

## КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И., Кухалашвили В. Г.

*Институт геофизики им. М. Нодиа Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили*

### 1. Введение

Прибрежные и шельфовые зоны морей и океанов претерпевают большую антропогенную нагрузку из-за хозяйственной и бытовой деятельности человека, что создает серьезную угрозу экосистеме этих зон. Грузинская прибрежная зона Черного моря не является исключением. Значительный прирост туристов за последние годы, построение и планирование соответствующих инфраструктур, гидротехнических сооружений и портов (напр., Анакийский порт) резко повышает возможность заражения прибрежных вод Грузии нефтепродуктами и другими токсичными ингредиентами. В таких условиях является значительно актуальным развитие прогностической системы прогноза состояния прибрежных вод, которая должна стать основной составной частью системы контроля и управления прибрежной зоной.

Развитие методов контактных и дистанционных наблюдений, вычислительных и коммуникационных средств, разработка и усовершенствование высокоточных численных моделей гидрофизических процессов привели за последнее десятилетие к созданию системы диагноза и прогноза состояния Черного моря, которая позволяет прогнозировать основные гидрофизические параметры на 3 суток [1-3]. Такое достижение оперативной океанографии Черного моря стало возможным в результате тесного сотрудничества специалистов-океанологов причерноморских стран в рамках европейских международных научно-технических проектов под координацией Морского гидрофизического Института Национальной академии наук Украины (МГИ, г. Севастополь).

Региональная система краткосрочного прогноза состояния юго-восточной части Черного моря, разработанная в Институте геофизики им. М. Нодиа Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили, является одной из компонентов системы диагноза и прогноза состояния Черного моря. В [4-9] даётся описание схемы функционирования этой системы; приведены результаты верификации системы и моделирования и прогноза динамических параметров.

В настоящей работе система регионального прогноза расширена путем включения в систему моделей мелкой воды и распространения нефти и других примесей в морской среде.

### 2. Расширенная система регионального прогноза

Новая версия региональной системы прогноза, представляющая расширенный вариант уже существующей системы ([1-3], [www.ig-geophysics.ge](http://www.ig-geophysics.ge)), состоит из гидродинамического и экологического блоков. Региональная область моделирования и прогноза ограничена Кавказской и Турецкой береговыми линиями и жидкой границей, проходящей вдоль  $39.08^{\circ}$  в. д. На рис.1 представлена региональная область, структура расширенной версии региональной системы и схема её функционирования. Гидродинамический блок включает в себе трехмерную

бароклинную региональную модель динамики Черного моря и двумерную модель мелкой воды, которые позволяют прогнозировать на 3 суток динамические поля в юго-восточной части Черного моря с пространственным разрешением 1км. Региональная модель динамики обеспечивает прогноз трехмерных динамических полей – течения, температуры и солёности, а двумерная модель мелкой воды позволяет прогнозировать изменение уровня моря и осредненное по вертикали течение. Все необходимые входные данные, используемые в качестве начальных и граничных условий, поступают ежедневно в режиме, близком к реальному, из МГИ через интернет. В частности, поле напряжения трения ветра, потоки тепла, испарение и осадки, рассчитанные по региональной модели динамики атмосферы ALADIN [10] в Национальной метеорологической администрации Румынии (г. Бухарест), используются в качестве верхних граничных условий для региональной модели динамики моря, а прогностические поля течения, температуры и солёности, рассчитанные по крупномасштабной модели динамики Черного моря МГИ [11], используются на жидкой границе региональной области.

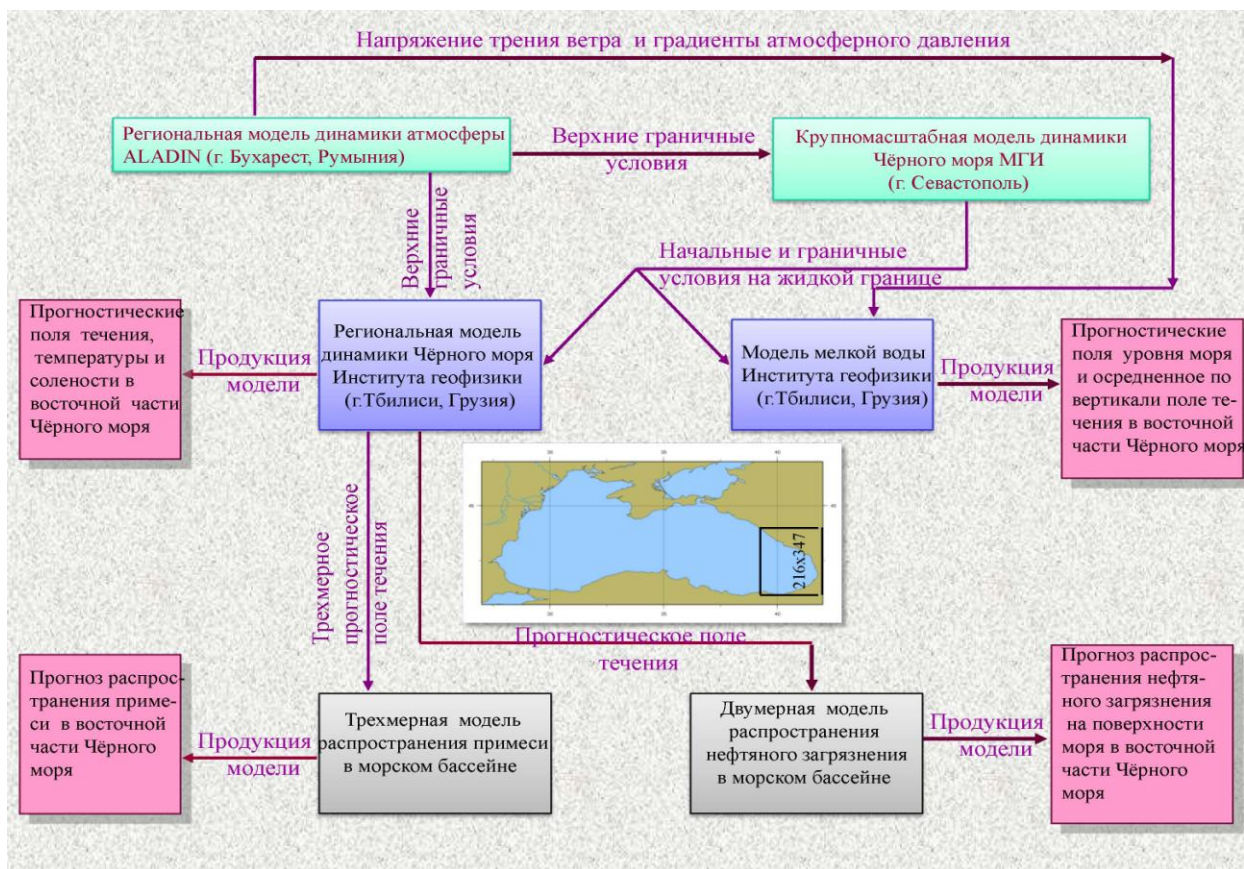


Рис.1  
Структура и схема функционирования расширенной версии региональной системы прогноза состояния юго-восточной части Черного моря.

Модель мелкой воды использует компоненты напряжения трения ветра и горизонтальные градиенты атмосферного давления, рассчитанные по ALADIN, начальные поля скорости и уровня моря, а также рассчитанные по модели МГИ прогностические значения компонентов скорости на жидкой границе.

Экологический блок состоит из двумерных и трехмерных численных моделей распространения неконсервативной примеси, которые позволяют рассчитать в прибрежной зоне Черного моря прогноз распространения зон, загрязненных нефтепродуктами и другими антропогенными веществами. При этом, модели, входящие в экологический блок, используют нестационарное поле течения, предсказанное в гидродинамическом блоке.

Программное обеспечение региональной системы прогноза представляет собой комплекс программ, разработанных на алгоритмическом языке "Fortran". Этот комплекс состоит из двух основных программных пакетов; с помощью первого из них реализуется модель динамики моря и трехмерные и двумерные модели распространения неконсервативных примесей, а с помощью второго программного пакета - модель мелкой воды.

Таким образом, новая версия системы регионального прогноза позволяет рассчитать в юго-восточной части Черного моря с разрешающей способностью 1 км прогноз на 3 суток основных гидрофизических полей: течения, температуры, солёности и уровня моря, а в случае необходимости - прогноз распространения зон, загрязненных нефтепродуктами и другими токсичными примесями, и их концентраций.

### 3. Гидродинамический блок

Описание модели динамики моря Института геофизики дается в наших предыдущих статьях [5, 12], поэтому здесь отметим только, что она основана на численном решении полной системы уравнений гидротермодинамики океана с соответствующими начальными и краевыми условиями с использованием двуциклического метода расщепления [13,14]. Расчетная сетка региональной модели с пространственным шагом 1 км вложена в расчетную сетку крупномасштабной модели динамики моря МГИ с пространственным разрешением 5 км. Анализ результатов прогноза динамических полей, накопленных за 2010-2014 гг., показывает, что юго-восточная акватория Чёрного моря представляет собой динамически довольно активный регион, где непрерывно происходит формирование разных циркуляционных процессов, значительно отличающихся друг от друга [9].

#### 3.1 Модель мелкой воды

Вторым компонентом гидродинамического блока является модель мелкой воды, основанная на следующей системе уравнений [15].

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

где

$$H(x, y, t) = h(x, y) + \zeta(x, y, t), \quad \bar{u} = \frac{1}{H} \int_{-\zeta}^h u dz, \quad \bar{v} = \frac{1}{H} \int_{-\zeta}^h v dz, \quad U = \bar{u} H, \quad V = \bar{v} H,$$

$$f_1 = \frac{1}{\rho}(\tau_x^0 - \tau_x^1) - \frac{gH}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x}, \quad f_2 = \frac{1}{\rho}(\tau_y^0 - \tau_y^1) - \frac{gH}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y}.$$

При получении системы уравнений (1) принят гидростатический закон распределения давления в море (ось  $z$  направлена вертикально вниз от невозмущенной поверхности)

$$P = g\rho(\zeta + z) + P_a.$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $u$  и  $v$  – горизонтальные компоненты вектора скорости течения,  $l$  – сила Кориолиса,  $g$  – гравитационное ускорение,  $\mu$  – коэффициент турбулентной вязкости,  $h$  – глубина моря, отсчитываемая от невозмущенной поверхности  $z = 0$ ,  $H$  – глубина моря, отсчитываемая от возмущенной поверхности  $z = -\zeta(x, y, t)$ .  $P_a$  – атмосферное давление над свободной поверхностью, плотность  $\rho = const$ ,  $\tau_x^0$  и  $\tau_y^0$  – компоненты тангенциального напряжения трения ветра у свободной поверхности  $z = -\zeta(x, y, t)$ ,  $\tau_x^1$  и  $\tau_y^1$  – компоненты силы трения у морского дна.

Система уравнений (1) решается при следующих граничных и начальных условиях:

$$U = 0, \quad V = 0 \quad \text{на } \sigma_1, \quad (2)$$

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

$$U = U^0(x, y), \quad V = V^0(x, y), \quad \zeta = \zeta^0(x, y) \quad \text{при } t = 0, \quad (3)$$

где  $\sigma_1$  – боковая линия, разделяющая море от суши,  $\sigma_2$  – жидкая боковая линия, отделяющая региональную область от открытой части морского бассейна.

Численный алгоритм решения задачи (1)-(3), который основан на методе двухциклического расщепления, детально описан в [16].

## 4. Экологический блок

### 4.1 Модель распространения нефтяного загрязнения

После того, как на морской поверхности формируется нефтяная пленка, она начинает мигрировать и меняет размеры и конфигурацию под влиянием гидродинамических факторов – адвекции и турбулентной диффузии. Одновременно нефть, попавшая в море, подвергается физическим и биохимическим трансформациям [17]. Процесс эволюции нефтяного загрязнения в морской среде можно описывать уравнением переноса-диффузии неконсервативной примеси. В двумерной области  $\Omega$  с границей  $S$  рассмотрим это уравнение в дивергентной форме

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \sigma \varphi = \frac{\partial}{\partial x} \mu_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y} + f \quad (4)$$

со следующими граничными и начальными условиями

$$a \left( \mu_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \beta \varphi \right) + b Q = 0 \quad \text{на } S \quad (5)$$

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

Здесь предполагается, что горизонтальные компоненты течения  $u$  и  $v$  вдоль осей  $x$  и  $y$ , удовлетворяют уравнению неразрывности для несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0.$$

Здесь:  $\varphi$  - объемная концентрация примеси,  $\mu_\varphi$  - коэффициент турбулентной диффузии,  $n$  - внешняя нормаль к границе  $S$ ,  $\sigma = \ln 2 / T_0$  - параметр неконсервативности, где  $T_0$  - время распада, которое представляет собой временной интервал, в течение которого начальная концентрация загрязнения уменьшается два раза из-за физико-химических и биологических процессов;  $f$  описывает, в общем, пространственно-временное распределение мощности источника, которое в конкретном случае точечного источника можно представить с помощью дельта-функции

$$f = Q \delta(x - x_0) \delta(y - y_0),$$

где  $x_0$  и  $y_0$  - координаты источника.  $a$  и  $b$  - коэффициенты, принимающие значения 1 или 0;  $\beta$  - параметр, который характеризует взаимодействие загрязняющего вещества с границей.

Коэффициент диффузии рассчитывался по формуле [18]

$$\mu = \gamma \Delta x \Delta y \sqrt{2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2}, \quad (7)$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta y$  - горизонтальные шаги сетки, а  $\gamma$  - некоторая константа.

Задача (4)-(6) решалась численно с помощью двухциклического метода расщепления по координатным линиям, а для аппроксимации по времени применялась схема Кранка-Николсона [19]. В [20, 21] представлены некоторые результаты распространения нефтяной пленки на поверхности Черного моря в случае аварийного разлива в Грузинской прибрежной зоне. При этом, поле течения на каждом временном шаге интегрирования представляло собой прогностическое поле, рассчитанное в гидродинамическом блоке региональной системы прогноза.

## 4.2 Пространственная модель распространения примеси

В [22-24] рассматривалась пространственная задача распространения неконсервативной примеси в бассейне Черного моря на примере радиоактивного изотопа Стронций-90. Эта модель приспособлена к восточной части Черного моря и включена в экологический блок региональной прогностической системы в качестве одного из модуля. Процесс распространения неконсервативной примеси в водном бассейне опишем пространственным уравнением переноса-диффузии для неконсервативной примеси

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \frac{\partial w \varphi}{\partial z} + \sigma \varphi = \nabla \mu_\varphi \nabla \varphi + \frac{\partial}{\partial z} v_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial z} + f, \quad (8)$$

где

$$\nabla \mu_\varphi \nabla \varphi = \frac{\partial}{\partial x} \mu_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

В качестве граничных условий рассматривались следующие граничные и начальные условия:

$$\begin{aligned}
\varphi = 0 \quad \text{или} \quad \partial\varphi/\partial z = 0 & \quad \text{при} \quad z = 0, \\
\partial\varphi/\partial z = \alpha\varphi & \quad \text{при} \quad z = H, \\
\partial\varphi/\partial n = 0 & \quad \text{на} \quad \Gamma, \\
\varphi = \varphi^0 & \quad \text{при} \quad t = 0,
\end{aligned}
\tag{9}$$

$$\tag{10}$$

Здесь  $\varphi^0$  есть функция, описывающая начальное распределение примеси в морском бассейне,  $\Gamma$ ,  $H$  - боковая поверхность и глубина,  $\alpha$  есть параметр, описывающий взаимодействие примеси со дном.

Задача (8)-(10) решается методом двухциклического расщепления по пространственным координатам [19].

## 5. Примеры расчета прогноза динамических полей и распространения примесей

С целью иллюстрации функционирования расширенной версии региональной системы прогноза, в данном параграфе приводятся некоторые примеры расчета прогноза динамических полей и распространения примесей в юго-восточной акватории Черного моря.

При реализации прогностической системы, модели динамики и распространения примесей используют сетку, имеющую 215x347 точек по горизонтали, с шагом  $\Delta x = \Delta y = 1$  км. В региональной модели динамики, а также в трехмерной модели распространения неконсервативной примеси по вертикали берутся 32 расчетных уровня с неравномерными вертикальными шагами (минимальный шаг 2 м у поверхности, максимальный – 100 м в глубинных слоях ниже 200 м). Временной шаг во всех моделях берется 0.5 ч.

### 5.1 Результаты прогноза динамических полей

На рис. 2 представлены рассчитанные прогностические поля течения на горизонтах  $z = 0$ , 20 и 50 м при  $t = 24$  ч и 72 ч после начального момента прогноза 00:00 GMT 2 января 2014 г. Как видно из этого рисунка, поле течения мало изменяется как по времени, так и по вертикали в верхнем 50 метровом слое в рассмотренном прогностическом интервале: 2-5 января 2014г. По всей толще верхнего слоя течение характеризуется интенсивным вихреобразованием. Здесь хорошо наблюдается формирование циклонических и антициклонических мезомасштабных вихрей, среди которых сравнительно мощными являются вихри с диаметром примерно 80-100 км в южной и юго-восточной частях рассмотренной области.

(a)	t = 24ч	(б)	t = 72ч
-----	---------	-----	---------

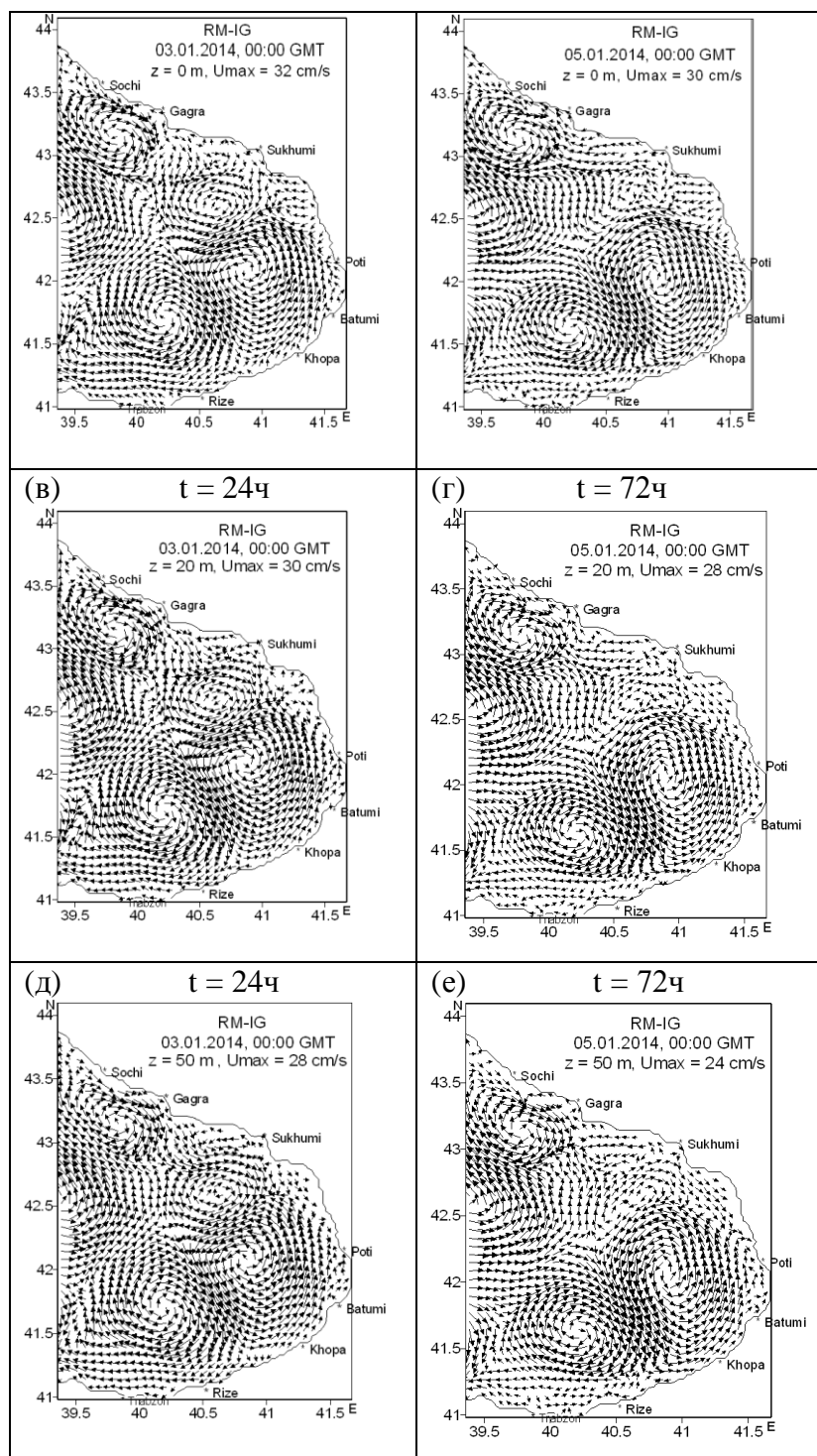


Рис. 2

Рассчитанные прогностические поля течения на горизонтах  $z = 0, 20$  и  $50$  м при  $t = 24$  ч (а, в, д) и  $t = 72$  ч (б, г, е) после начального момента прогноза. Прогностический интервал: 00:00 GMT, 2-5 января 2014 г.

На рис. 3 показана рассчитанная по модели мелкой воды и по модели динамики Черного моря МГИ топография морской поверхности при  $t = 24$  и  $72$ ч (после начала прогноза), соответствующая циркуляции, представленной на рис.2. Из рис. 3 видно, что рассчитанные по

обеим моделям уровни морской поверхности качественно и количественно близки друг другу и они колеблются на несколько сантиметров; как правило, антициклоническим областям соответствуют повышенные уровенные поверхности, а циклоническим областям - наоборот.

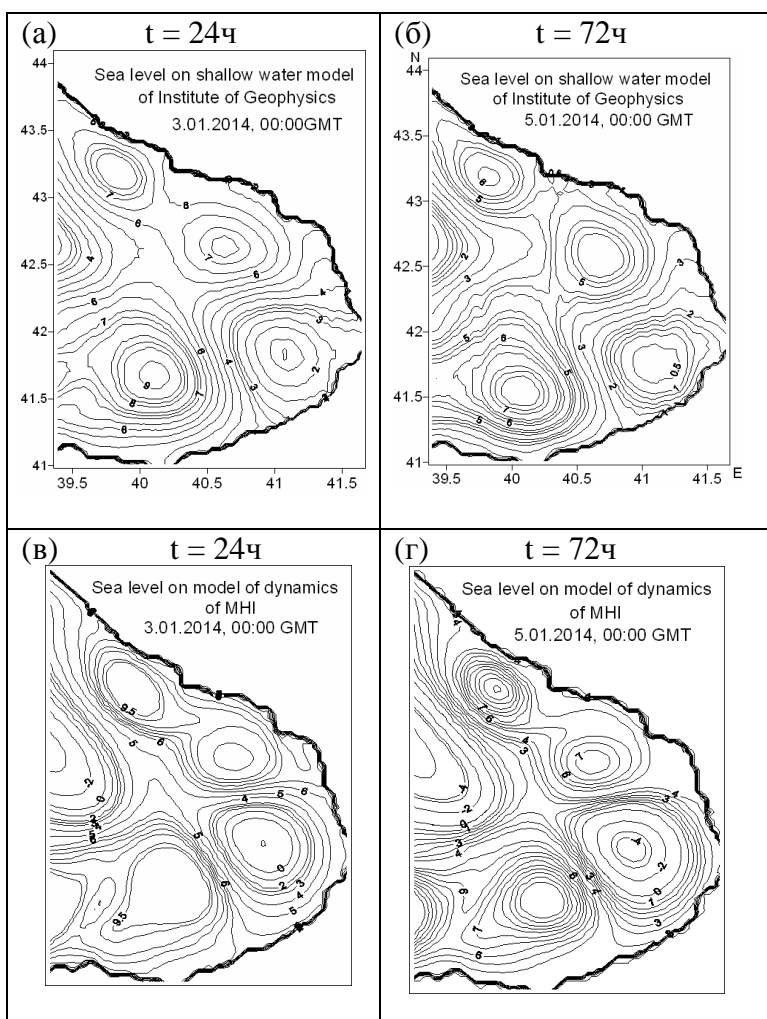


Рис. 3

Прогностические поля уровня моря (в см), рассчитанные по модели мелкой воды (а, б) и по модели динамики МГИ (в, д). Прогностический интервал: 00:00 GMT, 2-5 января 2014 г.

Рис. 4 иллюстрирует результаты расчета прогноза циркуляции в верхнем 50 метровом слое за прогностический интервал: 00:00 GMT, 5-9 декабря 2014г. Сопоставляя рис.2 и 4, нетрудно заметить, что циркуляционные режимы, сформированные в интервалах времени 2-5 января и 5-9 декабря 2014 г. в верхнем слое моря резко отличаются друг от друга. Такое существенное отличие в структуре морских течений объясняется разными метеорологическими режимами, сложившимися над восточной акваторией морского бассейна. Анализ полей тангенциального напряжения трения ветра показал, что в отличие от первого случая, в промежутке 5-9 декабря 2014 г. действовали сильные ветры. Такие ветры оказали сглаживающий эффект на поверхностное течение, вызывающее значительное ослабление вихреобразования (рис.4) с одновременным увеличением скорости дрейфового



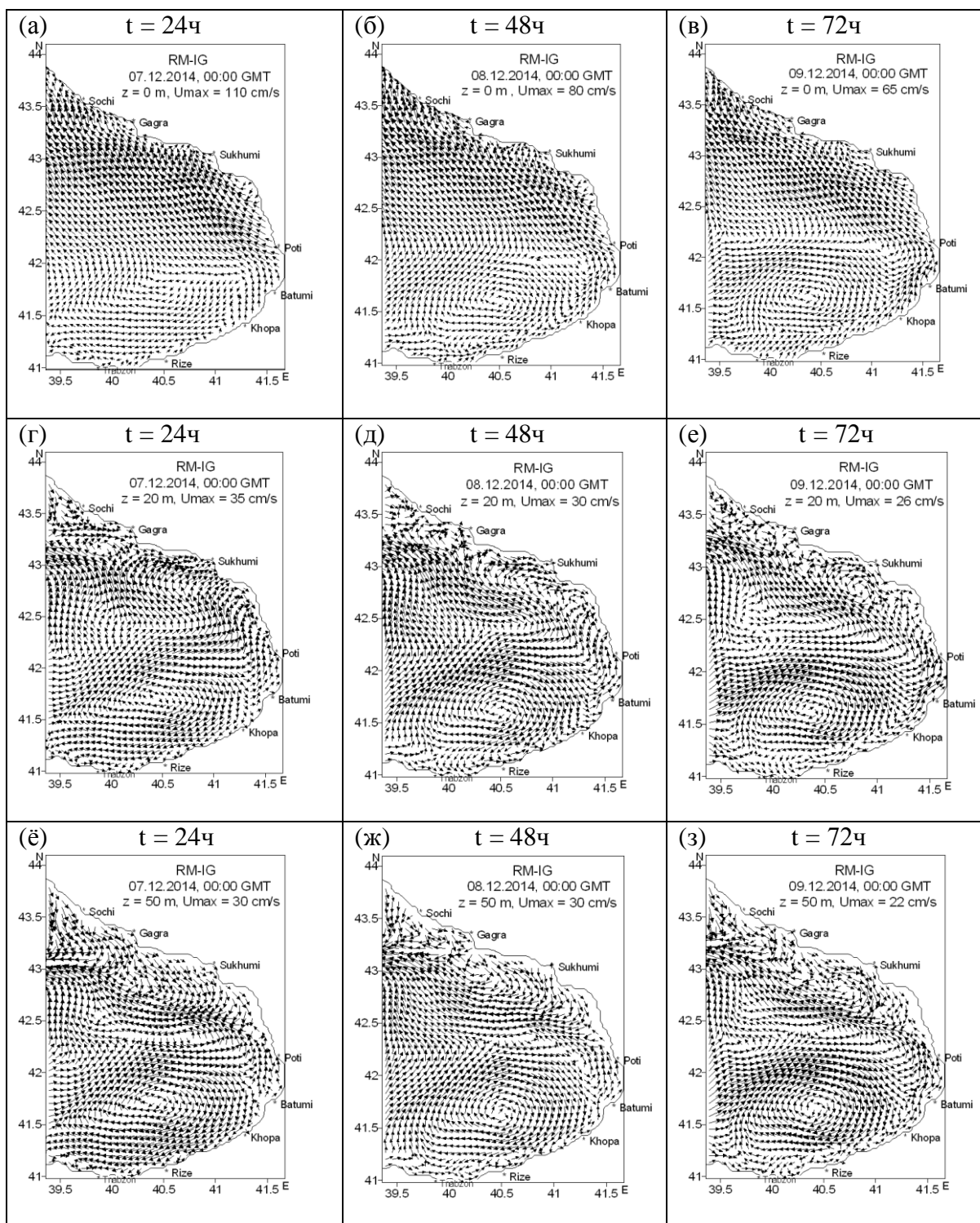


Рис.4

Рассчитанные прогностические поля течения на горизонтах  $z = 0, 20$  и  $50$  м при  $t = 24$  ч (а, г, ё),  $48$  ч (б, д, ж) и  $72$  ч (в, е, з) после начального момента прогноза. Прогностический интервал: 00:00 GMT, 6-9 декабря 2014 г.

течения до  $100\text{ cm/s}$  и выше. Следует также обратить внимание на существенное количественное и качественное изменения характера циркуляции по вертикали при сильных ветрах. По мере

ослабления с глубиной влияния трения ветра, явно возникает тенденция формирования вихревых образований, включая субмезомасштабные вихри в узкой вдольбереговой зоне Кавказа. Вертикальные градиенты скорости течения существенно растут при сильных ветрах. Как видно из рис. 2 и 4, при слабых ветрах изменение скорости в толще 50 м не превосходило 2 см/с (рис.2), тогда как при сильных ветрах в этой же толще максимальное значение скорости изменялось на 80 см/с (рис.4). Следует отметить, что аналогичные черты морской циркуляции были отмечены нами в [25], где исследовалась гидрологическая структура Черного моря при штормовых и почти штилевых условиях.

## 5.2 Результаты прогноза распространения нефтяного загрязнения

Поскольку нашей целью является расчет прогноза распространения загрязнения на 3 суток, среди физико-химических и биологических факторов наиболее важным является скорость испарения нефти, которая зависит как от свойств нефти, так и от внешних условий – температуры и скорости ветра, а также площади растекания нефти. В среднем, в результате испарения в период времени от нескольких до 24 часов теряется от одной до двух третей массы нефтяного разлива [17]. С учетом этого факта было принято, что параметр неконсервативности  $\sigma = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  при  $t \leq 12 \text{ ч}$ , что соответствует потере массы нефти на 50% за полсутки, а для  $t > 12 \text{ ч}$   $\sigma = 8,2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ , соответствует уменьшению концентрации в два раза за 10 дней. В конкретных численных экспериментах бралось:  $a = 1$ ,  $b = 0$ ,  $\beta = 0$ ,  $\gamma = 0,1$ . Коэффициент турбулентной диффузии рассчитывался в процессе решения задачи по формуле (7). В начальный момент  $t = 0$  нефтяное загрязнение в море отсутствовало.

Учитывая, что предельно допустимая концентрация нефтяного загрязнения обычно принята равной 0.05 мг/л, во всех численных экспериментах мы принимали равными нулю концентрации меньше 0.001 мг/л.

На рис. 5 представлены результаты расчета прогноза переноса нефтяной пленки на поверхности Черного моря в том случае, когда гипотетический аварийный выброс нефти в количестве 30 т происходил в течение двух часов в точке с координатами 180 Δх и 132 Δу. Точка разлива находилась на расстоянии примерно 29 км от г. Потти. Прогностический интервал был тот же, что и в предыдущем случае: 5-9 декабря 2014 г. Из рис.5 хорошо видно, что характер поверхностной циркуляции в значительной степени обуславливает траекторию перемещения нефтяной пленки. Нефтяная пленка начинает мигрировать и меняет размеры и конфигурацию, зона загрязнения, постепенно расширяясь, перемещается в северо-западном направлении. В рассмотренном интервале времени формировалось сильное течение, за трое суток произошло перемещение нефтяного загрязнения на значительное расстояние, равное примерно 130 км. Из-за диффузионного расширения и физико-химической и биологической трансформаций наблюдается постепенное уменьшение нефтяных концентраций.

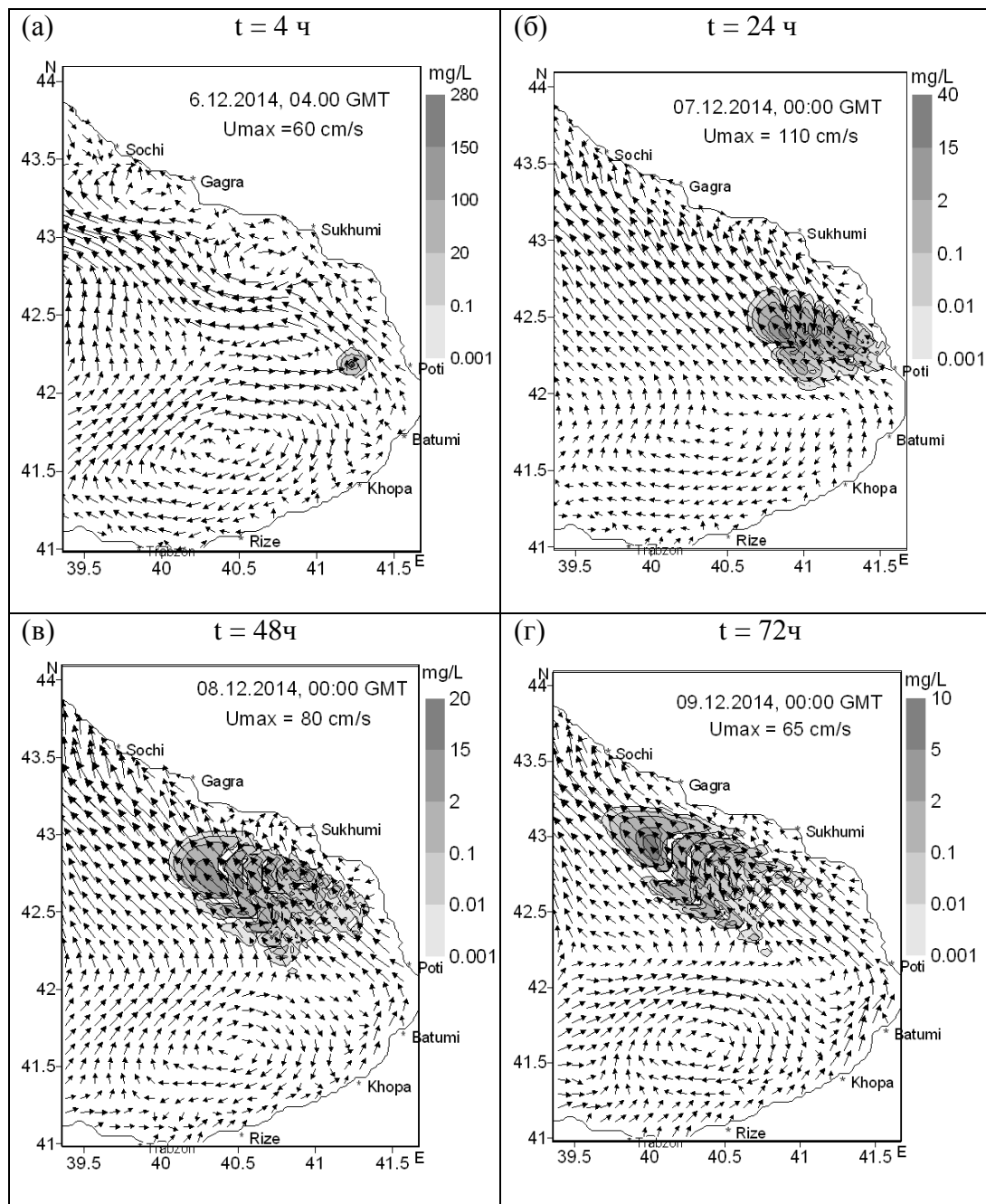


Рис. 5

Моделируемое нефтяное пятно в следующие моменты времени после аварийного разлива: 4 ч (а), 24 ч (б), 48 ч (в), 72 ч (г). Гипотетический аварийный разлив происходил в точках с координатами  $180 \Delta x$ ,  $132 \Delta y$ . Прогностический интервал: 00:00 GMT, 6-9 декабря 2014 г.

### 5.3 Результаты прогноза распространения примеси, выносимой в море реками

Моделируется распространение условной неконсервативной примеси, выносимой в море реками Риони и Чорохи в следующем количестве за единицу времени: от р. Чорохи – 50000 условных единиц (у. е.), от южной и северной рукавов р. Риони 1000 и 10000 у. е., соответственно. Время распада  $T_0$  бралось равным 2 годам. Коэффициент вертикальной турбулентной диффузии примеси  $\nu_\varphi = 15 \text{ см}^2/\text{с}$ , а коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии  $\mu_\varphi = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{с}$ .

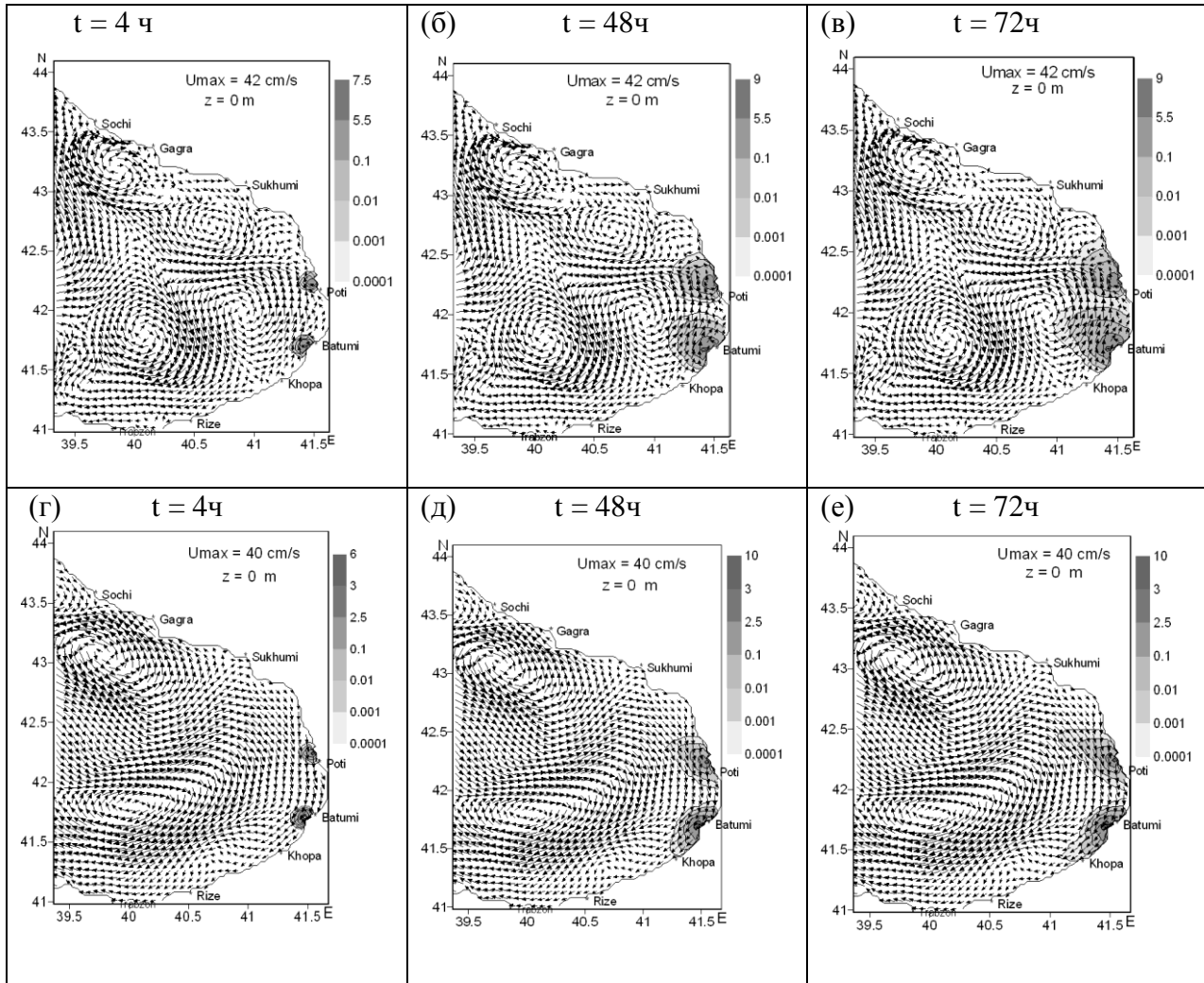


Рис.6

Рассчитанные концентрации условных примесей (у. е. в  $1\text{м}^3$ ), выносимых реками Риони и Чорохи, на морской поверхности при  $t = 4 \text{ ч}$  (а, г),  $48 \text{ ч}$  (б, д),  $72 \text{ ч}$  (в, е) после момента начала вноса в случае стационарных течений: 2 января 2014 г, 10:00 GMT (а, б, в) и 19 сентября 2014 г, 00:00 GMT (г, д, е).

Рис. 6 показывает распространение примеси в прибрежной зоне на поверхности моря в моменты времени 4, 48 и 72 ч после начала выноса примеси в море реками. Процесс распространения примеси иллюстрируется на примере двух разных циркуляционных режимов: первый из них относился к 10:00 GMT 2 января 2014г. ( рис. 6а, б, г), а второй к 00:00 GMT 19

сентября 2014 г. (рис.6г, д, е). Из рис. 6 отчетливо видно, что характер циркуляции значительно предопределяет основные черты процесса распространения примеси. Анализ полученных полей концентраций показывает, что примесь, попавшая в море, распространяется не только в горизонтальном направлении, но и по вертикали из-за вертикальной турбулентной диффузии и вертикальных потоков. Как показали расчеты, примесь за 3 суток достигала глубины примерно 50-60 м.

## **6. Заключение**

Разработана расширенная версия региональной системы прогноза, которая базируется на следующих численных моделях: 1. региональная бароклинная модель динамики Черного моря, 2. двумерная модель мелкой воды, 3. двумерная модель распространения нефтяного загрязнения, 4. пространственная модель распространения неконсервативной примеси. Для решения уравнений всех численных моделей используется метод расщепления [13, 14, 19].

Программное обеспечение региональной системы состоит из двух основных программ, разработанных на алгоритмическом языке "Fortran". По первой программе реализуются модель динамики моря и в случае необходимости - двумерные и трехмерные модели распространения примесей, программное обеспечение которых входит в программный пакет в качестве отдельных подпрограмм. С помощью второй программы реализуется модель мелкой воды. Все входные данные, необходимые для расчета морских прогнозов, поступают из МГИ с помощью интернета.

В настоящее время региональная система прогноза функционирует в режиме, близком к реальному и обеспечивает на 3 суток прогноз динамических полей – течения, температуры, солености и уровня моря, а в случае чрезвычайных ситуаций позволяет прогнозировать распространение концентраций примесей в юго-восточной части Черного моря с пространственным разрешением 1 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального научного фонда Грузии им. Шота Руставели (грант № AR/373/9-120/12). Выражаем им благодарность.

## **Литература**

1. Korotaev G. K., Oguz T., Dorofeev V. L., et al. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system. *Ocean Science*. -2011. 7.- PP.629-649- Doi:10.5194/os-7-629-2011.
2. Kubryakov A. I., Korotaev G. K., Dorofeev V. L. et al. Black Sea coastal forecasting system. *Ocean Science*. -2012 8. -PP. 183-196.- Doi: 10.5194/os-8-183-2012.
3. Grigoriev A. V., Zatsepin A. G. Numerical modeling of water dynamics of Russian zone of the Black Sea within the framework of operational oceanography tasks. *J. Georgian Geophys. Soc.*, -2013. V.16B.- PP.138-157.
4. Kordzadze A., Demetrashvili D. Some results of forecast of hydrodynamic processes in the easternmost part of the Black Sea. *J. Georgian Geoph. Soc.*- 2010. V.14b. -PP.37-52.
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.- PP. 793- 803. [www.ocean-sci.net/7/793/2011/](http://www.ocean-sci.net/7/793/2011/), 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. Украина. -2011. Вып.25. -Т.2.- С.136-146.

7. Kordzadze A. A., Demetrashvili D. I. Circulation processes in the easternmost part of the Black Sea in 2010-2012. J. Georgian Geophys. Soc. -2011-2012. V.14b. -PP. 3-13.
8. Kordzadze A. A., Demetrashvili D. I. Coastal forecasting system for the easternmost part of the Black Sea. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. -2012. 12.- PP.471-477. Doi: 10.4194/1303-2712-v12\_2\_38. [www.trjfas.org](http://www.trjfas.org)
9. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И. Краткосрочный прогноз гидрофизических полей в восточной части Чёрного моря. Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. -2013ю N 6. -С.733-745.
10. Brozkova R., Derkova M., Bellus M., Farda A. Atmospheric forcing by ALADIN/MFSTEP and MFSTEP oriented tunings. Ocean Sci.- 2006.- PP. 113-121. <http://www.ocean-sci.net/2/113/2006>.
11. Дорофеев В. Л., Коротаяев Г.К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря. Морской гидрофизический журнал.- 2004. №1.- С.52-68.
12. Кордзадзе А., Деметрашвили Д. И., Сурмава А. А. Численное моделирование гидрофизических полей Чёрного моря в условиях чередования атмосферных циркуляционных процессов. Изв. РАН, Физика атмосферы и океана.- 2008. Т.44, N 2.- С.227-238.
13. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Ленинград, Гидрометеиздат.- 1974. 303 с.
14. Кордзадзе А. А. Численное моделирование динамики морских течений (теория, алгоритм, численные эксперименты). Москва, ОВМ АН СССР.- 1989. 128 с.
15. Вольцингер Н. Е. Пясковский Р. В. Основные океанографические задачи теории мелкой воды. Л., Гидрометеиздат.- 1968. 300 с.
16. 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 Geoph. Soc.- 2011-2012. V.15b. -PP.14-31.
17. Врагов А. В. Методы обнаружения, оценки, и ликвидации аварийных разливов нефти. - Новосибирский госуниверситет. – 2002. 224 с.
18. Зилитинкевич С. С., Монин А. С. Турбулентность в динамических моделях атмосферы. Л., Наука. -1971. – 44 с.
19. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей Среды. – М., Наука. -1982. -319 с.
20. Кордзадзе А. А. , Деметрашвили Д. И. Прогноз циркуляционных процессов и распространения нефтяного загрязнения в восточной части черного моря на основе региональной комплексной модели. Морской гидрофизический журнал. Севастополь.- 2015. № 1.
21. Kordzadze A. A., Demetrashvili D. I. Development of the Black Sea regional forecasting system for its easternmost part with inclusion of oil spill transport forecast. Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences.- 2014. N 3- PP.40-47.
22. Kordzadze A., Demetrashvili D. 3D numerical model of distribution of nonconservative admixture in the Black Sea. J. Georgian Geophys. Soc.- 2000. V. 5b.- PP.3-11.
23. Demetrashvili D., Kordzadze A. Numerical modeling of distribution of pollution substances in the Black Sea. Reports of enlarged sessions of the seminar of I. Vekua Institute of applied mathematics. - 2002. V.17. №3.-PP. 44-57.
24. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д.И., Сурмава А. А. Численное моделирование распространения примеси в Чёрном море и в атмосфере Кавказа. Экология окружающей среды и безопасность жизнедеятельности. Киев, Украина- 2004. N 6.- С.31-41.
25. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д.И., Сурмава А. А. О циркуляции в Черном море при очень сильных и слабых ветрах. Метеорология и гидрология. -2007. № 9.- С.58-64.

## დინამიკური პროცესებისა და მინარევების გავრცელების მოკლევადიანი პროგნოზი შავი ზღვის აღმოსავლეთ ნაწილში

კორძაძე ა., დემეტრაშვილი დ., კუხალაშვილი ვ.

### რეზიუმე

წინამდებარე სტატიაში შავი ზღვის სამხრეთ-აღმოსავლეთ ნაწილის მდგომარეობის პროგნოზის რეგიონული სისტემა (რეგიონული არე დასავლეთიდან შემოსაზღვრულია 39.08° ა. გრ. მერიდიანზე გამავალი პირობითი თხევადი საზღვრით), რომელიც ერთ-ერთი შემადგენელი ნაწილია მთლიანად შავი ზღვის დიაგნოზისა და პროგნოზის სისტემისა, გაფართოებულია და შედგება ჰიდროდინამიკური და ეკოლოგიური ბლოკებისაგან. ჰიდროდინამიკური ბლოკი შეიცავს მაღალი გარჩევისუნარიანობის მქონე შავი ზღვის დინამიკის 3-განზომილებიან რეგიონულ მოდელს და 2-განზომილებიან “მცირე“ წყლის მოდელს. ეკოლოგიური ბლოკის ბირთვია არაკონსერვატიული მინარევის გავრცელების ორი და სამგანზომილებიანი რიცხვითი მოდელები. ზღვის მდგომარეობის პროგნოზის გათვლისათვის საჭირო რეალური მონაცემები მიიღება ყოველდღიურად ზღვის ჰიდროფიზიკის ინსტიტუტიდან (ქ. სევასტოპოლი) რეალურთან მიახლოებულ რეჟიმში ინტერნეტის საშუალებით. ზღვის მდგომარეობის რეგიონული პროგნოზის სისტემის ახალი ვერსია საშუალებას იძლევა გამოვთვალოთ ძირითადი ჰიდროფიზიკური ველების - დინების, ტემპერატურის, მარილიანობისა და ზღვის დონის ცვალებადობის 3 დღიანი პროგნოზი, ხოლო საჭიროების შემთხვევაში ნავთობით და სხვა ტოქსიკური მინარევებით დაჭუჭყიანების ზონების გავრცელების პროგნოზი 1 კმ გარჩევისუნარიანობით შავი ზღვის სამხრეთ-აღმოსავლეთ ნაწილში. მოყვანილია დინამიკური ველებისა და მინარევების გავრცელების მოდელირებისა და პროგნოზის შედეგები.

### SHORT- RANGE FORECAST OF DYNAMICAL PROCESSES AND SPREADING OF ADMIXTURES IN THE EASTERN PART OF THE BLACK SEA

Kordzadze A.A., Demetrashvili D.I., Kukhalashvili V.G.

### Abstract

In the present paper the regional forecasting system of the south-eastern part of the Black Sea (the regional area is limited from the west with liquid boundary passing along meridian 39.08°E), which is one of the parts of the basin-scale nowcasting/forecasting system, is expended and consists of hydrodynamic and ecological blocks. The hydrodynamic block includes a high-resolution 3-D regional model of the Black Sea dynamics and a 2-D shallow water model. A core of the ecological block are 2-D and 3-D models of spreading of nonconservative admixtures. The data required for calculation of forecasts of the sea state are transferred from Marine Hydrophysical Institute (Sevastopol) everyday in the near-real time mode via Internet. The new version of the Black Sea regional forecasting system provides to calculate 3 days' forecast of the main hydrophysical fields – the current, temperature, salinity and sea level and spreading of pollution by oil products and other toxic substances with 1 km spacing in the south-eastern part of the Black Sea. The results of modeling and forecast of dynamical fields and admixtures' spreading are given.