

А.А. Кордзадзе, Д.И. Деметрашвили

*Институт геофизики им. М. Нодиа Тбилисского
государственного университета им. Ив. Джавахишвили, г.Тбилиси*

РЕГИОНАЛЬНАЯ ОПЕРАТИВНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Представлена региональная оперативная система прогноза состояния восточной части Черного моря, которая разработана в рамках международных научно-технических проектов Евросоюза *ARENA* и *ECOOP*. Региональная система является одним из компонентов системы диагноза и прогноза состояния Черного моря. Ядром региональной системы является высокоразрешающая региональная гидростатическая модель динамики Черного моря Института геофизики им. М. Нодиа (Тбилиси, Грузия), которая вставлена в модель общей циркуляции Черного моря, используемой в МГИ НАН Украины. Региональная система обеспечивает трехдневный прогноз трехмерных полей течения, температуры и солености для восточной части Черного моря, включающей Грузинский сектор морского бассейна, с пространственным разрешением 1 км. Сравнительный анализ результатов прогнозов, полученных на основе региональной модели Института геофизики и модели общей циркуляции Черного моря МГИ НАН Украины, показывает, что высокоразрешающая способность математической модели является важным фактором для лучшей идентификации прибрежных вихрей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, циркуляция, термохалинные поля, численное моделирование, метод расщепления.*

Моделирование и прогноз гидродинамических процессов в Черном море с высоким разрешением являются важными для прибрежных и шельфовых зон, поскольку именно эти зоны претерпевают наибольшую антропогенную нагрузку. Здесь протекают процессы распространения и трансформации загрязняющих веществ, попавших в море по разным путям, перенос и седиментация твердых наносов рек, литодинамические и биохимические процессы и т. д. Особенности протекания таких процессов непосредственно связаны с динамическими процессами, развивающимися в прибрежных зонах.

Значительным шагом вперед для океанографии восточной части Черного моря безусловно можно считать создание региональной оперативной системы прогноза состояния этой части морского бассейна. Региональная система прогноза является одним из компонентов системы диагноза и прогноза состояния Черного моря, созданию которой в большей степени способствовали работы, проводимые ведущими океанографическими центрами причерноморских государств (в том числе Институтом геофизики им. М.З. Нодиа, г. Тбилиси) в рамках международных научно-технических проектов Евросоюза *ARENA* (*A Regional Capacity Building and Networking Programme to Upgrade Monitoring and Forecasting Activity in the Black Sea Basin*) и *ECOOP*

© А.А. Кордзадзе, Д.И. Деметрашвили, 2011

(*The European Coastal Shelf Sea Operational Observing and Forecasting System*). Координацию этих работ осуществлял МГИ НАН Украины [1, 2].

Региональная система прогноза обеспечивает трехдневные прогнозы трехмерных полей течения, температуры и солёности для восточной части Черного моря, включающей Грузинский сектор моря [3].

Основным ядром региональной прогностической системы является региональная модель динамики Черного моря Института геофизики им. М.З. Нодиа (г. Тбилиси), которую в дальнейшем тексте будем называть РМ-ИГ, с высоким разрешением (пространственный шаг – 1 км), сетка которой вставлена в сетку модели циркуляции Черного моря, используемой в МГИ НАН Украины (ее пространственный шаг – 5 км). РМ-ИГ получена путем адаптации бароклинной прогностической модели динамики для всего Черного моря с пространственным шагом 5 км [4, 5] к восточной части бассейна. Эта модель в свою очередь является усовершенствованным вариантом модели динамики Черного моря, разработанной в Вычислительном Центре СО АН СССР (Новосибирск, Академгородок) в 70-х годах XX века и в Отделе вычислительной математики АН СССР (ныне Институт вычислительной математики РАН) [6 – 9].

Модель РМ-ИГ основана на полной системе уравнений гидротермодинамики океана в гидростатическом приближении, которая записана в декартовой системе координат для отклонений термодинамических величин от их стандартных вертикальных распределений. Она учитывает: рельеф морского дна и конфигурацию бассейна, ветровое и термохалинное воздействие атмосферы, поглощение поверхностным слоем моря суммарной солнечной радиации, пространственно-временное изменение коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости и диффузии. Термохалинное воздействие учитывается условиями Неймана, путем задания потоков тепла, испарения и атмосферных осадков, а ветровое воздействие – заданием на поверхности моря компонентов тангенциального напряжения трения ветра. У дна моря компоненты скорости течения, потоки тепла и солёности считаются равными нулю. На боковой поверхности, которая отделяет морскую акваторию от суши, горизонтальные компоненты скорости, потоки тепла и соли равны нулю, а на жидкой границе, отделяющей региональную область от открытой части бассейна, компоненты скорости течения, отклонения температуры и солёности считаются заданными.

Для численного решения поставленной задачи используется двуциклический метод расщепления как по физическим процессам, так и по вертикальным плоскостям и координатным линиям [10, 11].

Региональная область, которая ограничена Кавказской и Турецкой береговыми линиями и западной жидкой границей, проходящей вдоль меридиана $39,36^\circ$ в. д., покрыта сеткой, имеющей 193×347 точек с горизонтальным разрешением 1 км. По вертикали вводится неравномерная сетка с 30-ю расчетными уровнями на глубинах: 2, 4, 6, 8, 12, 16, 26, 36, 56, 86, 136, 206, 306, ..., 2006 м. Временной шаг равняется 0,5 ч.

Схема функционирования региональной системы прогноза показана на рис. 1. Все входные данные, необходимые для расчета региональных морских

прогнозов, оперативно поступают из МГИ НАН Украины через *FTP*- сайт. Эти данные представляют собой:

- начальные трехмерные поля течения, температуры и солёности;
- прогностические поля напряжения трения ветра у поверхности Черного моря, потоков тепла, испарения и осадков, полученные с помощью региональной модели динамики атмосферы *ALADIN* (*Aire Limitee Adaptation Dynamique developement InterNational*);
- прогностические значения компонентов скорости течения, температуры и солёности на жидкой границе, полученные по модели динамики Черного моря МГИ.

Входные данные, используемые в модели РМ-ИГ в качестве граничных условий, даются одночасовым временным шагом в прогностическом интервале на грубой сетке и переводятся на сетку региональной модели на каждом временном шаге в процессе интегрирования уравнений модели с помощью интерполяции.

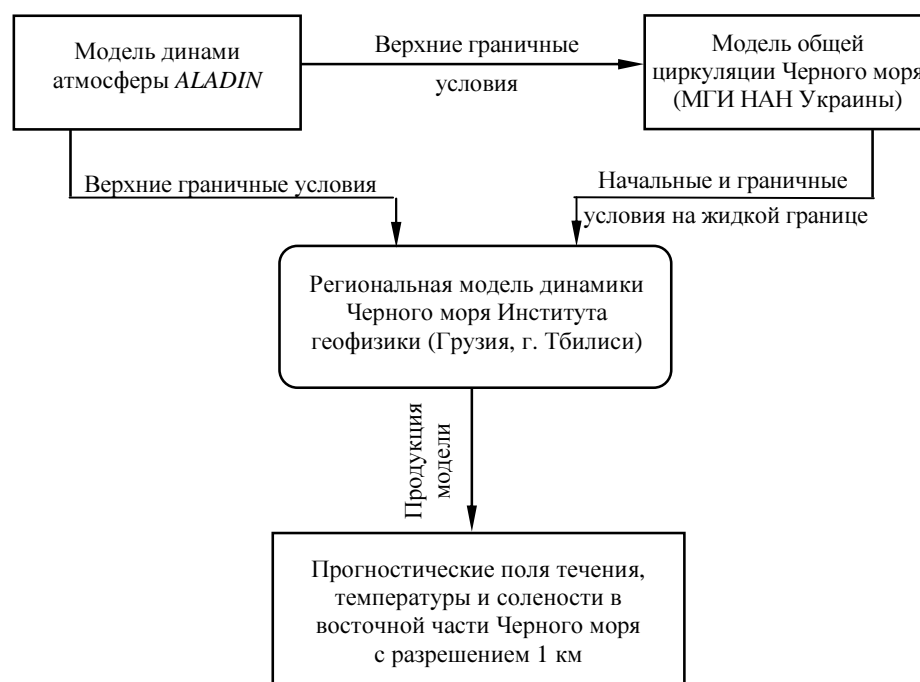


Рис. 1. Схема функционирования региональной системы прогноза.

С целью проверки функционирования региональной системы прогноза, в рамках проекта *ARENA*, в июле 2005 года, с участием океанографических центров всех причерноморских стран, впервые для Черноморского региона был осуществлен пилотный эксперимент по функционированию оперативной системы диагноза и прогноза состояния Черного моря в режиме времени, близком к оперативному.

Составной частью этого эксперимента был расчет прогноза основных гидрофизических полей (течения, температуры и солёности) на 48 ч с высоким разрешением в некоторой части Грузинского сектора Черного моря с помощью РМ-ИГ. Сопоставление результатов рассчитанных прогнозов с натурными данными показало способность модели надёжно предсказывать гидрофизические поля в Грузинской прибрежной зоне Черного моря. В настоящее время у нас имеется возможность провести сопоставление рассчитанных температур поверхности моря со спутниковыми изображениями поверхностной температуры, полученными со спутников *NOAA*. Спутниковые данные доступны для нас по сайту «Морской портал НККУ» <http://dvs.net.ua/mr>. Анализ сопоставления показывает хорошее качественное совпадение прогностических и измеренных температурных полей, а что касается количественного совпадения, в большинстве точек погрешность не превосходит $0,6 - 0,8$ °С.

Регулярные расчеты региональных прогнозов за 2010-2011 гг. показывают, что восточная часть Черного моря, включающая Грузинскую акваторию, представляет собой динамически активную зону. Здесь развиваются циркуляционные процессы, характеризующиеся резко выраженной внутритроновой изменчивостью.

На рис. 2 и рис. 3 приведены результаты прогнозов региональной поверхностной циркуляции на третьи сутки (72 ч.), рассчитанные по РМ-ИГ и модели МГИ НАН Украины, соответственно, для моментов времени, соответствующих разным сезонам года. В первую очередь следует отметить, что согласно результатам обеих моделей циркуляционные режимы значительно изменяются от сезона к сезону. Например, летом в рассмотренной акватории формируется довольно мощный прибрежный антициклонический вихрь (см. рис. 2, *а*), известный под названием Батумского вихря [12]. В начале лета этот вихрь не имеет больших горизонтальных размеров (см. рис. 2, *з*), но в августе он уже занимает обширную область и становится основным элементом региональной циркуляции. Наши расчеты вновь подтверждают уже известный факт о существовании антициклонического вихря в юго-восточной части Черного моря в летний сезон [12].

С приближением холодного сезона циркуляционный характер рассматриваемого региона значительно изменяется: в октябре Батумский вихрь не наблюдается, а региональная циркуляция характеризуется порождением вихревых образований сравнительно малых размеров (см. рис. 2, *б*).

Из сопоставления картин циркуляции, полученных по моделям Института геофизики и Морского гидрофизического института, можно заметить, что повышение разрешающей способности модели способствует лучшей идентификации прибрежных малых вихрей. Этот факт особенно явно заметен по результатам моделирования, соответствующим августу и октябрю (см. рис. 2, *а* и *б*, рис. 3, *а* и *б*). Например, в августе, когда Батумский вихрь занимает обширную зону, согласно результатам РМ-ИГ формируется узкая зона с шириной примерно 20–25 км вдоль Кавказского побережья, которая характеризуется тенденцией интенсивного образования малых береговых неустойчивых вихрей. Такой эффект не наблюдается по результатам модели с 5 км пространственным

шагом. Следует отметить, что порождение малых вихревых образований в узкой Грузинской береговой зоне известно из наблюдений [13], но их идентификация в математических моделях требует, по-видимому, большой разрешающей способности, что достигается в региональной модели.

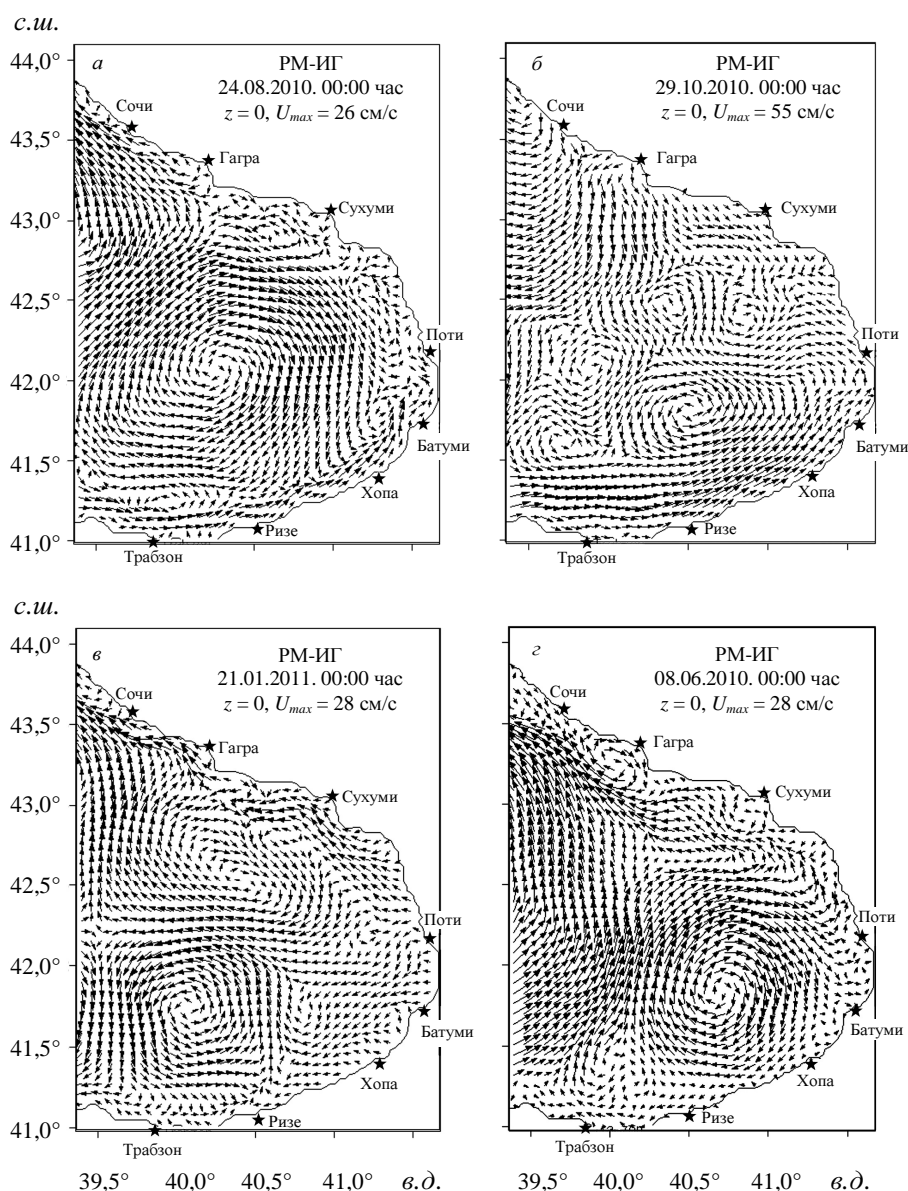


Рис. 2. Поля поверхностного течения в моменты времени: а – 24 августа 2010 г., б – 29 октября 2010 г., в – 21 января 2011 г. и г – 8 июня 2010 г., предсказанные с помощью РМ-ИГ через 72 ч. с момента начала прогноза.

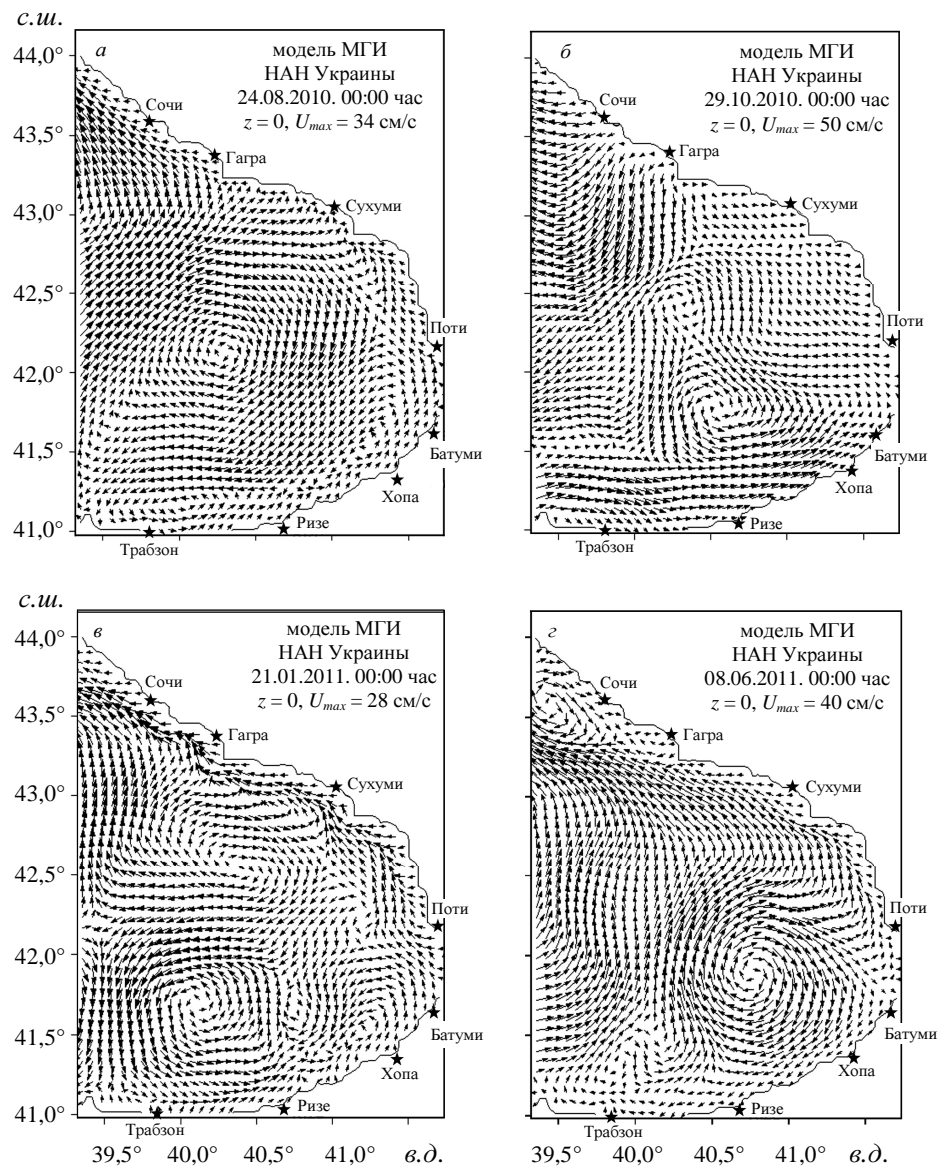


Рис. 3. То же самое, что и на рис. 2, но предсказанные с помощью модели общей циркуляции МГИ НАН Украины.

На рис. 4 показаны результаты прогнозирования поля солёности на горизонте $z = 10$ м, рассчитанные по модели РМ-ИГ и модели МГИ для августа и января, соответственно, а на рис. 5 – то же самое для температуры.

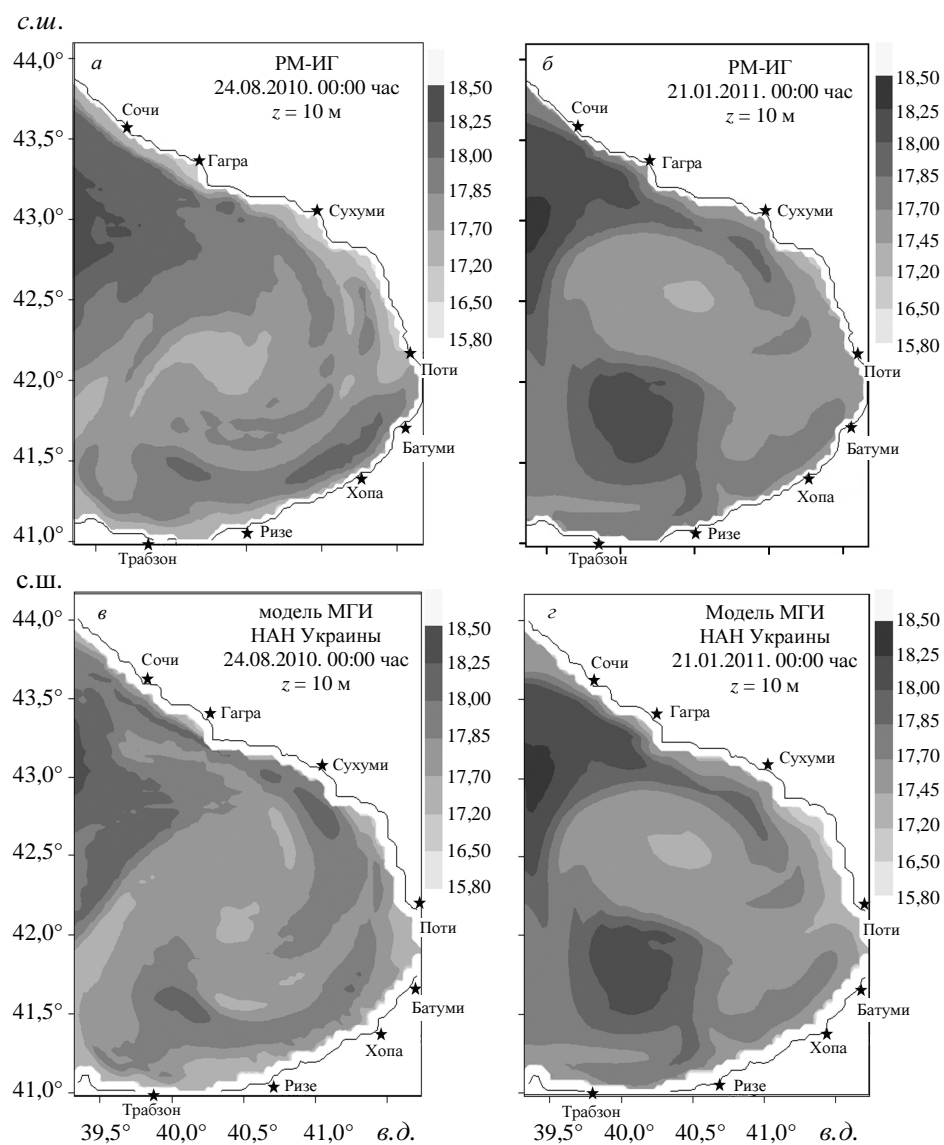


Рис. 4. Поля солёности (в ‰) на горизонте $z = 10$ м в моменты времени: 24 августа 2010 г. (а) и 21 января 2011 г. (б), предсказанные по РМ-ИГ; 24 августа 2010 г. (в) и 21 января 2011 г. (з), предсказанные по модели МГИ НАН Украины.

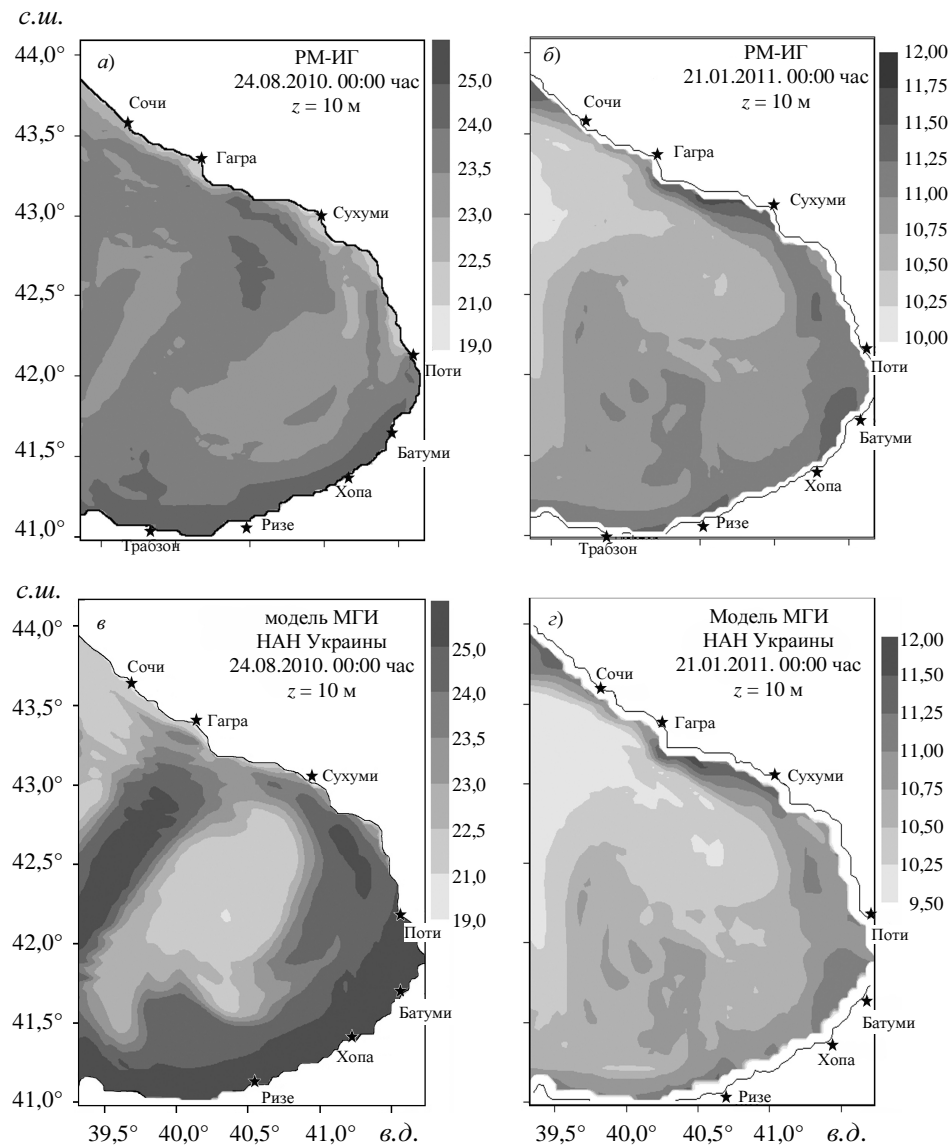


Рис. 5. То же самое, что и на рис. 4, но для поля температуры.

Из рис. 4 хорошо видно, что согласно обеим моделям поле солёности хорошо коррелирует с циркуляцией: в областях развития антициклонических образований обычно солёность вод ниже чем в зонах циклонических вихрей, что легко объясняется динамическими особенностями циркуляции.

В циклонических образованиях происходит подъем более солёных вод из глубинных слоев, а в антициклонических вихрях разрываются нисходящие потоки, переносящие менее солёные воды из верхних слоев вниз. На-

блюдается некоторое количественное различие между полями солёности и температуры, рассчитанными по моделям ИГ и МГИ НАН Украины.

В настоящее время результаты регионального прогноза динамики восточной части Черного моря доступны в интернете на сайтах:

www.ig-geophysics.ge

и

www.oceandna.ge.

На рис. 6 приведена схема развития региональной системы прогноза для восточной части Черного моря.

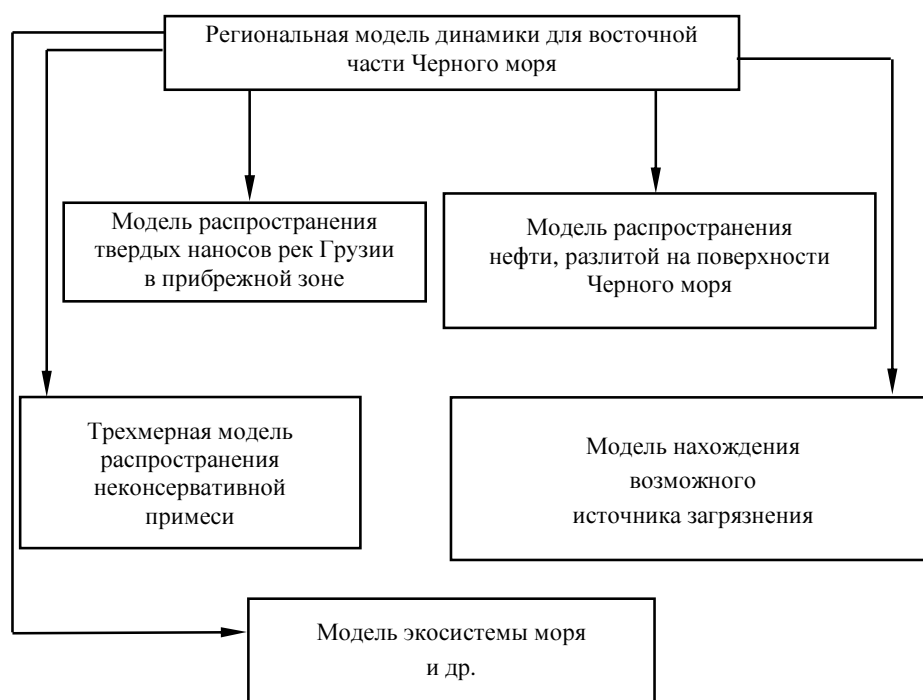


Рис. 6. Схема перспективного развития региональной системы прогноза для восточной части Черного моря.

Разработанная региональная система прогноза динамических процессов послужит базой для развития в дальнейшем комплексной системы моделирования. Такая система позволит предсказывать не только динамические процессы, а также разные процессы связанные, например, с распространением нефтепродуктов и других загрязняющих примесей в морском бассейне и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Korotaev G., Cordoneanu E., Dorofeev V., etc.* Near-operational Black Sea nowcasting/forecasting system // *European Operational Oceanography: Present and Future*, 4-th EuroGOOS Conference. Brest, France, 6-9 June, 2005. – P. 269-275.
2. *Kubryakov A., Grigoriev A., Kordzadze A., etc.* Nowcasting/Forecasting subsystem of the circulation in the Black Sea nearshore regions // *European Operational Oceanography: Present and Future*, 4-th EuroGOOS Conference. Brest, France, 6-9 June, – 2005. – P. 605-610.
3. *Kordzadze A.A., Demetrashvili D.I.* Some results of forecast of hydrodynamic processes in the easternmost part of the Black Sea // *J. Georgian Geophys. Soc.* – 2010. – vol. 14b. – P. 37-52.
4. *Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д. И., Сурмава А. А.* О реакции гидрологического режима Черного моря на изменчивость атмосферных процессов // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2004. – вып. 10. – С. 265-277.
5. *Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И., Сурмава А.А.* Численное моделирование гидрофизических полей Черного моря в условиях чередования атмосферных циркуляционных процессов // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2008. – том 44, № 2. – С. 227-238.
6. *Марчук Г.И., Кордзадзе А.А., Скиба Ю.Н.* Расчет основных гидрологических полей Черного моря на основе метода расщепления // *Изв. АН СССР: серия Физика атмосферы и океана*. – 1975. – том 11, № 4. – С. 379-393.
7. *Марчук Г.И., Кордзадзе А.А., Залесный В.Б.* Проблема математического моделирования морских и океанических течений // *Дифференциальные и интегральные уравнения. Краевые задачи*. – Тбилиси, 1979. – С. 99-151.
8. *Марчук Г.И., Кордзадзе А.А.* Теория возмущения и постановка обратных задач динамики океана // *Труды Тбилисского университета. Математика, механика, астрономия*. – 1986. – том 259, № 19-20. – С. 49-65.
9. *Кордзадзе А.А.* Математическое моделирование динамики морских течений (теория, алгоритмы, численные эксперименты). – М.: ОВМ АН СССР, 1989. – 128 с.
10. *Марчук Г.И.* Численные методы в прогнозе погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 353 с.
11. *Марчук Г.И.* Численное решение задач динамики атмосферы и океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 303 с.
12. *Korotaev G., Oguz T., Nikiforov A., Koblinsky C.* Seasonal, interannual, and meso-scale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // *J. Geophys. Res.* – 108 (C4). – 3122.2003. – doi:10.1029/2002JC001508.
13. *Джаошвили Ш.В.* Речные наносы и пляжеобразование на черноморском побережье Грузии. – Тбилиси, Сабчота Сакартвело, 1986. – 155 с.

Материал поступил в редакцию 29.10.2011 г.

АНОТАЦІЯ Представлена регіональна оперативна система прогнозу стану східній частині Чорного моря, яка розроблена в рамках міжнародних науково-технічних проєктів Євросоюзу *ARENA* і *ECOOP*. Регіональна система є одним з компонентів системи діагнозу і прогнозу стану Чорного моря. Її ядром є регіональна гідростатична модель динаміки Чорного моря з високою роздільною здатністю Інституту геофізики ім. М. Нодія (Тбілісі, Грузія), яка вставлена в модель загальної циркуляції Чорного моря, що використовується в МГІ НАН України. Регіональна система забезпечує триденний прогноз тривимірних полів перебігу, температури і солоності для східної частини Чорного моря, що включає Грузинський сектор морського басейну, з просторовим дозволом 1 км. Порівняльний аналіз результатів прогнозів, отриманих на основі регіональної моделі Інституту геофізики і моделі загальної циркуляції Чорного моря МГІ НАН України, показує, що висока роздільна здатність математичної моделі є важливим фактором для кращої ідентифікації прибережних вихорів.

ABSTRACT A regional operational forecasting system of the easternmost part of the Black Sea state developed within the International scientific-technical EU projects ARENA and ECOOP is considered. The regional system is one of the main components of the Black Sea state nowcasting/forecasting system. A core of the regional forecasting system is a high-resolution regional hydrostatic model of the Black Sea dynamics of the Institute of Geophysics (RM-IG), which is nested in the basin-scale model (BSM) of the Black Sea dynamics of MHI of the National Academy of Sciences of Ukraine. The regional system provides 3 days' forecast of 3-D fields of flow, temperature and salinity for the easternmost part of the Black Sea including Georgian sector of the sea basin with spacing 1 km. The comparative analysis of results obtained from RM-IG and BSM of MHI shows that high-resolvability of the mathematical model is very important factor for real identification of coastal processes.