическими структурами. Между берегом и ОЧТ генерируются и эволюционируют мезомасштабные вихри ПАЦВ. Вдоль восточной части Анатолийского побережья в результате влияния нерегулярной топографии дна и речного стока непрерывно формируются мезомасштабные ПАЦВ. Увлекаемые ОЧТ они движутся вдоль берега, достигают юго-восточной части моря и способствуют образованию БАЦВ.

Благодаря своей чрезвычайно слабой диссипативности и высокому разрешению (размер ячейки значительно меньше внутреннего радиуса деформации), модель позволяет проследить процесс формирования вихревых структур вдоль побережья Черного моря за счет бароклинной неустойчивости.

Предлагаемая модель будет базовой для дальнейшего исследования мезомасштабных и субмезомасштабных структур, а также придонных течений в Черном море.

Автор благодарит Д.Е. Дитриха за помощь в адаптации и настройки модели для Черного моря, а также анонимного рецензента за полезные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского национального фонда (грант № 14-50-00095).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьшев С.Г. Численный прогностический расчет течений в Черном море с высоким горизонтальным разрешением // Морск. гидрофиз. журн. 2011. № 1. С. 36–47.
2. Демьшев С.Г., Дымова О.А. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 655–663.
3. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В. и др. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейферным данным // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 34–48.
4. Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О. и др. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
5. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Пиотух С.Г. и др. Формирование прибрежного течения в Черном море из-за пространственно-неоднородного ветрового воздействия на верхний квазиоднородный слой // Океанология. 2008. Т. 48. № 2. С. 1–17.
6. Зацепин А.Г., Флинт М.В. (ред.) Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. 460 с.
7. Коротенко К.А. Адаптивная модель для оценки параметров турбулентности в придонном слое океана // Океанология. 1992. Т. 32. № 5. С. 730–738.
8. Коротенко К.А. Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Черном море // Океанология. 2003. Т. 43. № 3. С. 367–378.
9. Кривошея В.Г., Титов В.Б., Овчинников И.М. и др. Новые данные о режиме течений на шельфе северо-восточной части Черного моря // Океанология. 2001. Т. 41. № 3. С. 325–334.
10. Титов В.Б. О роли вихрей в формировании режима течений на шельфе Черного моря и в экологии прибрежной зоны // Океанология. 1992. Т. 32. № 1. С. 39–48.
11. Alpers W., Ivanov A., Horstmann J. Observations of Bora events over the Adriatic Sea and Black Sea by spaceborne synthetic aperture radar // Mon. Weather Rev. 2009. V. 137. P. 1150–1161.
12. Cushman-Roisin B., Korotenko K.A., Galos C.E. et al. Simulation and characterization of the Adriatic Sea mesoscale variability // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. C03S14. P. 1–13.
13. Dietrich D.E., Lin C.A., Mestas-Nunez A. et al. A High Resolution Numerical Study of Gulf of Mexico Fronts and Eddies // Meteorol. Atmos. Phys. 1997. V. 64. P. 187–201.
14. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Nezlin N.P. et al. Anticyclonic eddies in the northwestern Black Sea // J. Mar. Syst. 2002. V. 32. P. 91–106.
15. Jaoshvily S. The Rivers of the Black Sea. Technical Report № 71. Europ. Envir. Agency. 2002. 58 p. [http://www.eea.europa.eu/publications/technical\\_report\\_2002\\_71](http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2002_71).
16. Korotenko K., Bowman M., Dietrich D. High-resolution model for predicting the transport and dispersal of oil plumes resulting from accidental discharges in the Black Sea // Terr. Atmosph. Ocean. Sci. 2010. V. 21. № 1. P. 123–136.
17. Staneva J.V., Dietrich D.E., Stanev E.V. et al. Rim Current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving Black Sea general circulation model // J. Mar. Syst. 2001. № 31. P. 137–157.
18. Sur H.I., Ozsoy E., Unluata U. Boundary current instabilities, upwelling, shelf mixing and eutrophication processes in the Black Sea // Prog. Oceanography. 1994. V. 33. № 4. P. 249–302.
19. Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al. Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. C3246. P. 1–20.

## Modeling Mesoscale Circulation of the Black Sea

K. A. Korotenko

An eddy-resolving (1/30)<sup>o</sup> version of the low-dissipative ocean circulation model DieCAST adapted for predicting the circulation of the Black Sea is presented. Under mean climatology forcing, the model realistically reproduces major dominant large-scale and mesoscale seasonal structures of the sea circulation, including the Rim Current, coastal anticyclonic eddies, mushroom currents etc. Due to its extremely low dissipation and high resolution, the model allows tracing processes of baroclinic instability development along the Turkish and Caucasian coasts as well as reproducing mesoscale structures generated by this mechanism and assessing their scales. The model also realistically reproduces the impact of short-term strong wind forcing (Bora) on the evolution of the sea surface circulation.