

А.А.Кордзадзе, Д.И.Деметрашвили

Институт геофизики им. М.Нодиа

Тбилисского государственного университета им. Ив.Джавахишвили, г.Тбилиси

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ
НА ОСНОВЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА**

Рассматриваются особенности внутригодовой изменчивости динамических процессов в восточной части Черного моря на основе региональной прогностической системы, которая функционирует в Институте геофизики (г.Тбилиси, Грузия) с 2010 г. Обсуждаются результаты прогноза полей течений за 2010 – 2013 гг. Описана численная схема решения задачи мелкой воды и приведены некоторые примеры расчета для указанной акватории Черного моря.

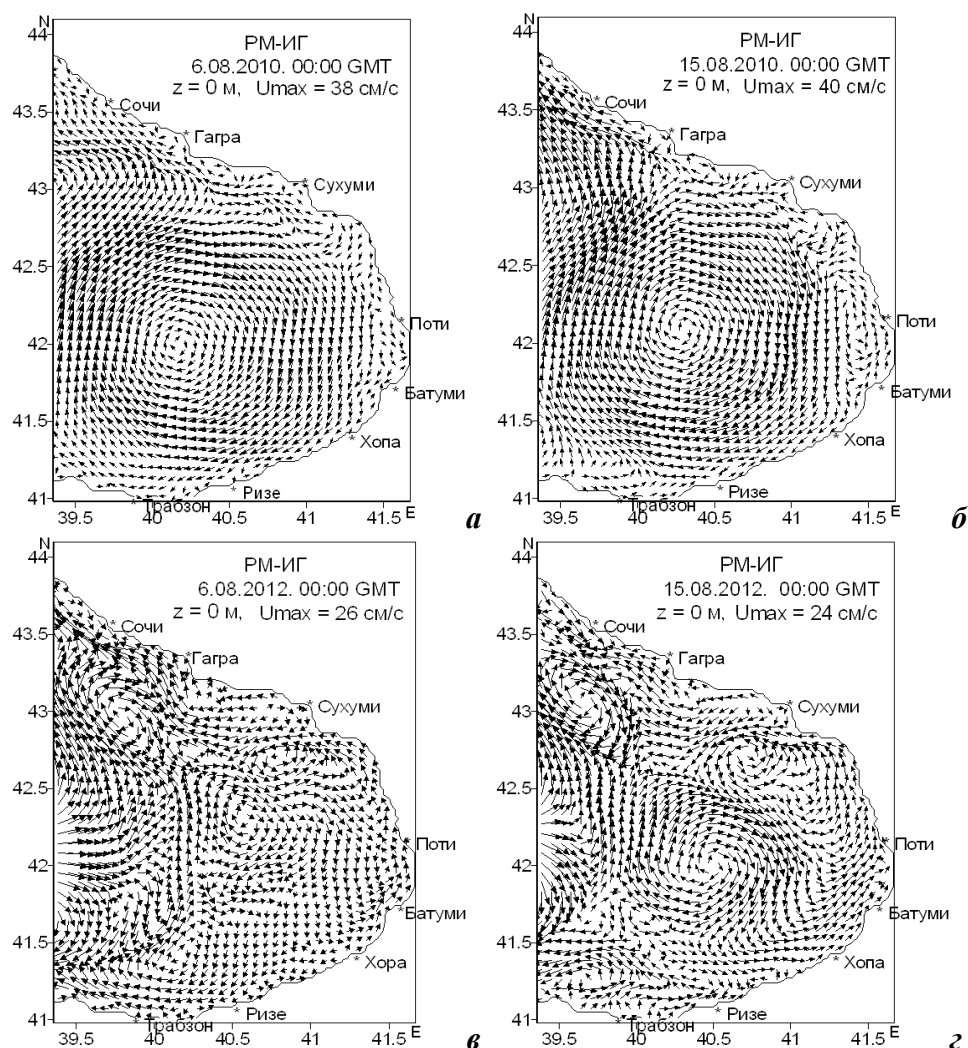
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *уравнения гидротермодинамики, региональная циркуляция, мелкая вода, свободная поверхность, метод расщепления.*

Несмотря на большой прогресс в исследовании Черного моря, современные представления о происходящих в нем процессах недостаточны для решения многих задач, имеющих практическое значение. В первую очередь это касается прибрежной зоны, необходимость изучения которой связана с навигацией, со строительством разных гидротехнических сооружений, освоением природных ресурсов, решением ряда задач экологического характера. Решение этих проблем тесно связано с динамическими процессами, происходящими в прибрежной зоне. В связи с этим, изучение и прогноз динамических процессов прибрежной зоны моря является весьма актуальной задачей.

В Институте геофизики имени М.Нодиа Тбилисского государственного университета им. Ив.Джавахишвили с 2010 г. функционирует региональная система мониторинга и прогноза динамического состояния Черного моря для его восточной части (жидкая граница совпадает с меридианом, проходящем около г.Туапсе), которая обеспечивает 3-х дневные прогнозы течения, температуры и солёности в режиме, близком к оперативному, с разрешением 1 км. Региональная прогностическая система, которая является частью системы диагноза и прогноза Черного моря в масштабах всего бассейна [1 – 4], достаточно детально описана в [5 – 8]. Основным ядром региональной системы является региональная модель динамики Черного моря Института геофизики (РМ-ИГ).

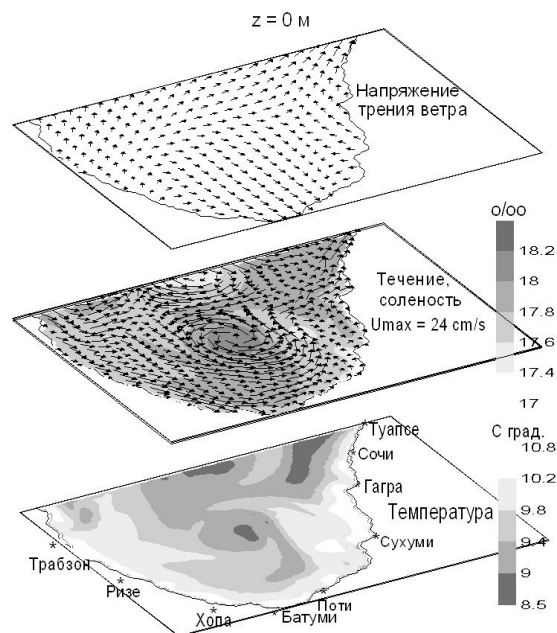
Анализ многочисленных результатов прогностических расчетов за 2010 – 2013 гг. показал, что восточная часть Черного моря, включающая Грузинскую акваторию, представляет собой динамически активную зону, где непрерывно происходит формирование разных циркуляционных процессов, значительно отличающихся друг от друга. С целью иллюстрации на рис.1 и 2 приведены результаты расчетов прогноза по региональной системе. В частности, на рис.1 приведены расчетные поля поверхностного течения, соответствующие летней циркуляции (август) 2010 и 2012 гг.

Летняя циркуляция 2010 г., в отличие от летней циркуляции 2012 г., ха-



Р и с . 1 . Рассчитанные прогностические поля поверхностного течения летом 2010 и 2012 гг.: 6 (а) и 15 (б) августа 2010 г., 6 (в) и 15 (г) августа 2012 г.

рактизовалась резко отличающимися особенностями. Из рис.1 хорошо видно, что главной особенностью региональной циркуляции 2010 г. являлось существование Батумского антициклонического вихря практически в течение всего лета. Он являлся довольно устойчивым образованием, который достигал максимальной интенсивности в августе и охватывал значительную часть рассмотренной региональной области. Интересно отметить, что по сообщению синоптиков-метеорологов лето 2010 г. в Грузии было аномально жарким за последние десятилетия. Температура воздуха нередко достигала и переваливала 40°C , а прибрежные воды моря нагревались более чем 30°C . Аномальный температурный режим, очевидно, повлиял на режим испарения и осадков, и, в конечном итоге, термохалинные условия прибрежных вод моря оказались благоприятными для формирования интенсивного антициклонического вихревого образования.



Р и с . 2 . Напряжение трения ветра и рассчитанные прогностические поля течения, температуры и солености для восточной части Черного моря, соответствующие 11 января 2013 г.

На рис.2 представлены напряжение трения ветра, поверхностные прогностические поля течения, солености и температуры, соответствующие 11 января 2013 г.

Количество рассчитанных прогностических полей за 2010 – 2013 гг. намного превышает возможности их представления в данной статье, однако, анализ этих результатов позволяет сформулировать основные чер-

ты внутригодовой изменчивости динамических процессов в восточной акватории Чёрного моря. На протяжении всего года в восточной части моря непрерывно происходит зарождение, деформация и исчезновение циклонических и антициклонических образований. При этом анализ расчётных полей вновь подтверждает известный из литературы факт [9], что самым интенсивным вихревым образованием в этом регионе является Батумский вихрь антициклонического характера, который часто существует в тёплый период года. В большинстве случаев в узкой зоне вдоль Кавказского берега с шириной примерно 20 – 30 км формируется зона интенсивного вихреобразования, где происходит генерирование малых неустойчивых вихрей размерами примерно от 5 до 25 км. Следует отметить, что такие прибрежные малые вихри идентифицируются и в других прибрежных районах Чёрного моря [10, 11]. Вихреобразование ослабевает в феврале, когда усиливаются атмосферные ветры, имеющие сглаживающее действие на морское течение. В том случае, когда Батумский вихрь интенсивен и занимает значительную часть рассматриваемой акватории, он формирует специфический режим солености – соленость вод значительно уменьшается в центральной части вихря, а периферийное течение вихря способствует проникновению более соленых вод из открытой части Чёрного моря в крайне восточную часть.

В настоящей работе предложен также эффективный метод численного решения задачи мелкой воды. И так, в трехмерной области $\Omega \{(x, y, z) : x, y \in \Omega_0(t), -\zeta(x, y, t) \leq z \leq h(x, y)\}$, ограниченной сверху свободной поверхностью $\zeta(x, y, t)$, а снизу – неподвижным дном $h(x, y)$ и достаточно гладкой боковой поверхностью σ , рассмотрим математическую задачу, описывающую динамику мелководной области. Область Ω представляет собой прибрежную часть глубокого моря с глубиной $H = -\zeta(x, y, t) + h(x, y)$. Граница σ_0 двумерной области Ω_0 образована пересечением свободной поверхности с рельефом дна. Система координат расположена так, что плоскость $хоу$

совпадает с невозмущенной поверхностью воды, ось z направлена вертикально вниз. Путем учета подвижной границы рассмотренной области задача учитывает описание процессов осушения и затопления за счет колебания уровня свободной поверхности моря. Иными словами, задача состоит в определении уровня свободной поверхности ζ и средних по вертикали характеристик течения

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_{-\zeta}^h u dz \quad \text{и} \quad \bar{v} = \frac{1}{H} \int_{-\zeta}^h v dz,$$

где u и v – горизонтальные компоненты вектора скорости течения $\vec{u}$ по координатам x и y соответственно.

С целью получения задачи мелкой воды рассматриваются уравнения движения и неразрывности для несжимаемой жидкости. Интегрируя эти уравнения по вертикали от $z = -\zeta$ до $z = h(x, y)$, после соответствующих преобразований можно получить систему дифференциальных уравнений теории мелкой воды [12 – 14]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}U}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}U}{\partial y} - lV + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= \nabla \mu \nabla U + f_1, \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}V}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}V}{\partial y} + lU + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= \nabla \mu \nabla V + f_2, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $U = \bar{u}H$, $V = \bar{v}H$, $\nabla \mu \nabla = \nabla_x \mu \nabla_x + \nabla_y \mu \nabla_y$, для давления принят гидростатический закон изменения $p = g\rho(\zeta + z) + p_a$. Здесь p_a – атмосферное давление на свободной поверхности морской воды, g – ускорение силы тяжести, плотность воды $\rho = \text{const}$, μ – коэффициент турбулентной вязкости.

При интегрировании рассмотренной системы в качестве граничных условий (при $z = -\zeta$ и $z = h$) были использованы условия, которые получаются из уравнения свободной поверхности $z = \zeta(x, y, t)$ путем дифференцирования по t . Кроме этого учитывалось также касательное тангенциальное напряжение трения ветра τ_{xz}^0, τ_{yz}^0 на свободной поверхности $z = -\zeta$ и придонное трение τ_{xz}^1, τ_{yz}^1 при $z = h$. Известные функции f_1 и f_2 имеют следующий вид

$$f_1 = \frac{1}{\rho} (\tau_{xz}^0 - \tau_{xz}^1) - \frac{gH}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} \quad \text{и} \quad f_2 = \frac{1}{\rho} (\tau_{yz}^0 - \tau_{yz}^1) - \frac{gH}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y}.$$

Теперь, для системы (1) рассмотрим граничные и начальные условия. Будем считать, что контур σ_0 в общем случае состоит из двух частей – твердой части σ_1 , совпадающей с линией берега, и открытой (жидкой) части σ_2 . На открытой границе σ_2 вектор полного потока является заданной функцией горизонтальных координат и времени, т.е. имеем

$$U = \tilde{U}(x, y, t), \quad V = \tilde{V}(x, y, t) \quad \text{на } \sigma_2, \quad (2)$$

на σ_1 рассмотрим условие прилипания

$$U = 0, \quad V = 0 \quad \text{на } \sigma_1, \quad (3)$$

в качестве начальных условий примем

$$U = U^0(x, y), \quad V = V^0(x, y), \quad \zeta = \zeta^0(x, y) \quad \text{при } t = 0. \quad (4)$$

Будем предполагать, что входные данные задачи обладают достаточной гладкостью, обеспечивающей разрешимость задачи (1) – (4) [12, 15, 16].

Для численного решения (1) – (4) весь интервал времени $(0, T)$, на котором ищется решение, разобьем на равные интервалы $t_{j-1} \leq t \leq t_{j+1}$ и на каждом интервале предполагается, что компоненты вектора скорости $\vec{u}$ известны с предыдущего шага, которые будут определены позже.

Введем в рассмотрение векторы φ , Q , F и матрицы A и B

$$\varphi = \begin{pmatrix} U \\ V \\ \zeta \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} U^0 \\ V^0 \\ \zeta^0 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} \Pi & -l & gH \frac{\partial}{\partial x} \\ l & \Pi & gH \frac{\partial}{\partial y} \\ gH \frac{\partial}{\partial x} & gH \frac{\partial}{\partial y} & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & gH \end{pmatrix}.$$

Здесь $\Pi = \text{div} \vec{u} - \nabla \mu \nabla$. Тогда, систему уравнений (1) запишем в операторной форме

$$B \frac{\partial \varphi}{\partial t} + A \varphi = Q \quad (5)$$

и в качестве начальных данных примем

$$B \varphi = BF \quad \text{при} \quad t = 0. \quad (6)$$

Пусть теперь $A = A_1 + A_2$, причем A_1 и A_2 – матрицы, элементами которых являются дифференциальные операторы, соответствующие уравнениям переноса-диффузии и этапу согласования. Тогда, на каждом интервале времени $t_{j-1} \leq t \leq t_{j+1}$ к задаче (5), (6) применим двуциклический метод расщепления по физическим процессам [14, 17 – 19]. При этом, предполагая, что φ^{j-1} есть решение задачи (5) – (6) в момент времени t_{j-1} , на первом интервале $t_{j-1} \leq t \leq t_j$ получим задачу

$$B \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} + A_1 \varphi_1 = Q, \quad B \varphi_1^{j-1} = B \varphi^{j-1}, \quad (7)$$

на интервале $t_{j-1} \leq t \leq t_{j+1}$ – задачу

$$B \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} + A_2 \varphi_2 = 0, \quad B \varphi_2^{j-1} = B \varphi_1^j, \quad (8)$$

а на последнем интервале $t_j \leq t \leq t_{j+1}$ – задачу

$$B \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} + A_1 \varphi_3 = Q, \quad B \varphi_3^j = B \varphi_2^{j+1}. \quad (9)$$

В уравнениях (7) и (9) значения функции $\bar{u}$ и $\bar{v}$ берутся одними и теми же для всего рассматриваемого интервала времени $t_{j-1} \leq t \leq t_{j+1}$. Только в этом случае двуциклический метод расщепления приводит к решению второго порядка точности по $\tau = t_j - t_{j-1}$ [17].

Задачи (7) и (9), записанные в покомпонентной форме, представляют собой двумерные уравнения переноса-диффузии субстанции. С целью аппроксимации по времени используется схема Кранка-Николсона. В результате применения конечно-разностной аппроксимации по геометрическим переменным, полученные уравнения при соответствующих краевых услови-

ях решаются методом расщепления по координатам x и y . Окончательно, приходим к решению совокупности одномерных простых задач, которые эффективно решаются методом факторизации. Полученная схема абсолютно устойчива и имеет второй порядок точности по всем переменным.

Задача (8) на интервале времени $t_{j-1} \leq t \leq t_{j+1}$ в покомпонентной форме записи имеет следующий вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_2}{\partial t} - lV_2 + gH \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} &= 0, \quad \frac{\partial U_2}{\partial t} - lV_2 + gH \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \zeta_2}{\partial t} + \frac{\partial U_2}{\partial x} + \frac{\partial V_2}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

при граничных и начальных условиях

$$U_{2n} = 0 \text{ на } \sigma_1, \quad \zeta_2 = \zeta \text{ на } \sigma_2,$$

где U_{2n} – нормальная составляющая вектора скорости $\bar{U}_2$,

$$U_2^{j-1} = U_1^j, \quad V_2^{j-1} = V_1^j, \quad \zeta_2^{j-1} = \zeta_1^{j-1}.$$

В дальнейшем, ради простоты записи индекс «2» при компонентах решения будем опускать. Отметим, что коэффициенты $\bar{u}_{k+1/2,l}$ и $\bar{v}_{k,l+1/2}$ входящие в уравнения переноса, определяются при решении задачи адаптации. Прежде чем рассматривать конечно-разностную аппроксимацию системы дифференциальных уравнений (10), запишем её в операторной форме

$$\mathbf{B} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{A}_2 \varphi = 0, \quad (11)$$

где $\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_l + \mathbf{A}_x + \mathbf{A}_y$,

$$\mathbf{A}_l = \begin{pmatrix} 0 & -l & 0 \\ l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_x = \begin{pmatrix} 0 & 0 & gH \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & 0 \\ gh \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & gh \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & gh \frac{\partial}{\partial y} & 0 \end{pmatrix}.$$

Если теперь на интервале времени $t_{j-1} \leq t \leq t_{j+1}$ применить к (11) двуциклический метод расщепления, то приходим к решению совокупности более простых задач:

на интервале времени $t_{j-1} \leq t \leq t_j$

$$\begin{aligned} \mathbf{B} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} + \mathbf{A}_l \varphi_1 &= 0, \quad \mathbf{B} \varphi_1^{j-1} = \mathbf{B} \varphi_1^j \\ (\varphi_1^j - \text{решение задачи (7) в момент времени } t = t_j), \\ \mathbf{B} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} + \mathbf{A}_x \varphi_2 &= 0, \quad \mathbf{B} \varphi_2^{j-1} = \mathbf{B} \varphi_1^j, \\ \mathbf{B} \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} + \mathbf{A}_y \varphi_3 &= 0, \quad \mathbf{B} \varphi_3^{j-1} = \mathbf{B} \varphi_2^j, \end{aligned} \quad (12)$$

и на интервале $t_j \leq t \leq t_{j+1}$ имеем

$$\begin{aligned}
\mathbf{B} \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} + \mathbf{A}_y \varphi_4 &= 0, \quad \mathbf{B} \varphi_4^j = \mathbf{B} \varphi_3^j, \\
\mathbf{B} \frac{\partial \varphi_5}{\partial t} + \mathbf{A}_x \varphi_5 &= 0, \quad \mathbf{B} \varphi_5^j = \mathbf{B} \varphi_4^{j+1}, \\
\mathbf{B} \frac{\partial \varphi_6}{\partial t} + \mathbf{A}_l \varphi_6 &= 0, \quad \mathbf{B} \varphi_6^j = \mathbf{B} \varphi_5^{j+1}.
\end{aligned} \tag{13}$$

Как нетрудно убедиться, первое уравнение из (12) и последнее из (13), записанные в покомпонентной форме, решаются в аналитическом виде [14]. Для численного решения остальных задач из (12), (13), после соответствующей конечно-разностной аппроксимации дифференциальных операторов $\partial/\partial x$ и $\partial/\partial y$ в результате соответствующих преобразований в покомпонентной форме записи получим следующие системы разностных уравнений [14, 19, 20]

$$\begin{aligned}
U_{2k+1/2,l}^{j-1/2} + \frac{\tau \cdot g \cdot H_{k+1/2,l}}{2} \nabla_k^+ \zeta_{2k,l}^{j-1} &= U_{2k+1/2,l}^{j-1}, \quad V_{2k,l+1/2}^{j-1/2} = V_{2k,l+1/2}^{j-1}, \\
\zeta_{2k,l}^{j-1/2} + \frac{\tau}{2} \nabla_k^- U_{2k,l}^{j-1/2} &= \zeta_{2k,l}^{j-1}
\end{aligned} \tag{14}$$

с начальными условиями $U_{2k+1/2,l}^{j-1} = U_{1k+1/2,l}^j$, $V_{2k,l+1/2}^{j-1} = V_{1k,l+1/2}^j$, $\zeta_{2k,l}^{j-1} = \zeta_{k,l}^{j-1}$

$$\begin{aligned}
\text{и} \quad U_{3k+1/2,l}^{j-1/2} &= U_{3k+1/2,l}^{j-1}, \quad V_{3k,l+1/2}^{j-1/2} + \frac{\tau \cdot g \cdot H_{k,l+1/2}}{2} \nabla_l^+ \zeta_{3k,l}^{j-1/2} = V_{3k,l+1/2}^{j-1}, \\
\zeta_{3k,l}^{j-1/2} + \frac{\tau}{2} \nabla_l^- V_{3k,l}^{j-1/2} &= \zeta_{3k,l}^{j-1}
\end{aligned} \tag{15}$$

при условии $U_{3k+1/2,l}^{j-1} = U_{2k+1/2,l}^j$, $V_{3k,l+1/2}^{j-1} = V_{2k,l+1/2}^j$, $\zeta_{3k,l}^{j-1} = \zeta_{2k,l}^j$. Здесь $\Phi^{j-1/2} = (\Phi^j + \Phi^{j-1})/2$, $\nabla_k^+ \Phi_k = (\Phi_{k+1} - \Phi_k)/\Delta x_{k+1/2}$, $\nabla_k^- \Phi_k = (\Phi_{k+1/2} - \Phi_{k-1/2})/\Delta x_k$, где Φ – любая из функции U_α , V_α и ζ_α ($\alpha = 2, 3$).

Рассмотрим теперь систему разностных уравнений (14). Тогда, воспользовавшись третьим уравнением, исключим из первого функцию $\zeta_{2k,l}^{j-1/2}$, получим одномерное разностное уравнение

$$U_{2k+1/2,l}^{j-1/2} - \frac{\tau^2 g H_{k+1/2,l}}{4} \nabla_k^+ \nabla_k^- U_{2k,l}^{j-1/2} = U_{2k+1/2,l}^{j-1} - \frac{\tau g H_{k+1/2,l}}{2} \nabla_k^+ \zeta_{2k,l}^{j-1}, \tag{16}$$

после решения которого из третьего уравнения определим функцию $\zeta_{2k,l}^{j-1/2}$.

Уравнение (16) эффективно решается методом факторизации и тем самым все неизвестные из (14) определены.

Рассматривая систему уравнений (15) относительно функции $V_{3k,l+1/2}^{j-1/2}$, аналогичного уравнению (16), получаем

$$V_{3k+1/2,l}^{j-1/2} - \frac{\tau^2 g H_{k,l+1/2}}{4} \nabla_l^+ \nabla_l^- V_{3k,l+1/2}^{j-1/2} = V_{2k,l+1/2}^{j-1} - \frac{\tau g H_{k,l+1/2}}{2} \nabla_l^+ \zeta_{3k,l}^{j-1}, \tag{17}$$

Уравнения (17) решаются аналогично уравнению (16).

На интервале времени $t_j \leq t \leq t_{j+1}$, по аналогии предыдущему, решаются системы конечно-разностных уравнений (15) относительно сеточных функций $U_{4k+1/2,l}^{j+1/2}$, $V_{4k,l+1/2}^{j+1/2}$, $\zeta_{4k,l}^{j+1/2}$ и $U_{5k+1/2,l}^{j+1/2}$, $V_{5k,l+1/2}^{j+1/2}$, $\zeta_{5k,l}^{j+1/2}$.

Для определения сеточных функций $\bar{u}_{k+1/2,l}$ и $\bar{v}_{k,l+1/2}$ используются следующие аппроксимации

$$\bar{u}_{k+1/2,l} = \bar{u}_{2k+1/2,l}^{j-1/2} + \bar{u}_{5k+1/2,l}^{j+1/2} \quad \text{и} \quad \bar{v}_{k,l+1/2} = \bar{v}_{3k,l+1/2}^{j-1/2} + \bar{v}_{4k,l+1/2}^{j+1/2}.$$

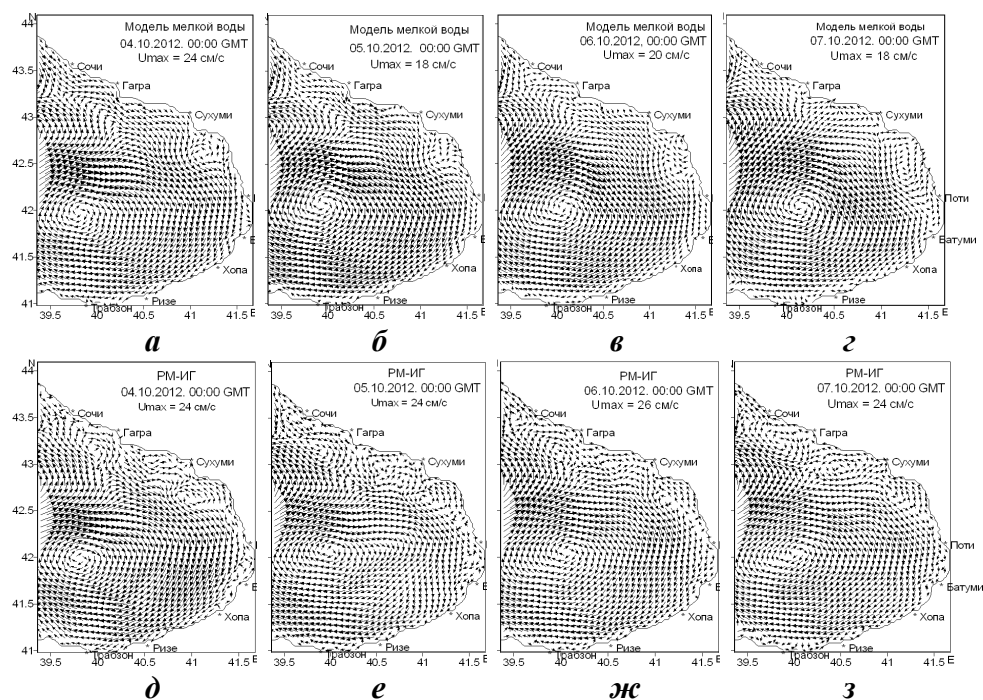
Таким образом, предложенная численная схема позволяет решение задачи мелкой воды свести к решению совокупности более простых одномерных задач на всех этапах расщепления, которые эффективно решаются методом факторизации. Построенная схема в целом имеет второй порядок аппроксимаций как по времени, так и по координатам x , y и является абсолютно устойчивой.

С целью апробации модели, были проведены численные эксперименты для того же восточного региона Черного моря, что и для прогностической системы, рассмотренной в первой части настоящей статьи. Количество точек сетки по координатам x и y были взяты 215 и 347 соответственно, горизонтальный шаг 1 км. Временной шаг равнялся 150 с, глубина $H = 111$ м. Построенная численная модель мелкой воды включена в прогностическую систему (рис.3), поэтому в качестве входных, как и в региональной модели динамики Чёрного моря, используются данные, получаемые из МГИ НАН Украины, в частности – тангенциальное напряжение трения ветра, компоненты скорости течения на жидкой границе, компоненты скорости течения и уровенная поверхность в начальный момент времени.

С целью иллюстрации, на рис.4 и 5 приведены результаты моделирования осенней циркуляции и уровенной поверхности, соответствующей 4 – 7 октября 2012 г., по модели мелкой воды. Для сопоставления результатов, полученных по этой модели, с результатами 3-х мерных бароклинных моде-



Р и с . 3. Схема функционирования региональной прогностической системы для восточной части Черного моря.



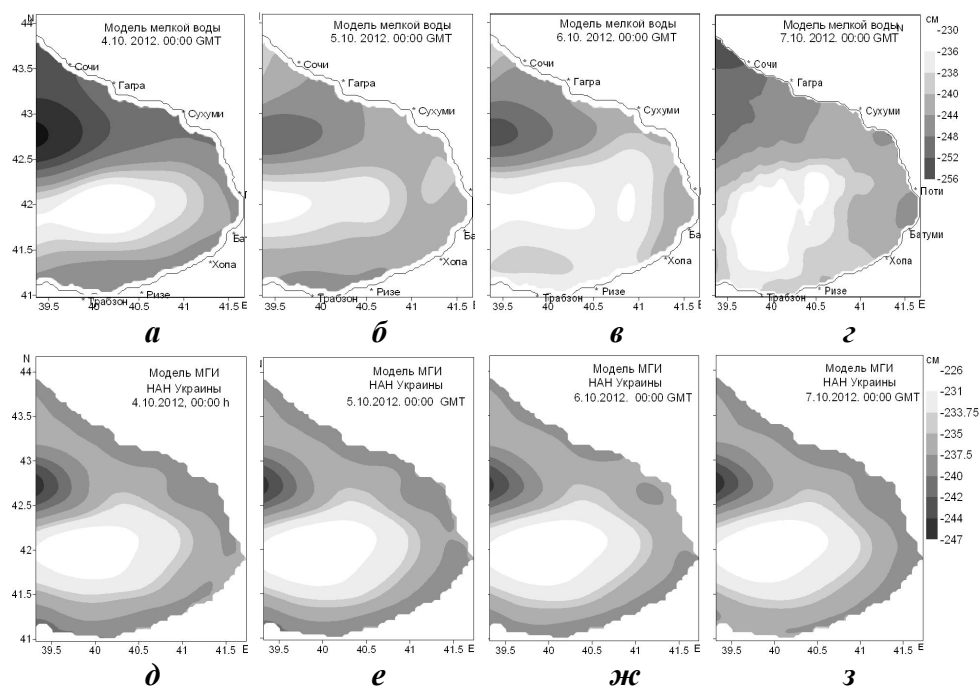
Р и с . 4. Прогностические поля циркуляции восточной части Черного моря, соответствующие прогностическому интервалу 4 – 7 октября 2012 г. в моменты времени 0 (а); 24 (б); 48 (в); 72 (г) ч, рассчитанные по модели мелкой воды; (д), (е), (ж), (з) – осредненные по вертикали в 100 метровом слое поля циркуляции, рассчитанные по модели РМ-ИГ.

лей Института геофизики и МГИ, на рис.4 приведены также рассчитанные по РМ-ИГ картины циркуляции (осредненные по вертикали в слое 100 м), на рис. 5 – уровенные поверхности, рассчитанные по модели общей циркуляции Черного моря МГИ НАН Украины.

На рис.4 хорошо видно значительное сходство циркуляционных картин, построенных по моделям мелкой воды и РМ-ИГ. По результатам обеих моделей главным элементом региональной циркуляции является хорошо известный Батумский антициклонический вихрь, который занимает значительную часть рассмотренной акватории. Следует отметить, что малые прибрежные вихри вдоль Кавказского побережья по модели мелкой воды не так ярко выражены, как по РМ-ИГ.

На рис.5 наблюдается определенное качественное сходство уровенных поверхностей, получаемых по моделям мелкой воды и МГИ НАН Украины, но здесь близость картин меньше, что можно объяснить высокой чувствительностью результатов моделирования изменчивости уровенной поверхности к различным моделям и входным параметрам.

В заключение следует отметить, что дальнейшее развитие региональной системы прогноза связано с её расширением путем включения в систему разных задач экологического характера.



Р и с. 5. Прогностические поля уровня поверхности восточной части Черного моря, соответствующие прогностическому интервалу 4 – 7 октября 2012 г. в моменты времени 0 (а); 24 (б); 48 (в); 72 (г) ч, рассчитанные по модели мелкой воды; (д), (е), (ж), (з) – рассчитанные по модели общей циркуляции МГИ НАН Украины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kubryakov A., Grigoriev A., Kordzadze A., Korotaev G., Stefanescu S., Trukhchev D., Fomin V. Nowcasting/Forecasting subsystem of the circulation in the Black Sea nearshore regions // 4th EuroGOOS Conf. European Operational Oceanography: Present and Future. 6-9.06 2005, Brest, France.– 2006.– P.605-610.
2. Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeev V.L., Demyshev S.G., Kybryakov A.I., Ratner Yu.B. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // Ocean Science.– 2011.– № 7.– P.629-649. doi: 10.5194/os-7-629-2011.
3. Григорьев А.В., Зацепин А.Г. Верификация численной модели динамики вод Российской зоны Черного моря по данным дистанционных и контактных наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– вып.25, т.2.– С.147-160.
4. Kubryakov A.I., Korotaev G.K., Dorofeev V.L., Ratner Yu.B., Palazov A., Valchev N., Malciu V., Matescu R., Oguz T. Black Sea Coastal forecasting system // Ocean Science.–2012.– № 8.–P.183-196. doi: 10.5194/os- 8-183-2012.
5. Kordzadze A.A., Demetrashvili D.I. Operational forecast of hydrophysical fields in the Georgian Black Sea coastal zone within the ECOOP// Ocean Science.– 2011.– № 7.– P.793-803. doi: 10.5194/os-7-793-2011.
6. Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И. Региональная оперативная система прогноза состояния восточной части Чёрного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– вып.25, т.2.– С.136-146.

7. Kordzadze A.A., Demetrashvili D.I. Coastal forecasting system for the easternmost part of the Black Sea // Turk. J. Fish. and Aquat. Scens.– 2012.– № 12.– P.471-477.
8. Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И. Краткосрочный прогноз гидрофизических полей в восточной части Чёрного моря // Изв.РАН. ФАО.– 2013.– т.49, № 6.– С.733-745.
9. Korotaev G., Oguz T., Nikiforov A., Koblinsky C. Seasonal, interannual and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // J. Geophys. Res.– 2003.– v.17, 108(C4).– P.3122-3135. doi:10.1029/2002JC 001508.
10. Иванов В.А., Тучковенко Ю.С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 368 с.
11. Демьяшев С.Г. Численный прогностический расчет в Черном море с высоким горизонтальным разрешением // Морской гидрофизический журнал.– 2011.– № 1.– С.36-47.
12. Марчук Г.И., Каган Б.А. Океанские приливы. Математические модели и численные эксперименты.– Л.: Гидрометеиздат, 1977.– 295 с.
13. Черкесов Л.В. Гидродинамика поверхностных и внутренних волн.– Киев: Наукова думка, 1978.– 364 с.
14. Kordzadze A.A., Demetrashvili D.I., Kukhalashvili V.G. On the effective numerical methods of solution of shallow water problem. Realization of the model for the easternmost part of the Black Sea // J. Georgian Geophys. Soc.–2011-2012.– v.15b.– P.14-31.
15. Бубнов М.А. Математические вопросы моделирования приливов и циркуляции в бароклинном океане.– Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984.– 151 с.
16. Кордзадзе А.А. Математические вопросы решения задач динамики океана.– Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1982.– 148 с.
17. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана.– Л.: Гидрометеиздат, 1974.– 303 с.
18. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики.– М.: Наука, 1989.– 608 с.
19. Кордзадзе А.А. Математическое моделирование динамики морских течений (теория, алгоритмы, численные эксперименты).– М.: ОВМ АН СССР, 1989.– 128 с.
20. Ильин В.П., Кордзадзе А.А. Об одной итерационной схеме метода расщепления для стационарных задач океанических течений / Методы вычислительной и прикладной математики. Дифференциальные и интегральные уравнения.– Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1977.– С.136-146.

Материал поступил в редакцию 24.07.2013 г.

АНОТАЦІЯ Розглядаються особливості внутрішньорічної мінливості динамічних процесів у східній частині Чорного моря на основі регіональної прогностиче-ської системи, яка функціонує в Інституті геофізики (м.Тбілісі, Грузія) з 2010 р Обговорюються результати прогнозу полів течій за 2010 – 2013 рр. Описана чисельна схема рішення задачі мілкої води і наведені деякі приклади розрахунку для зазначеної акваторії Чорного моря.

ABSTRACT The features of inner-annual variability of dynamical processes in the easternmost part of the Black Sea are considered on the basis of the regional monitoring and forecasting system, which functions at Institute of Geophysics (Tbilisi, Georgia) since 2010. In the paper the results of the forecast of current fields for 2010 – 2013 are discussed. The numerical scheme of solution of shallow water problem is also described and some results for the specified water area of the Black Sea are given.