

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.465

С.Г. Демьшев

Численный прогностический расчет течений в Черном море с высоким горизонтальным разрешением

Представлены результаты численного прогностического эксперимента с разрешением 1,64 км по горизонтальным координатам. В отличие от расчетов с более грубым разрешением получены следующие динамические особенности. Основное Черноморское течение как непрерывная струя, направленная вдоль свала глубин, прослеживается до 400 м. Вдоль восточной части Анатолийского побережья регулярно образуются мезомасштабные антициклонические вихри, которые влияют на формирование Батумского антициклона. Севастопольский, Синопский, Кизилирмакский и Кавказский антициклонические вихри являются квазипериодическими. Между вновь образованным Севастопольским антициклоном и предыдущим вихрем формируется область циклонического вращения вод.

Ключевые слова: Черное море, численная модель, синоптические и мезомасштабные вихри.

Введение

К настоящему времени общепринято, что циркуляция в Черном море представляет собой обширный циклонический круговорот, по периферии которого периодически возникают и эволюционируют синоптические (с диаметром от нескольких десятков до сотен километров) и мезомасштабные (от нескольких до десятков километров) вихри (см., например, [1]). Синоптические вихри могут быть квазистационарными (Батумский антициклон) и квазипериодическими (Севастопольский, Синопский и др.). По спутниковым данным поверхностной температуры неоднократно фиксировались вихри с радиусом порядка десяти километров. Они наблюдались в области Анатолийского и Кавказского побережий. Насколько такие вихри важны в обмене энергией и перераспределении импульса, тепла и соли между движениями различных масштабов?

Для ответа на этот вопрос, помимо натурных исследований, необходимы численные эксперименты с пространственным разрешением, позволяющим аккуратно аппроксимировать мезомасштабные структуры – вихри и течения. В данной работе приводятся первые результаты прогностического расчета с разрешением 1,64 км по горизонтальным координатам. Получены особенности в поведении Основного Черноморского течения (ОЧТ), Батумского, Севастопольского антициклонов и прибрежных мезомасштабных вихрей.

Уравнения модели

Система уравнений модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды [2] имеет вид

$$u_t - (\xi + f)v + wu_z = -g\rho_0\zeta_x - \frac{1}{\rho_0}(P^1 + E)_x + (v_V u_z)_z - v_H \nabla^4 u, \quad (1)$$

$$v_t + (\xi + f)u + wv_z = -g\rho_0\zeta_y - \frac{1}{\rho_0}(P^1 + E)_y + (v_V v_z)_z - v_H \nabla^4 v, \quad (2)$$

$$P = g\rho_0\zeta + g \int_0^z \rho d\mu = g\rho_0\zeta + P^1, \quad (3)$$

$$u_x + v_y + w_z = 0, \quad (4)$$

$$\zeta_t + \int_0^H (u_x + v_y) dz = (Pr - Ev) / \rho_1, \quad (5)$$

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = -\kappa^H \nabla^4 T + (\kappa^T T_z)_z, \quad (6)$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = -\kappa^H \nabla^4 S + (\kappa^S S_z)_z, \quad (7)$$

$$\rho = \varphi(T, S), \quad (8)$$

где $\xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f$, $E = \rho_0 \frac{u^2 + v^2}{2}$. Остальные обозначения общепринятые [2]. Заметим, что уравнение (5) получено в предположении выполнения линейризованного кинематического условия

$$w = -\zeta_t + \frac{Pr - Ev}{\rho_1}.$$

Для системы уравнений (1) – (8) краевые условия следующие.

На поверхности $z = 0$

$$v_V u_z = -\tau^x, v_V v_z = -\tau^y, \kappa^T T_z = Q^T, \kappa^S S_z = \frac{Ev - Pr}{\rho_1} S_0 + \beta(S^{cl} - S_0), \quad (9)$$

где τ^x, τ^y – касательное напряжение трения ветра; Q^T – поток тепла; Ev – испарение морской воды; Pr – осадки; S_0 – поверхностная соленость; S^{cl} – климатическая соленость; ρ_1 – плотность морской воды; β – параметр релаксации.

На дне $z = H(x, y)$

$$u = v = w = 0, T_z = 0, S_z = 0. \quad (10)$$

На твердых боковых стенках:

для меридиональных участков границы

$$\begin{aligned} u = 0, \quad \nabla^2 u = 0, \quad v_x = 0, \quad \nabla^2 v_x = 0, \\ T_x = 0, \quad (\nabla^2 T)_x = 0, \quad S_x = 0, \quad (\nabla^2 S)_x = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

для зональных участков границы

$$\begin{aligned} v = 0, \quad \nabla^2 v = 0, \quad u_y = 0, \quad \nabla^2 u_y = 0, \\ T_y = 0, \quad (\nabla^2 T)_y = 0, \quad S_y = 0, \quad (\nabla^2 S)_y = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

На участках границы, где вода втекает, используются условия Дирихле:
для меридиональных участков

$$\begin{aligned} u = u^p, \quad \nabla^2 u = 0, \quad v_x = 0, \quad \nabla^2 v_x = 0, \\ T = T^p, \quad S = S^p, \quad (\nabla^2 T)_x = 0, \quad (\nabla^2 S)_x = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

для зональных участков

$$\begin{aligned} v = v^p, \quad \nabla^2 v = 0, \quad u_y = 0, \quad \nabla^2 u_y = 0, \\ T = T^p, \quad S = S^p, \quad (\nabla^2 T)_y = 0, \quad (\nabla^2 S)_y = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Для верхнебосфорского течения и Керченского пролива, когда течение направлено из Черного моря в Азовское,

$$\begin{aligned} v = v^s, \quad \nabla^2 v = 0, \quad u_y = 0, \quad \nabla^2 u_y = 0, \\ T_y = 0, \quad S_y = 0, \quad (\nabla^2 T)_y = 0, \quad (\nabla^2 S)_y = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

В качестве начальных при $t = t^0$ потребуем выполнение следующих условий:

$$u = u^0(x, y, z), \quad v = v^0(x, y, z), \quad \zeta = \zeta^0(x, y), \quad T = T^0(x, y, z), \quad S = S^0(x, y, z). \quad (16)$$

Система уравнений (1) – (8) с соответствующими краевыми (9) – (15) и начальными (16) условиями решалась численно.

Условия проведения эксперимента

За начальные поля принимались климатические температура, соленость, уровень и скорость течений, полученные ранее в работе [3]. Начальный момент соответствовал 1 ноября.

Для расчета на поверхности моря использовалось касательное напряжение трения ветра на каждые сутки года, полученное по распределениям приземного давления [4]. Потоки тепла на поверхности моря задавались в соответствии с работой [5], поля осадков и испарений – согласно [6]. Сток при-

черноморских рек (Дунай, Днестр, Днепр, Южный Буг, Риони, более мелкие кавказские реки и реки Турции – Ешиль-Ирмак, Кизил-Ирмак, Сакарья) и годовой ход температуры воды в устьях рек, кроме рек Турции, рассчитывался по [7]. В силу отсутствия данных по рекам Турции предполагалось, что температура воды в них равна температуре прибрежных вод моря.

В нижнебосфорском течении соленость принималась равной 35‰, температура 16°C, что соответствует характеристикам вод Мраморного моря.

Расчеты проводились на горизонтальной сетке $1,64 \times 1,64$ км, по вертикали использовалось 27 горизонтов с глубинами 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 22,5, 25, 30, 35, 40, 55, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 500, 700, 1000, 1400, 1800, 2100 м. Шаг по времени равнялся 1,5 мин.

Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена импульсом и горизонтальной турбулентной диффузии тепла и соли принимались равными

$$\nu^H = 10^{16} \tilde{n}^4 \cdot \tilde{n}^{-1}, \quad \kappa^H = 5 \cdot 10^{16} \tilde{n}^4 \cdot \tilde{n}^{-1}.$$

Коэффициенты турбулентности по вертикали вычислялись в соответствии с параметризацией Филандера – Пакановского [8, 9].

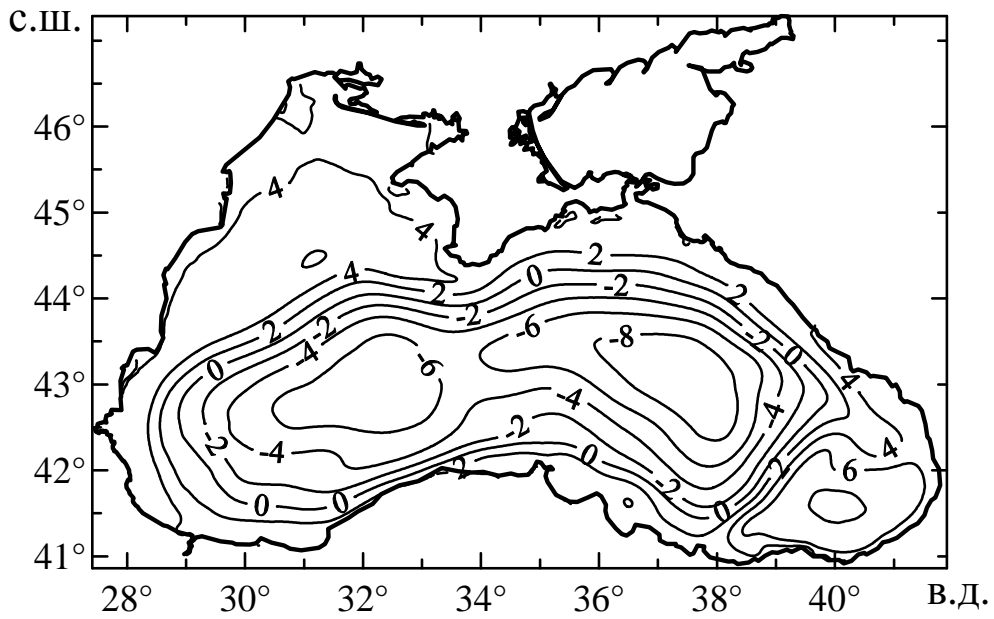
Интегрирование уравнений модели (1) – (8) с учетом краевых (9) – (15) и начальных (16) условий проводилось на полтора года модельного времени.

Результаты численного эксперимента

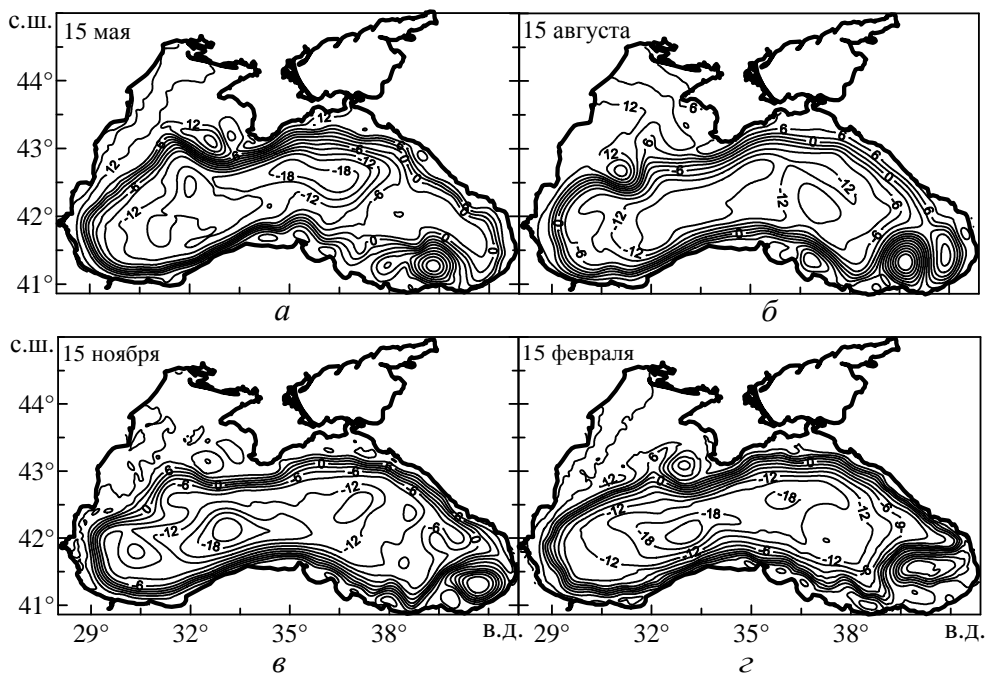
Приведенный уровень моря характеризует пространственную структуру и временную эволюцию течений в верхнем слое для средних широт, где геострофический баланс выполняется довольно точно. В расчете четко проявились несколько особенностей, которые в экспериментах с разрешением 5 км по горизонтали либо не наблюдались, либо проявлялись в существенно сглаженном виде.

Сопоставление рис. 1 и 2 показывает, что с улучшением разрешения ОЧТ принимает вид узкого струйного течения, направленного строго вдоль свала глубин. Из анализа расчета следует, что градиент поперек струи в поле уровня увеличился примерно в три раза.

В поле уровня наблюдаются вихри диаметром в несколько десятков километров. Наиболее интенсивно такие вихри образуются вдоль Кавказского и в восточной части Анатолийского побережья (рис. 2, а, б). Они формируются квазипериодически и передвигаются вдоль свала глубин по направлению ОЧТ. Анализ их изменчивости показал, что основной причиной образования мезомасштабных вихрей между берегом и периферией ОЧТ является влияние на ОЧТ особенностей орографии берега Черного моря. Такие вихри неоднократно фиксировались на спутниковых снимках поверхностной температуры [10, 11].



Р и с. 1. Уровенная поверхность (см) для начального момента времени



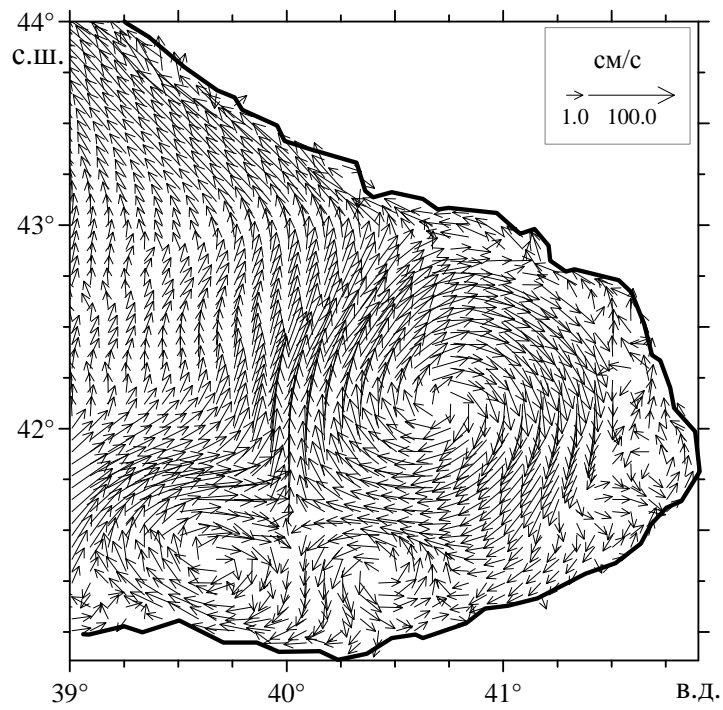
Р и с. 2. Рассчитанная уровенная поверхность (см) для различных моментов времени

Вихри, которые передвигаются вдоль Кавказского побережья, влияют на формирование и эволюцию Керченского антициклона. Его спонтанное образование объясняется нерегулярным поведением и меняющейся интенсивностью мезомасштабных вихрей (рис. 3, *а*), образующихся в различные сезоны.

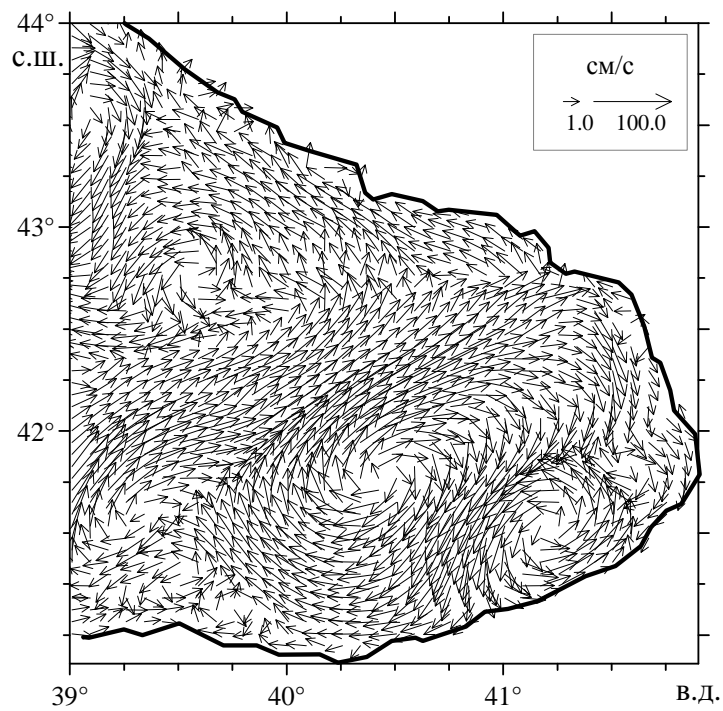
Вдоль Анатолийского побережья мезомасштабные круговороты формируются регулярно. Они передвигаются на восток и не просто взаимодействуют с Батумским антициклоном, но и оказывают существенное влияние на его формирование. Ранее предполагалось, что Батумский антициклон образуется в результате действия ветра, который в Кавказском регионе имеет положительную завихренность. Анализ результатов эксперимента показал, что в отсутствие положительной завихренности в поле ветра образование Батумского круговорота в значительной мере обусловлено именно мезомасштабными антициклонами (рис. 3, *б*). Важная особенность, проявляющаяся на всем периоде интегрирования, – сопутствующий Батумскому антициклону мезомасштабный циклонический вихрь, который формируется по его периферии. На рис. 2, *в, г* он расположен к западу от центра антициклона. В качестве примера на рис. 4 приведено поле скорости в районе Батумского антициклона. Зимой циклонический вихрь наблюдается на западной периферии антициклона (рис. 4, *а*), весной – на восточной (рис. 4, *б*). Анализ спутниковых данных показал замедленное движение вод по восточной и западной периферии Батумского антициклона по сравнению с его северной и южной частями, что косвенно свидетельствует о наличии циклона [11].

В районе Крымского побережья периодически формируется Севастопольский антициклон (рис. 2), который скатывается вниз по течению, и на его месте вновь образуется новый вихрь. Как показывает анализ поля уровня и течений, он также формируется за счет влияния на ОЧТ орोगрафии берега. О том, что Севастопольский антициклон не стоит на месте, свидетельствуют данные наблюдений [12]. В проведенном эксперименте получено, что в период формирования нового антициклона между «старым» и новым вихрем образуется область циклонической завихренности. В этом состоит отличие от ранее проведенных расчетов. В поле скорости (рис. 5) указанная изменчивость течений подтверждается траекторией дрейфующих буйев в районе Севастопольского антициклона: два из пяти дрейфтеров описали кривую, которая соответствует циклоническому вращению вод [11, 12].

Анализ временной изменчивости показал, что Севастопольский, Синопский, Кизилирмакский и Кавказский антициклонические вихри не являются квазистационарными. Они формируются и смещаются вниз по течению, образуя цепочку антициклонических вихрей между ОЧТ и шельфом Черного моря.

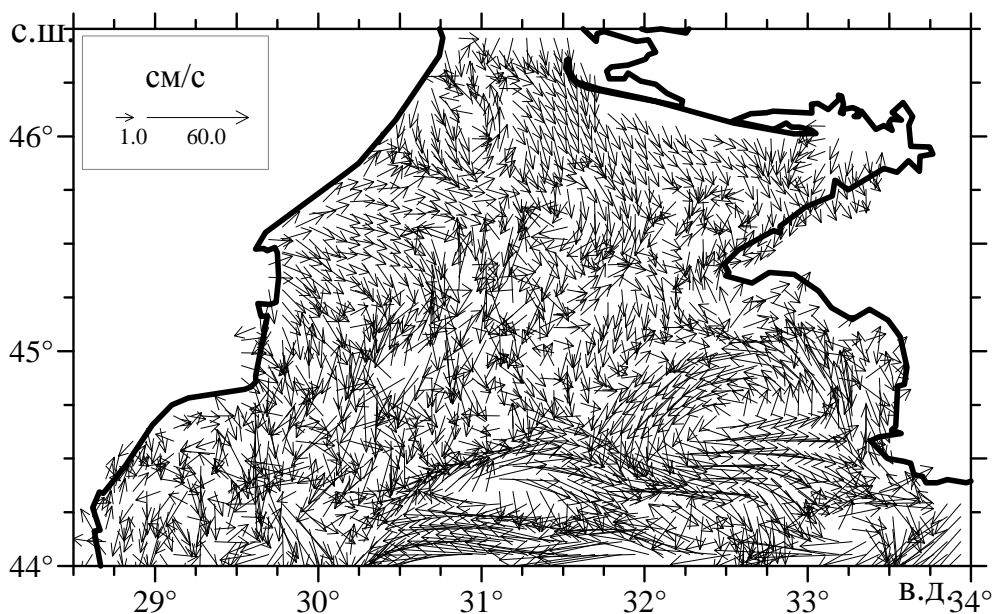


a



б

Р и с. 4. Поле скорости в районе Батумского антициклона на глубине 2,5 м 20 декабря (*a*) и 1 апреля (*б*)

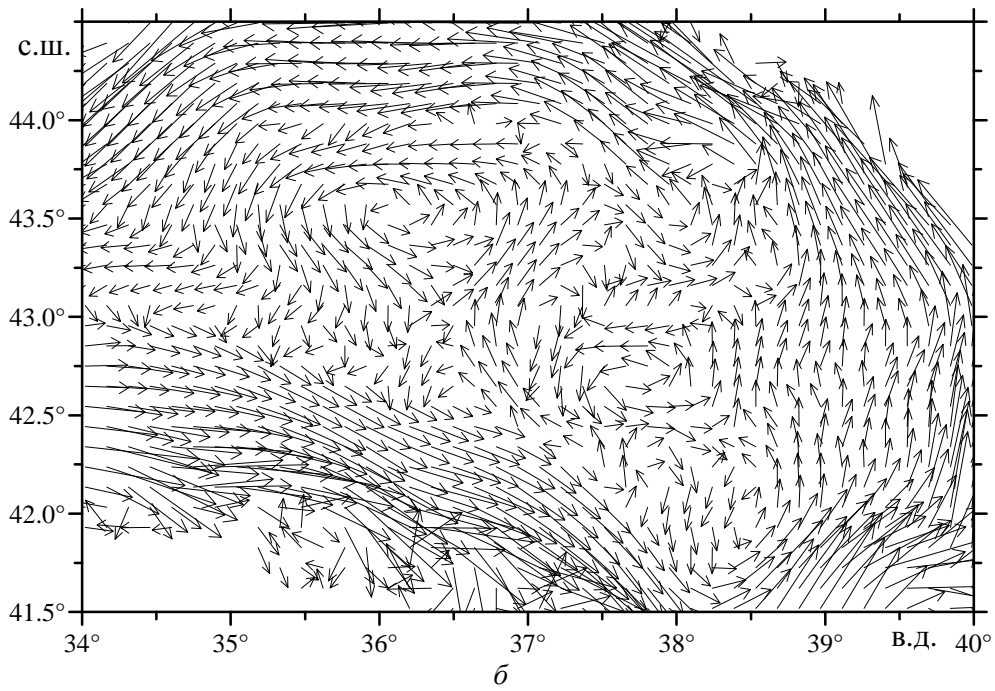
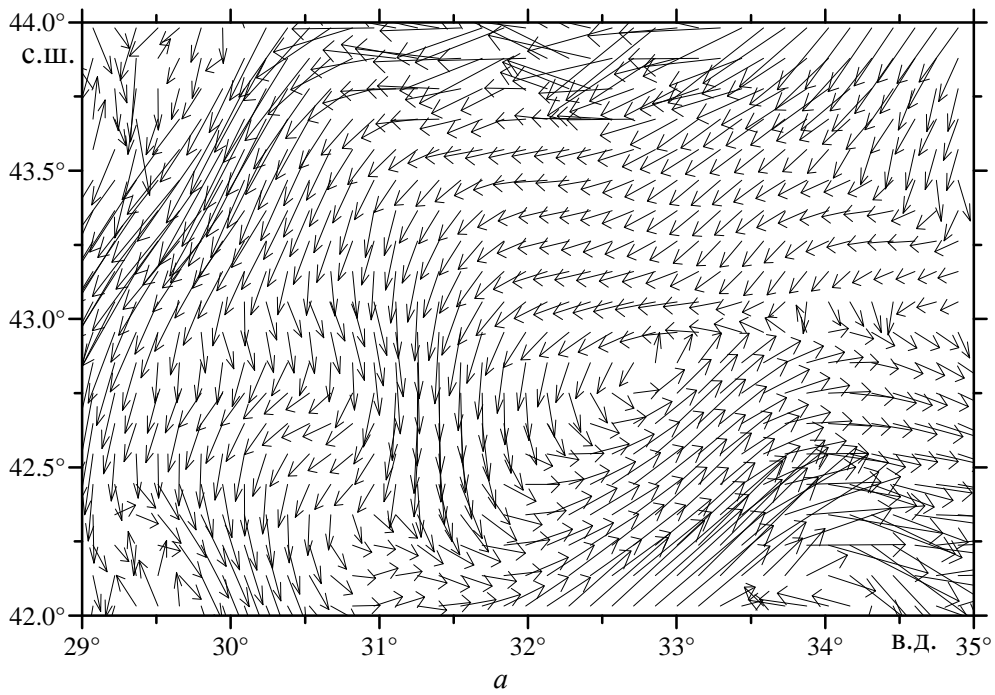


Р и с. 5. Поле скорости на северо-западном шельфе 20 декабря на глубине 2,5 м

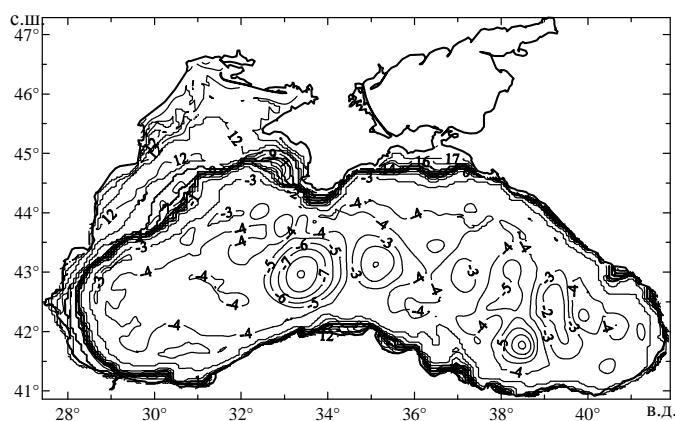
В отличие от предыдущих расчетов с горизонтальным разрешением порядка 5 км в данном эксперименте ОЧТ в виде непрерывной струи, направленной вдоль свала глубин, наблюдается до 400 м. Внутри циклонического круговорота формируются вихри и струи синоптического и мезомасштабного характера. В верхнем 400-метровом слое западной части циклонического круговорота образуются в зависимости от сезона два-три синоптических вихря и струйное течение шириной ~ 30 км (рис. 6, *a*). В его восточной части наблюдаются несколько вихрей диаметрами 20 – 50 км (рис. 6, *б*) с различным знаком завихренности. Ниже 500 м поле течений имеет сложную структуру, которая характеризуется наличием вихрей и узких струйных течений.

Уровень моря может быть представлен в виде $\zeta = \zeta^a + \zeta^d$, где ζ^a – адинамическая поправка; $\zeta^d = -\frac{1}{\rho_0} \int_0^H \rho dz$ [13]. Нетрудно убедиться, что ζ^a

характеризует придонные геострофические течения. В анализируемом расчете на протяжении всего периода интегрирования придонный слой охвачен циклоническим круговоротом, периферия которого строго соответствует свалу глубин. Во внутренней области этого круговорота возникают и эволюционируют вихревые образования (рис. 7) различного знака завихренности. Их изменчивость по времени составляет порядка нескольких десятков суток. Причем на востоке бассейна процессы вихреобразования и эволюции выражены заметно ярче, чем на западе.



Р и с. 6. Поле скорости на глубине 400 м в западной части циклонического круговорота 20 декабря (а) и в его восточной части 1 апреля (б)



Р и с. 7. Поле динамической поправки (см) 20 декабря

Заключение

Проведенный эксперимент показал, что улучшение горизонтального разрешения до 1-2 км при моделировании течений в Черном море может иметь принципиальное значение. Основные динамические эффекты, которые проявились в расчете, следующие.

ОЧТ как непрерывная струя, направленная вдоль свала глубин, прослеживается до 400 м. Скорость в ней достигает $90 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, что соответствует наблюдениям. Между ОЧТ и берегом образуются и эволюционируют синоптические и мезомасштабные вихри. Вдоль восточной части Анатолийского побережья в результате влияния береговой орографии непрерывно формируются мезомасштабные антициклонические вихри. Они передвигаются вдоль берега, достигают юго-восточной части моря и образуют Батумский антициклон. На его восточной и западной периферии периодически возникает мезомасштабный циклонический вихрь, что соответствует спутниковым наблюдениям.

Следующий важный элемент циркуляции, который ранее не воспроизводился, касается динамики вод на северо-западном шельфе. В процессе квазипериодического формирования Севастопольского антициклона и смещения его вниз по течению формируется область циклонического вращения вод, что также подтверждается данными наблюдений.

Расчет продемонстрировал, что Севастопольский, Босфорский, Синопский, Кизилирмакский и Кавказский антициклонические вихри являются квазипериодическими.

Необходимо отметить, что указанные особенности могут быть связаны с перестройкой циркуляции, которая обусловлена приспособлением поля плотности к рельефу дна и орографии берега. Этот процесс длительный. Например, первая бароклинная мода (в зависимости от длины волны) имеет декремент затухания до трех лет [14]. Для подтверждения полученных результатов требуются дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрофизических полей в Черном море. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 271 с.
2. Демьшев С.Г., Кортаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН, 1992. – С. 163 – 231.

3. Демьшев С.Г., Иванов В.А., Маркова Н.В., Черкесов Л.В. Построение поля течений в Черном море на основе вихреразрешающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солёности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – Вып. 15. – С. 215 – 226.
4. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 1. – С. 52 – 68.
5. Staneva J.V., Stanev E.V. Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black Sea // Oceanologia Acta. – 1998. – 21, № 3. – P. 383 – 417.
6. Ефимов В.В., Тимофеев Н.А. Теплобалансовые исследования Черного и Азовского морей. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1990. – 237 с.
7. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – 428 с.
8. Pacanowski R.C., Philander S.G.H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – 11, № 3. – P. 1443 – 1451.
9. Демьшев С.Г., Коротаев Г.К., Кныш В.В. Моделирование сезонной изменчивости температурного режима деятельного слоя Черного моря // Изв. РАН. ФАО. – 2004. – 40, № 2. – С. 259 – 270.
10. Sur H.I., Ozsoy E., Ilyin Y.P., Unluata U. Coastal/deep ocean interactions in the Black Sea and their ecological/environmental impacts // J. Mar. Syst. – 1996. – 7. – P. 293 – 320.
11. Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al. Observation of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // J. Geophys. Res. – 2003. – 108, № C8. – P. 1 – 27.
12. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Nezlin N.P. et al. Anticyclonic eddies in the northwestern Black Sea // J. Mar. Syst. – 2002. – 32. – P. 91 – 106.
13. Саркисян А.С., Передерей А.И. Динамический метод как первое приближение при расчете уровневой поверхности бароклинного океана // Метеорология и гидрология. – 1974. – № 3. – С. 45 – 54.
14. Демьшев С.Г., Коротаев Г.К., Куфтарков А.Ю. Анализ начального периода приспособления геофизических полей Черного моря к новой численной модели // Изв. РАН. ФАО. – 1996. – 32, № 5. – С. 635 – 644.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: sgdem@stel.sebastopol.ua

Материал поступил
в редакцию 28.09.09
После доработки 25.11.09

АНОТАЦІЯ Представлені результати чисельного прогностичного експерименту з просторовою роздільною здатністю 1,64 км по горизонтальних координатах. На відміну від розрахунків з більш грубою просторовою роздільною здатністю отримані наступні динамічні особливості. Основна Чорноморська течія як безперервний струмінь, направлений уздовж звалювання глибин, простежується до 400 м. Уздовж східної частини Анатолійського побережжя регулярно утворюються мезомасштабні антициклонні вихори, які впливають на формування Батумського антициклонну. Севастопольський, Сінопський, Кізілімарський і Кавказький антициклонні вихори є квазіперіодичними. Між знов утвореним Севастопольським антициклоном і попереднім вихором формується область циклонного обертання вод.

Ключові слова: Чорне море, чисельна модель, синоптичні і мезомасштабні вихори.

ABSTRACT Results of a numerical prognostic experiment with 1.64 km resolution on the horizontal coordinates are represented. In contrast to the calculations with more rough resolution, the following dynamical peculiarities are obtained. The Rim Current as a continuous flow directed along the bottom slope is observed up to 400 m. Along the eastern part of the Anatolian coast meso-scale anticyclonic vortices effecting formation of the Batumi anticyclone are regularly formed. Sevastopol, Sinop, Kizilirmak and Caucasian anticyclonic vortices are quasi-periodical ones. Between the newly formed Sevastopol anticyclone and the previous vortex, the area of the cyclonic vortex rotation is formed.

Keywords: Black Sea, numerical model, synoptical and meso-scale vortices.