

А.В. Григорьев¹, А.Г. Зацепин²¹ Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва² Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва**ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ВОД
РОССИЙСКОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННЫХ И КОНТАКТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Моделирование динамики вод Черного моря проводилось в рамках европейского проекта *ESCOOP* на основе модели *ПОМ* в ежедневном режиме (диагноз и прогноз на 3 суток) с горизонтальным разрешением ~ 1 км для российской зоны. Приводятся примеры расчетов и их сравнение с данными дистанционных (спутниковых) и контактных (гидрологические зондирования) наблюдений, результаты оценок физической адекватности моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, Черное море, дистанционные и контактные наблюдения, верификация модели.

Численное моделирование динамики вод Черного моря в ГОИНе осуществлялось в рамках европейского проекта *ESCOOP* (*European COastal-shelf sea OPERational observing and forecasting system*, 2007 – 2010 гг.) и национального ЕСИМО (Единая Система Информации о Мировом Океане). Базовой являлась широко известная численная модель *ПОМ* (*Princeton Ocean model*) [1 – 3]), адаптированная для региональных условий. Моделирование термохалинной структуры и циркуляции вод в Черном море производилось посредством региональной модели российской зоны моря, совмещенной с крупномасштабной моделью, используемой Морским гидрофизическим институтом НАН Украины (МГИ НАН Украины, г. Севастополь) с использованием технологии «вложенных сеток» [4].

Основные характеристики общеконтинентальной и региональной моделей перечислены в табл. 1. Разрешение региональной модели ~ 1 км по горизонтали при 18 слоях в σ -координатах. Горизонтальное разрешение модели МГИ НАН Украины составляет примерно 5 км при 35 слоях в z -координатах.

Общая схема взаимодействия моделей МГИ НАН Украины и ГОИН показана на рис. 1. Модель МГИ НАН Украины [5] усваивает спутниковые данные о топографии (альтиметрия) и о температуре поверхности моря, а также метеорологические данные (напряжения ветра, потоки тепла и массы), получаемые от Национальной метеорологической администрации Румынии в рамках европейского сотрудничества. ГОИН получает необходимые граничные условия для региональной российской модели с сервера МГИ НАН Украины в ежедневном режиме и производит диагностические и прогностические (на 3 суток) расчеты термохалинной структуры и динамики вод региона. Исходные данные для прогноза генерируются ежедневно в результате работы Оперативной системы диагноза и прогноза гидрофизических полей Черного моря МГИ НАН Украины (*Black Sea Forecasting Operational System – BSFOS*) [6 – 8]. Процесс получения исходной информации для региональной модели, осуществление модельных расчетов и визуализация результатов полностью

Таблица 1. Основные характеристики общебассейновой и региональной моделей.

Наименование модели	Основные особенности модели	Вертикальные координаты	Шаг сетки, м	Количество элементов сетки	Шаг по времени, с
1. Бассейновая модель (МГИ НАН Украины)	Модель с усвоением данных дистанционного зондирования	Фиксированные уровни в z-координатах σ-координата	~ 4 900	237 × 131 × 35	~ 600 ~ 120 (бароклинная мода)
2. Региональная модель северо-восточной прибрежной области российской зоны Черного моря	Модель <i>POM</i>		~ 1 000	304 × 254 × 18	~ 3 (баротропная мода)

автоматизирован, что позволяет с минимальными трудозатратами получать массовые результаты для их физического анализа.

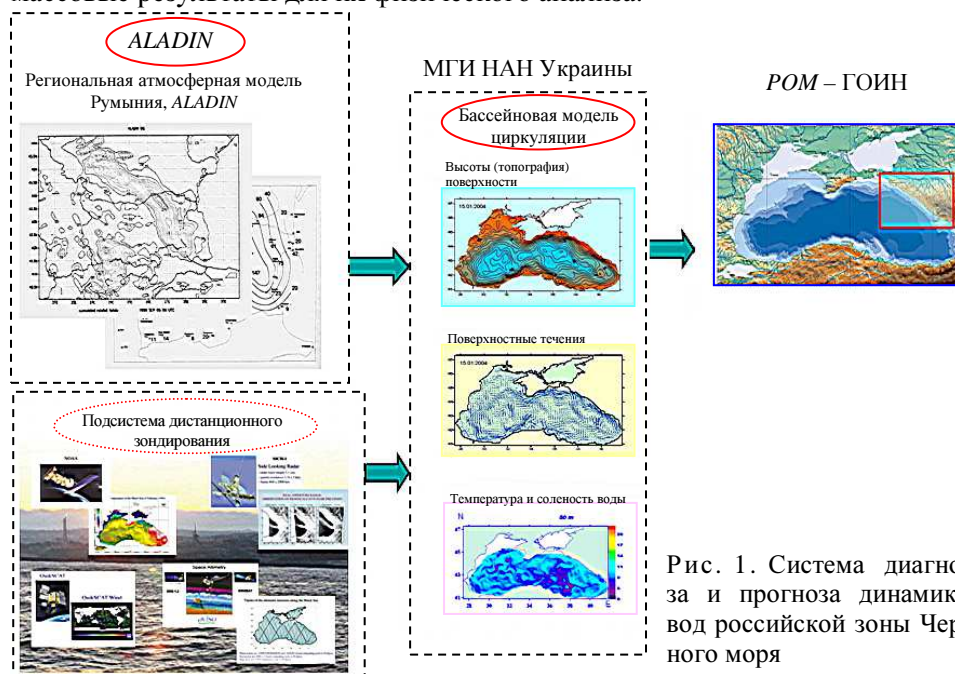


Рис. 1. Система диагноза и прогноза динамики вод российской зоны Черного моря

Еще до начала проекта *ECOOP* (европейский проект *ARENA – A Regional Capacity Building and Networking Programme to Upgrade Monitoring and Forecasting Activity in the Black Sea Basin*, и др.) такая система моделирования была апробирована, включая сравнение с данными натурных наблюдений. Пример результатов приведен на рис.2.

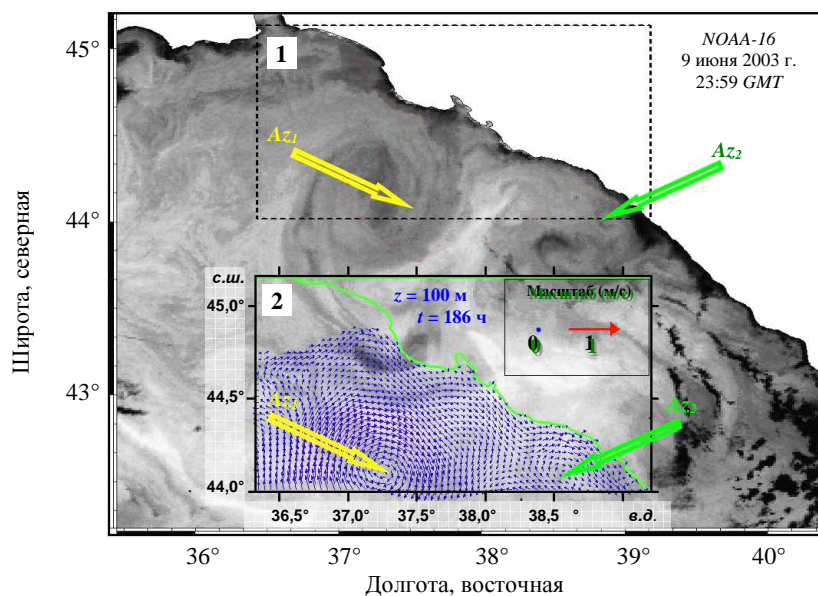


Рис. 2. Сравнение результатов моделирования течений с данными дистанционных наблюдений. 1 – область моделирования; 2 – результат моделирования.

На нем приведено изображение акватории Черного моря, полученное в тепловом инфракрасном (ИК-) диапазоне с помощью сканера AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer* – усовершенствованный радиометр высокого разрешения), установленного на борту космического аппарата (КА) NOAA-16. Изображение получено 9 июня 2003 г. в 23:59 GMT (*Greenwich Mean Time* – среднее время по Гринвичу). Пунктиром на рис. 2 выделена область (1), в которой проводился расчет поля скоростей течений. Результаты расчета представлены на вставке (2), помещенной, для удобства сравнения, так же в поле рис. 2. Аномалии темного тона на спутниковом снимке отражают наличие областей антициклонической завихренности. Нетрудно видеть (см. рис. 2), что модель воспроизводит не только расположенные на свале глубин антициклонические вихри с характерным горизонтальным масштабом ~ 100 км (Az_1), но и диагностируемые по данным контактных и спутниковых измерений вихри с меньшим горизонтальным масштабом: ~ 10 км (Az_2).

Для оценки качества моделирования динамики и термохалинной структуры вод Черного моря в регионе в течение выполнения проекта ECOOP представляет интерес сравнить его результаты с данными натуральных измерений – контактных и дистанционных. В качестве контактных использовались данные, полученные в экспедиционном рейсе НИС «Профессор Штокман» Института океанологии им. П.П. Ширшова (ИО РАН) в период с 9 марта по 2 апреля 2009 г. На рис. 3 показаны район работ судна и область моделирования.

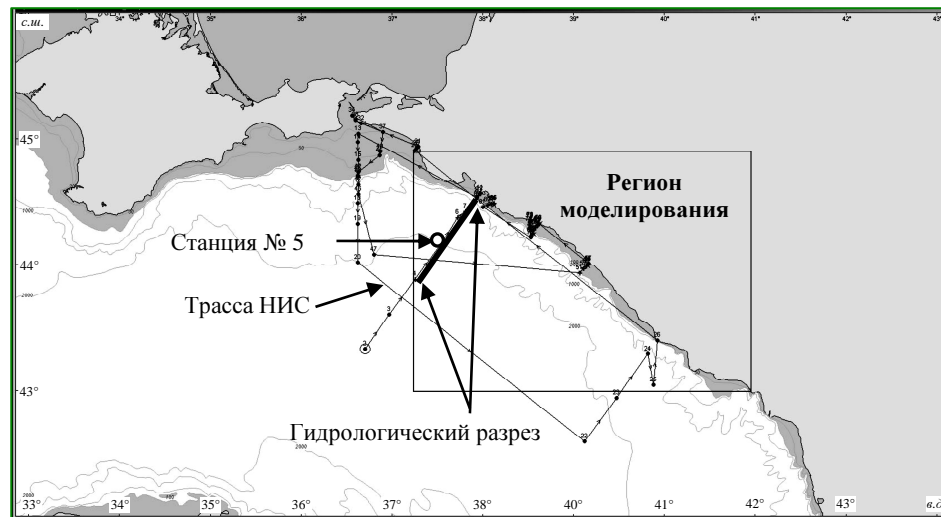


Рис. 3. Район работ НИС «Профессор Штокман» и область моделирования.

Отметим в начале некоторые характерные особенности вод региона в марте, которые должны находить свое отражение в данных измерений и моделирования (см. работу [9] и цитируемую в ней литературу)). В вертикальной структуре это верхний квазиоднородный слой (ВКС) мощностью несколько десятков метров, термо- хало- пикноклин до глубин ~ 500 м и нижележащий глубинный квазиоднородный слой. Главная особенность вертикальной

структуры вод Черного моря – наличие так называемого холодного промежуточного слоя (ХПС) с осью на глубинах в диапазоне 50 – 100 м в зависимости от точек наблюдений. В полях течений – это Основное черноморское течение (ОЧТ), распространяющееся вдоль материкового склона у его подножия, приблизительно вдоль изобаты 1 200 м, и формирующее общий циклонический круговорот в море. В области материкового склона наблюдаются также вихревые образования с пространственными масштабами ~100 км, а непосредственно в области свала глубин (шельфа-склона) – вихри с горизонтальными размерами ~ 10 км (см. рис. 2). Эти динамические особенности отражаются в распределении изолиний термохалинных характеристик на разрезах. В частности, в наличии соответствующих положению антициклонов прогибов изолиний. Отметим также, что соленость вносит основной вклад в пространственное распределение плотности вод моря, определяя его динамику. Поэтому профили, разрезы и карты, построенные по значениям солености, наиболее информативны при анализе особенностей динамики вод региона.

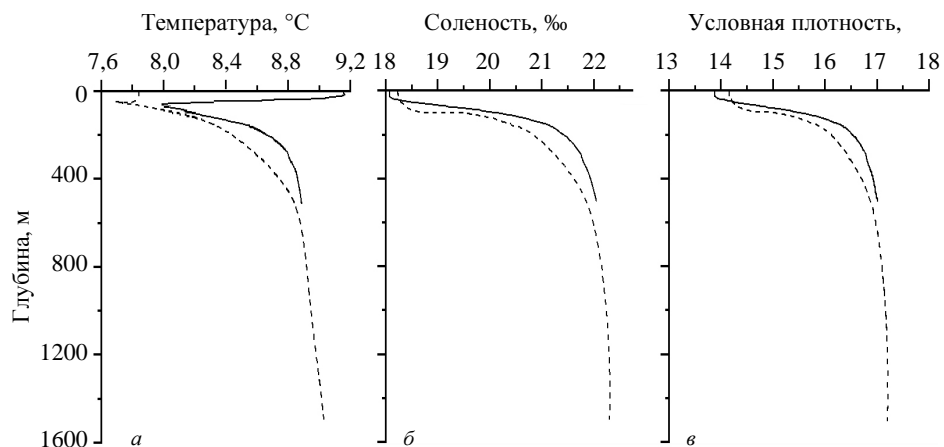


Рис. 4. Вертикальные профили температуры (а), солености (б) и условной плотности (в) воды на гидрологической станции № 5 (см. рис. 3) по данным зондирования (сплошные линии) и моделирования (пунктир).

Показанные на рис. 4 вертикальные профили гидрологических характеристик на станции № 5 (см. рис. 3), построенные как по данным зондирования, так и по модельным данным, отражают типичную вертикальную структуру вод региона в марте. В частности, наличие верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) мощностью ~ 40 м, холодного промежуточного слоя (ХПС) с осью на глубине примерно 60 м, главного пикноклина до глубин ~ 500 м и нижележащего квазиоднородного слоя. Вертикальные профили солености и плотности однотипны, что подтверждает преимущественный вклад в распределение плотности солености вод Черного моря. Качественно модельные и наблюдаемые профили весьма схожи. Для солености разница в значениях имеет порядок 0,1‰, для температуры – тот же порядок в градусах на глубине. Максимум различия температур наблюдается на поверхности – примерно 1,5°C. Как показано коллегами из МГИ НАН Украины, этот

дефект моделирования может быть уменьшен посредством учета проникающей коротковолновой радиации на поверхности моря [7]. В течение проекта *ESCOOP* мы не получали полной информации о потоках тепла.

На рис. 5 показаны распределения солёности на разрезе, перпендикулярном к берегу (см. рис. 3). Они имеют характерное для Чёрного моря уменьшение глубины залегания изолиний от берега к центру моря, вызванное общим циклоническим характером циркуляции. Разрез, представленный на рис. 5, *а*, построен по асинхронным данным в точках гидрологических зондирований, произведённых НИС «Профессор Штокман» в период с 10.03.2009 г. по 13.03.2009 г. На рис. 5, *б* показаны результаты моделирования в точках, соответствующих координатам и времени судовых наблюдений на разрезе. Сравнивая данные прямых измерений и моделирования (см. рис. 5, *а* и рис. 5, *б*), можно сделать вывод: распределения солёности на разрезах однотипны и имеют близкие количественные значения. В качестве различия отметим большие вертикальные градиенты солёности в области халоклина на разрезе, построенном по натурным данным. Но при построении разреза по модельным данным с пространственной дискретностью, соответствующей расчётной модельной сетке (~ 1 км по горизонтали) и в единый момент времени (10.03.2009, 12.00 GMT), на разрезе хорошо выражен прогиб изолиний в области свала глубин (на рис. 5, обведена пунктиром). Характерный прогиб изохалин вызван наличием здесь антициклонального вихря с пространственными размерами порядка ~ 10 км. Подобный вид изолиний у края материкового склона Чёрного моря нередко фиксируется по данным контактных измерений, проведённых с малым шагом (~ 1 км), во время многих гидрологических съёмок судами МГИ НАН Украины и ИО РАН [9].

Синоптическая изменчивость в пространстве и времени чётко выражена в модельных расчётах динамики вод региона. В качестве примера, на рис. 6 приведены модельные поля скоростей течений в начале и конце срока гидрологической съёмки, выполненной с помощью НИС «Профессор Штокман» (10.03.2009–02.04.2009), а на рис. 7 и рис. 8 – поля температуры и солёности на поверхности в начале и конце срока выполнения разреза (10.03.2009 – 13.03.2009). Поэтому вряд ли имеет смысл получать количественные оценки точности моделирования пространственного распределения термохалинных характеристик на основе сравнения данных моделирования и измерений. Но оценить качество моделирования возможно с использованием данных дистанционных наблюдений. Примеры результатов сравнения данных моделирования с данными спутниковых наблюдений приведены на рис. 9 и рис. 10. Так, синоптические вихри, отражаемые в поле солёности (модель) и концентрации хлорофилла-«а» (спутниковые наблюдения), демонстрируют их хорошее соответствие по пространственным размерам и горизонтальному расположению (см. рис. 9).

Спутниковое изображение концентрации хлорофилла-«а» было выбрано для диагностики наличия и пространственной локализации синоптических вихрей в регионе по причине их наибольшего соответствия. Так же, как и модельное поле солёности. К сожалению, анализ соответствия солёности и спутниковых изображений может носить только качественный характер.

Для получения количественных характеристик точности пространственных модельных полей можно использовать поля температуры поверхности моря. Например, среднеквадратичная (*root mean square – RMS*) по району моделирования разница между модельной и измеренной температурой морской поверхности *SST (Sea Surface Temperature)* для 2 июля 2009 г. оказалась равной $RMS = 1,1^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 10), и это типичная величина ошибки. Сравнение модельного поля температуры со спутниковыми данными *SST* также показывает их качественное согласие (см. рис. 10). Но использование каких-либо стандартных методов количественных оценок точности моделирования температуры поверхности моря в течение длительного периода времени не было проведено, поскольку именно на поверхности ошибки моделирования максимальны. Причины этого были описаны выше (неполное задание теплового потока).

Сопоставляя между собой рис. 9 и рис. 10, обратим внимание на наблюдающееся смещение горизонтальных аномалий температуры и солёности в модельных расчетах в сравнении с их положением на спутниковых изображениях. Частично этот эффект, возможно, может быть минимизирован посредством усвоения спутниковых данных в региональной модели (в настоящее время усвоение данных реализовано только в бассейновой модели).

Представляет также интерес рассмотреть зависимости ошибок прогноза от его заблаговременности. Имеет смысл сделать это на основе данных о температуре и солёности в моменты контактных измерений (для станции № 5). Результаты сравнения представлены на рис. 11. В прогнозе температуры обращает на себя внимание минимум ошибок в случае прогноза на 1 – 2 суток (кроме глубин ниже ХПС, где изменчивость значительно ниже, чем в ВКС). При этом в верхних слоях прогноз температуры оказывается ближе к измерениям, чем диагноз (0 дней на рис. 11). Под диагнозом в данном случае подразумевается осуществление расчетов на текущую дату в течение 1 суток (старт региональной модели от данных «вчерашнего» дня) с использованием соответствующих граничных данных из бассейновой модели («вложенные сетки») и атмосферного форсинга.

Для солёности максимум ошибок локализован в диапазоне глубин от 100 до 200 м (главный хало- пикноклин). В вышележащих слоях обращает внимание наличие локального максимума ошибок при прогнозе на 2 суток. Но в общем, прогноз на 1 сутки (и на некоторых глубинах – на 3 суток) по качеству не уступает или превосходит диагноз.

В качестве причины таких результатов можно предложить следующие. Диагностический расчет осуществлялся посредством «разгона» модели на срок 1 сутки. Возможно, этого времени недостаточно, и его следует увеличить, например, до 2 суток. Вероятно, в течение прогноза в большей степени проявляются динамические особенности взаимодействия течений с рельефом дна и адаптации с ветровым полем, которые находят свое проявление и в изменчивости профилей температуры и солёности.

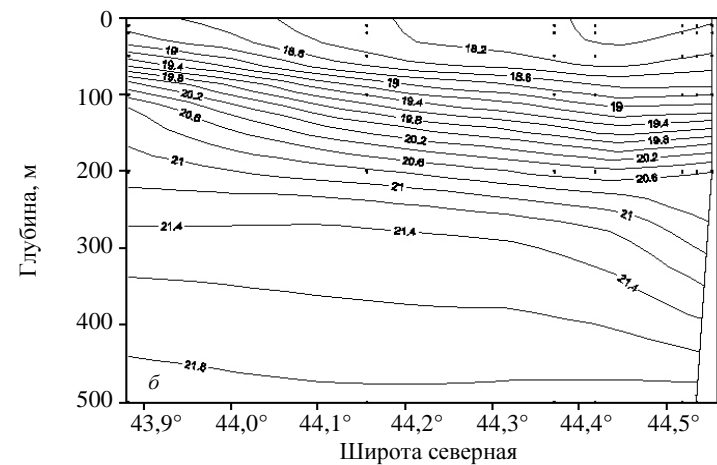
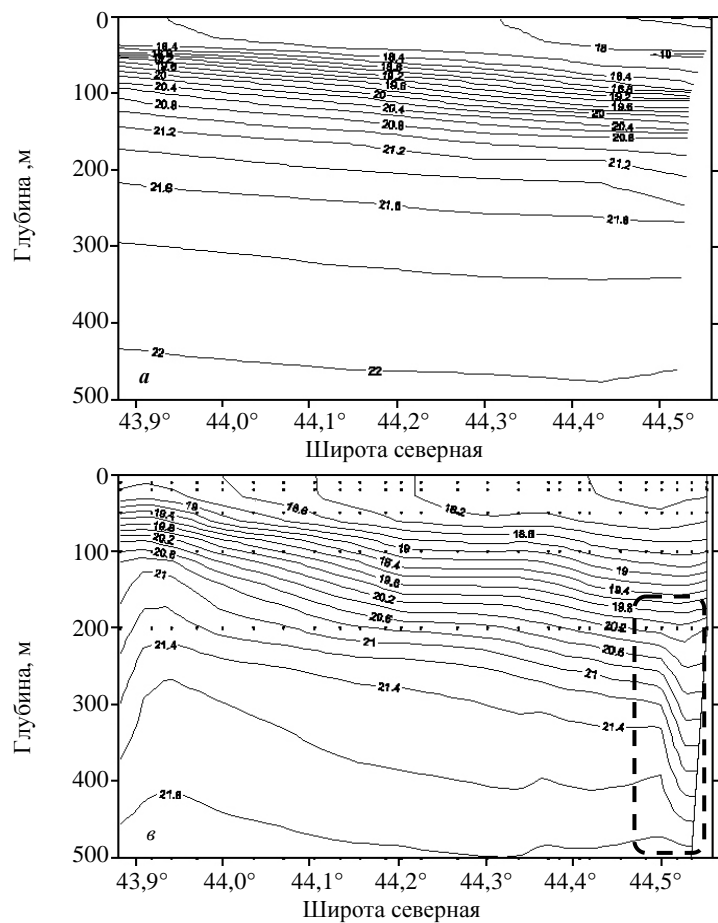


Рис. 5. Распределения солёности (в ‰) на гидрологическом разрезе (см. рис. 3), полученные по данным гидрологических зондирований (а) и данным моделирования (б, в). Пунктиром выделена зона «прогиба» изолиний в области свала глубин.

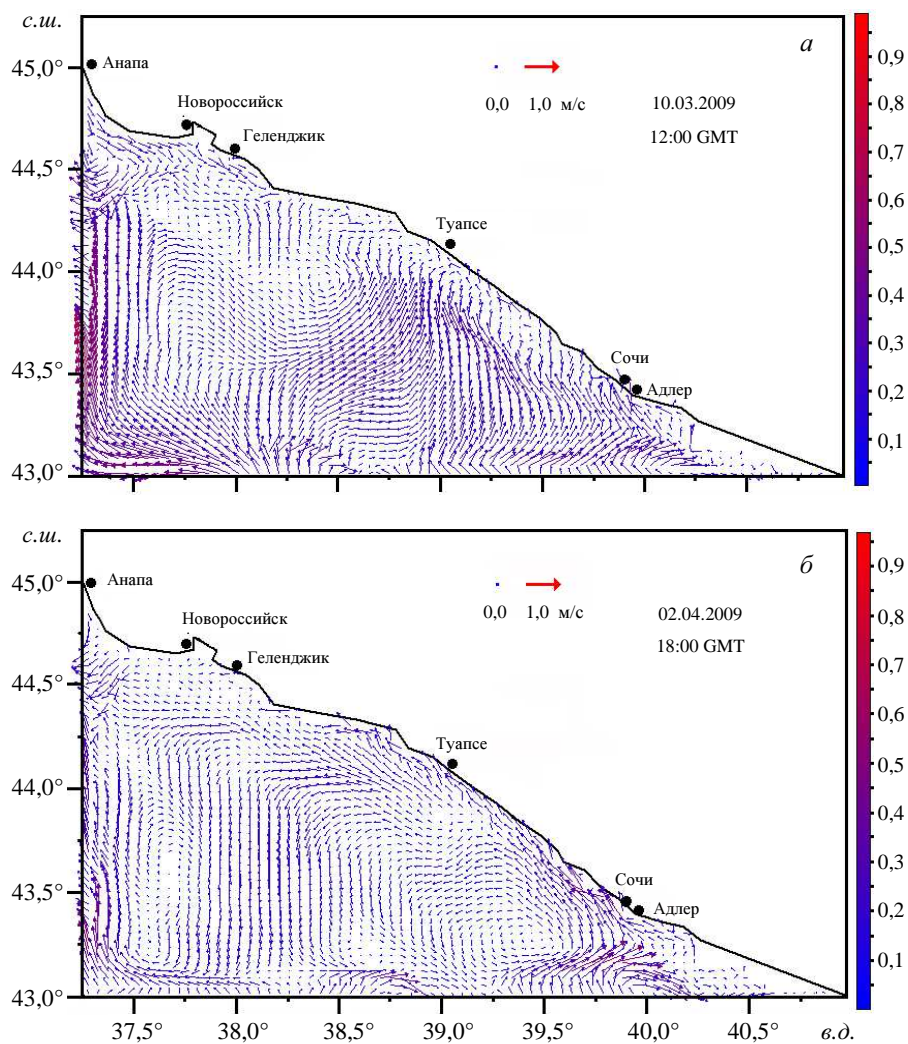


Рис. 6. Модельные поля скоростей течений на глубине 10 м:
 а – 10.03.2009 г., 12:00 GMT; б – 02.04.2009 г., 18:00 GMT

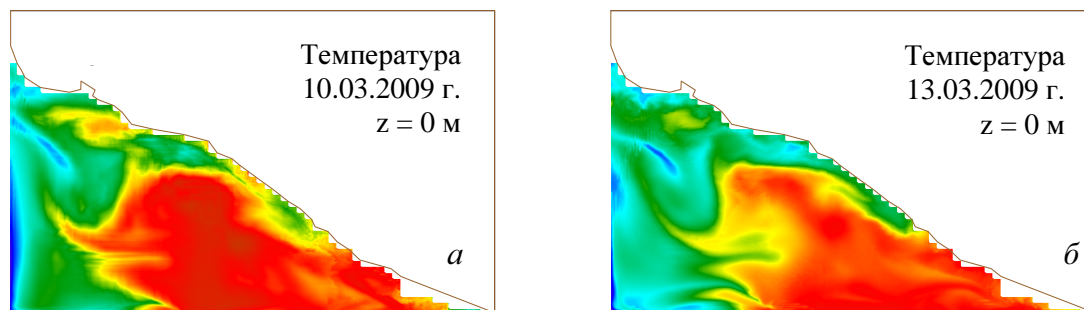


Рис. 7. Модельные поля температуры на поверхности 10.03.2009 (а) и 13.03.2009 (б).

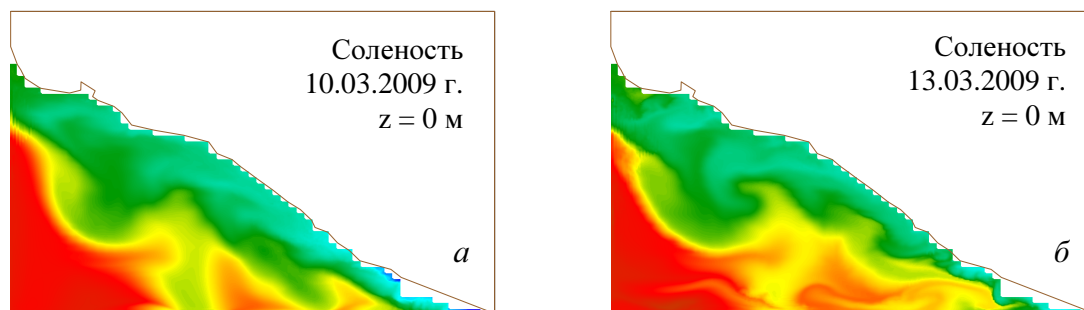


Рис. 8. Модельные поля солености на поверхности 10.03.2009 (а) и 13.03.2009 (б).

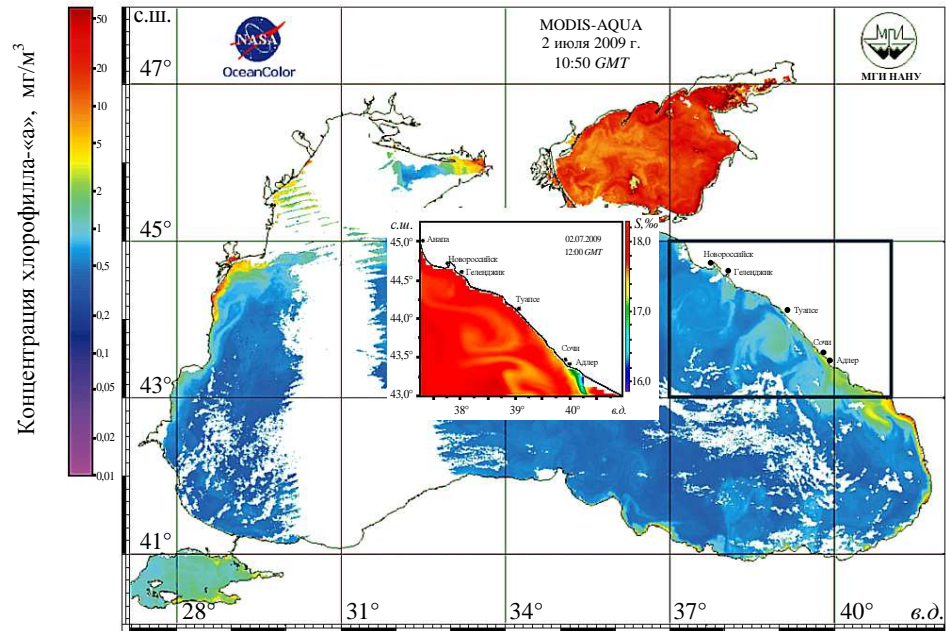


Рис. 9. Сравнение картин динамики вод в верхнем слое (на поверхности), полученных по данным спутниковых наблюдений хлорофилла-«а» и по результатам моделирования солёности (на врезке) – область моделирования отмечена прямоугольником.

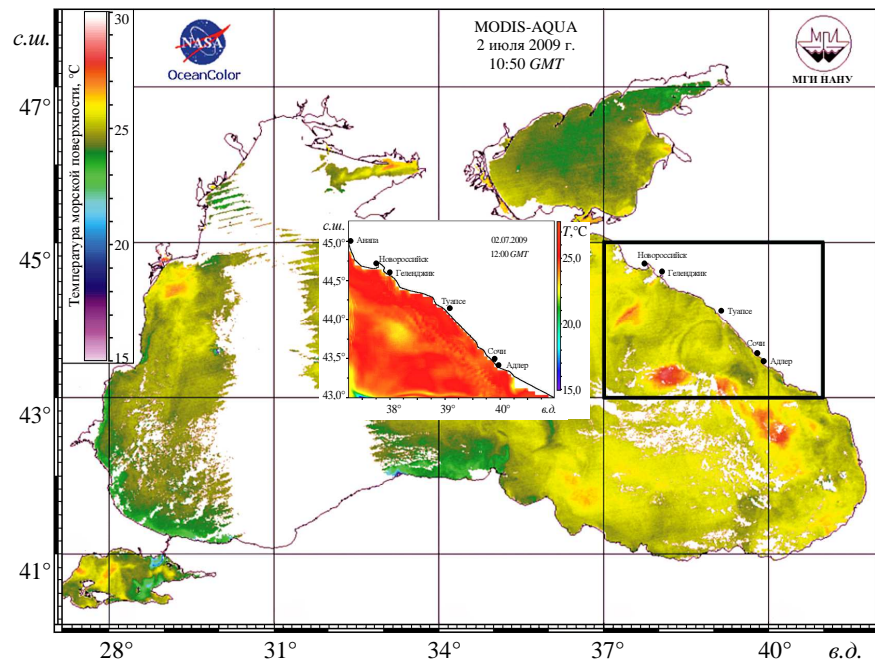


Рис. 10. Сравнение полей температуры поверхности моря, полученных по данным спутниковых наблюдений и результатам моделирования (на врезке) – область моделирования отмечена прямоугольником.

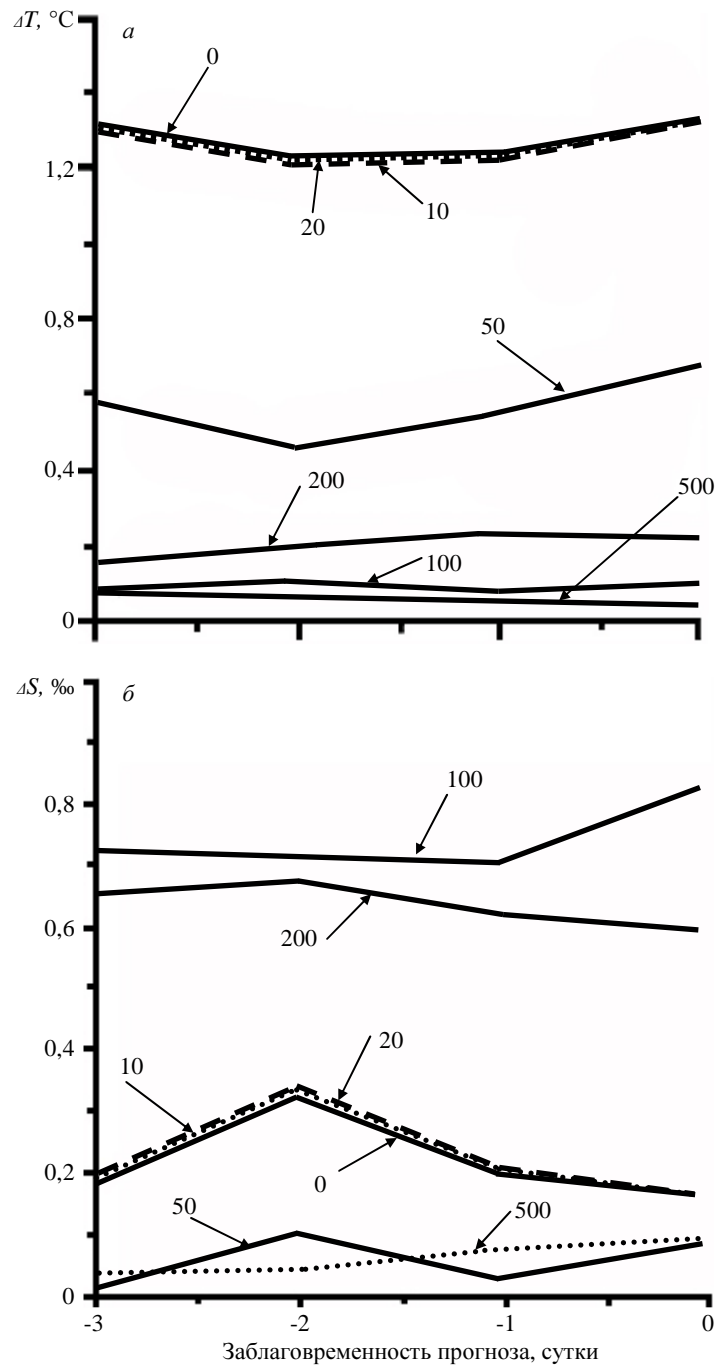


Рис. 11. Зависимости отклонения от измеренных значений (по модулю) от заблаговременности прогноза (1 – 3 суток, 0 – диагноз): *a* – модельной температуры ΔT ; *б* – солёности ΔS . Станция № 5 (см. рис. 3). Цифрами обозначена глубина в метрах

В качестве выводов по представленным результатам можно сделать следующие. Созданная автоматизированная система моделирования динамики вод Черного моря позволяет получать физически адекватные результаты расчетов термохалинной структуры вод и полей течений. Расчеты выполняются в диагностическом и прогностическом (на 3-е суток) режиме. Увеличение пространственного разрешения процессов позволяет воспроизводить в расчетах детали гидрологической структуры, которые не находят отображения в крупномасштабных моделях (вихри с горизонтальными пространственными размерами ~10 км). Модель воспроизводит отражаемые в данных наблюдений реальные динамические структуры. Модельные и наблюдаемые вертикальные профили весьма похожи. Для солености разница в значениях составляет порядка ~0,1‰, для температуры – тот же порядок (в °C) на глубине (но не на поверхности). Синоптические вихри, отраженные в модельных полях солености, показывают высокое соответствие пространственных размеров и горизонтального расположения спутниковым изображениям. Сравнение моделируемых полей температуры со спутниковыми данными свидетельствует об их качественном согласии. Типичное среднеквадратичное различие между модельными данными и измеренными SST составила $RMS = 1,1^{\circ}\text{C}$. Наблюдается также некоторое смещение горизонтальных аномалий температуры и солености в модельных расчетах в сравнении с их положением на спутниковых изображениях. Этот эффект может быть минимизирован посредством усвоения спутниковых данных в региональной модели (в настоящее время усвоение данных реализовано только в бассейновой модели).

Кроме вполне удовлетворительного качественного и количественного совпадения данных моделирования динамики вод российской зоны Черного моря с данными контактных и дистанционных измерений, важен еще один результат. На основании проведенного эксперимента можно сделать важный для оперативной океанографии вывод: предложенная технология моделирования позволяет вполне адекватно отслеживать изменчивость вод региона с пространственно-временным разрешением, недостижимым при использовании только данных натуральных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blumberg, A. F. and Mellor, G. L.:* A description of a three-dimensional coastal ocean model. in Three Dimensional Shelf Models, Coast. Estuar. Sci., Vol. 5, edited by: Heaps, N., 1-16, AGU, Washington, D. C., 1987.
2. *Mellor, G. L.:* User's guide for a three dimensional, primitive equation, numerical ocean model, report, Program in Atmos. and Ocean. Sci., Princeton Univ., Princeton, 3, 35 pp., 1991.
3. *Mellor, G. L. and Yamada, T.:* Development of turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys., 20, 851-875, 1982.
4. *Kubryakov, A. I.* Application of nested grid technology at the development of the monitoring system of hydrophysical fields in the Black Sea coastal areas, Ecological safety of coastal and shelf zones and complex use of shelf resources, Issue 11, NAS

- of the Ukraine, edited by: Korotaev, G. K. and Kubryakov, A. I., Sevastopol, 31-50, 2004. (In Russian)
5. *Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К.*: Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихререзающей модели циркуляции Черного моря, *Морской гидрофизический журнал*, 1, 52-68, 2004.
 6. *Kubryakov, A., Grigoriev, A., Kordzadze A., Korotaev, G., Stefanescu, S., Trukhchev, D., and Fomin, V.*: Nowcasting/Forecasting subsystem of the circulation in the Black Sea nearshore 20 regions, in: *European Operational Oceanography: Present and Future*, edited by: Dahlin, H., Flemming, N. C., Marshand, P., and Petersson, S. E., *Proceedings of the Fourth EuroGOOS International Conference on EuroGOOS*, 6-9 June 2005, Brest, France, ISBN 92-894-9788-2, 605-610, 2006.
 7. *Kubryakov A. I., Korotaev G. K., Dorofeyev V. L., Ratner Yu. B., Palazov A., Valchev N., Malciu V., Matescu R., and Oguz T.*: Black Sea coastal forecasting systems, *Ocean Sci. Discuss.*, 8, 1055-1088, 10 doi:10.5194/osd-8-1055-2011, 2011.
 8. *Kubryakov, A., Korotaev, G., Ratner, Yu., Grigoriev, A., Kordzadze, A., Stefanescu, S., Valchev, N., and Matescu, R.*: The Black Sea Nearshore Regions Forecasting System: operational implementation, *Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges*, edited by: Dahlin, H., Bell, M. J., Flemming, N. C., and Petersson, S. E., *Proceedings of the Fifth International Conference on EuroGOOS*, 20-22 May, Exeter, UK, 293-296, 2008.
 9. *Zatsepin, A. G., Ginzburg, A. I., Kostianoy A. G., Kremenetskiy, V. V., Krivosheya, V. G., Stanichny, S. V. and Poulain P.-M.*: Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing, *J. Geophys. Res.*, 108, C8, doi:10.1029/2002JC001390, 2003.

Матеріал поступив в редакцію 26.10.2011 г.

АНОТАЦІЯ Моделювання динаміки вод Чорного моря проводилося в рамках європейського проекту *ЕССООН* на основі моделі *РОМ* в щоденному режимі (діагноз і прогноз на 3 доби) з горизонтальною роздільною здатністю ~ 1 км для російської зони. Наводяться приклади розрахунків та їх порівняння з даними дистанційних (супутникових) і контактних (гідрологічне зондування) спостережень, результати оцінок фізичної адекватності моделювання.

ABSTRACT Modeling of the Black Sea waters dynamics was conducted within the framework of the European *ЕССООН* project on the basis of Princeton Ocean Model (*РОМ*). Nowcasting and tree days forecasting of the Black Sea dynamics was carried out in a daily mode with horizontal resolution of ~1 km along the Russian coast of the basin. Examples of calculations are presented and their comparison with space remote sensing and in situ (hydrological measurements) data is fulfilled, results of model validation are discussed.