

УДК 551.465.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЧЁРНОГО МОРЯ

1. Введение

Изучение гидротермодинамических процессов в Чёрном море и создание оперативной системы диагноза и прогноза состояния моря, является одним из главных вопросов океанографии Чёрного моря. Для осуществления этих целей большое научное и практическое значение имеет разработка таких математических моделей, которые способны реально воспроизводить процессы, протекающие в Чёрном море.

В настоящее время у нас и зарубежом разработаны прогностические модели динамики Чёрного моря, которые достаточной адекватностью воспроизводят основные черты циркуляционных процессов [1-11].

Целью настоящей статьи является описание некоторых результатов моделирования гидротермодинамических процессов во всём бассейне и Грузинском секторе Чёрного моря на основе бароклинических прогностических моделей общей (пространственное разрешение 5 км) и региональной циркуляции (пространственное разрешение 1 км), развитых в Институте геофизики им. М. Нодиа.

2. Описание модели общей циркуляции

Численная, бароклиническая прогностическая модель динамики Чёрного моря основана на полной системе уравнений гидротермодинамики океана в гидростатическом приближении, записанной в Декартовой системе координат для отклонений термодинамических величин от соответствующих стандартных вертикальных распределений [8, 10]. Модель учитывает: рельеф морского дна и конфигурацию бассейна, атмосферное воздействие, водообмен между Чёрным и Мраморным морями через пролив Босфор, речной сток Дуная, поглощение поверхностным слоем моря суммарной солнечной радиации, пространственно-временное изменение коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости и диффузии, чередование типов атмосферной циркуляции, развивающихся над акваторией Чёрного моря. Модель позволяет учитывать атмосферное термодинамическое воздействие как условиями Дирихле, путём задания температуры и солёности на поверхности моря, так и условиями Неймана, путём задания потоков тепла, испарения и атмосферных осадков. Ветровое воздействие атмосферы учитывается заданием на поверхности моря компонентов тангенциального напряжения трения ветра. Следует отметить, что описанная модель является развитием модели [12-14], которая представлялась первой моделью динамики Чёрного моря, основанной на полной системе уравнений гидротермодинамики океана.

3. Численная схема

Для решения системы уравнений используется двуциклический метод расщепления по физическим процессам, вертикальным координатным плоскостям и линиям, который достаточно детально описан в [14, 15]. Метод позволяет решение нестационарной пространственной задачи свести к решению сравнительно простых двумерных и одномерных задач.

4. Моделирование общей циркуляции Чёрного моря

Предложенная модель реализована в первую очередь для всего бассейна Чёрного моря с целью проведения детальных исследований по влиянию различных физических факторов на пространственно-временную структуру общей циркуляции Чёрного моря. Кроме того, рассчитанные циркуляционные параметры были использованы в разных задачах по распространению примесей в Чёрном море.

4.1 Параметры задачи

При реализации модели использовались три расчётные сетки с разными разрешениями – постоянными горизонтальными шагами 37, 10 и 5 км, соответственно. В последнем случае количество точек сетки по горизонтальным осям было 223 и 109, соответственно, а по вертикали бралось 32 расчётных уровня, расположенных на глубинах: 1, 3, 5, 7, 11, 15, 25, 35, 55, 85, 135, 205, 305, ..., 2205 м. Учитывалась зависимость альбедо поверхности Чёрного моря от зенитного угла Солнца [8]. Параметр поглощения солнечной радиации соответствовал обычной океанской воде, когда примерно 10% падающей радиации достигает глубину 10 м. Временной шаг брался равным 1 ч, а параметр Кориолиса зависел от широты следующим образом: $l = l_0 + \beta y$, где $l_0 = 0,95 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $\beta = 10^{-13} \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

4.2 Результаты численных экспериментов

С помощью численных экспериментов была изучена роль различных факторов на формирование гидрофизического режима. В частности, расчёты показали, что поглощение радиации морской водой вызывает малые суточные колебания температуры самого верхнего слоя моря с толщиной примерно 10-15 м с амплитудой 0.2-0.3⁰ С. Не смотря на малые изменения температуры, из-за большой объёмной теплоемкости воды, верхние слои Чёрного моря аккумулируют значительное количество тепла. Энергетическое влияние поглощения радиации больше всего проявляется в августе и в этот период верхний слой моря может поглощать такой запас тепловой энергии, который было бы достаточно для прогрева на 10⁰С слоя воздуха толщиной примерно 600 м, лежащего над акваторией Чёрного моря.

Один из главных численных экспериментов, проведённых на основе предложенной модели (с разрешением 5 км), было моделирование внутригодовой изменчивости гидрологического режима Чёрного моря в условиях чередования разных типов ветра. Эти типы ветров были взяты из [16], в котором на основе обработки данных наблюдений за 1946-

1962 гг. установлено 41 тип атмосферной циркуляции над Чёрным морем. Численный эксперимент имел целью изучить отклик циркуляции Чёрного моря на нестационарное атмосферное воздействие. Начало интегрирования соответствовало к 1 января и в качестве начальных условий принимались среднегодовые климатические поля, полученные на основе той же модели, с использованием среднегодовых климатических входных данных. Нестационарность атмосферной циркуляции сводилась к чередованию 24 типов ветра (которые характеризуются с наибольшей повторяемостью над Чёрным морем) в течение одного модельного года.

Анализ результатов численного эксперимента показал, что под влиянием нестационарности атмосферных процессов циркуляция поверхностного слоя моря претерпевала значительные качественные и количественные изменения и в течение года испытывала непрерывную трансформацию. Интенсивность морской циркуляции ослабевала летом, по мере ослабления атмосферной циркуляции и усиливалась осенью и зимой, когда ветры становились более интенсивными. Численный эксперимент показал также, что интенсивная атмосферная циркуляция (>15м/с) способствует ослаблению формирования вихрей в верхнем слое и наоборот – при слабых ветрах усиливается вихреобразование.

С целью иллюстрации трансформации поверхностной циркуляции, здесь выбран интервал времени 5668-5800 ч (август, отсчёт времени производится с 1 января), когда атмосферная циркуляция перестраивалась так, как эта показана в таблице.

Таблица. Чередование типов ветра за 5668 – 5692 ч (август)

№	Направление ветра	Скорость ветра, м/с	Интервал времени, часы
1	Северо-восточн.	5-10	5668-5692
2	Северо-западн.	1	5692-5736
3	Юго-западн.	5-10	5736-5758
4	Зап. - сев.-западн.	1	5758-5800

Рис.1 показывает трансформацию циркуляции моря на глубине 3 м под влиянием перестройки атмосферной циркуляции. Из этого рисунка видно, что вихревые циркуляции больше выражены в случае низких скоростей. Среди прибрежных антициклонических вихрей более интенсивен вихрь в юго-восточной части моря – т. н. Батумский антициклон. Численный эксперимент показал, что Батумский антициклон является довольно устойчивым образованием в тёплый сезон года. следует отметить, что аналогичный вывод получен в [3].

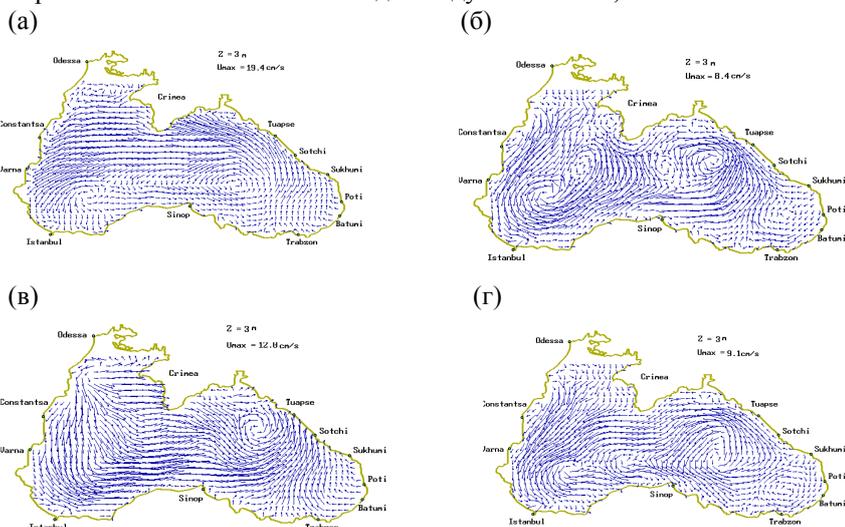


Рис.1. Поля течения в августе на глубине 3 м: (а) северо-вост. ветер (5-10 м/с), t=5690 ч; (б) северо-запад. ветер (1м/с), t = 5734 ч; (в) юго – запад. ветер (5-10 м/с), t=5756 ч; (г) запад.-северо- западн. ветер (1м/с), t = 5798 ч.

особенно чувствителен по отношению к изменчивости атмосферной циркуляции верхний, 20-30 метровый слой моря; каков бы не был характер атмосферной циркуляции, примерно ниже глубины 20-30 м, циркуляция Чёрного моря почти всегда получает циклонический характер с внутренними основными циклоническими вращениями в западной и восточной частях бассейна; антициклоническое движение вод моря по всему бассейну никогда не наблюдалось в течение всего периода чередования типов атмосферной циркуляции.

5. Моделирование и прогноз региональной циркуляции

В дальнейшем, модель общей циркуляции была адаптирована к Грузинскому сектору Чёрного моря в рамках международного проекта ARENA, главной целью которой являлось развитие оперативной прогностической системы Чёрного моря. Область решения задачи охватывала часть Грузинской акватории, включая порты Сухуми, Батуми и Поты. Жидкая граница, отделяющая выделенную акваторию от открытой части Чёрного моря, проходила вдоль меридиана 41° в. д., а количество точек вдоль осей x и y составляло 69 и 203, соответственно, горизонтальное разрешение модели было 1 км. В рамках проекта ARENA в течение 22-26 июля 2005 года, впервые для

Черноморского региона был осуществлён пилотный эксперимент по функционированию системы диагноза и прогноза состояния Чёрного моря в режиме времени, близком к оперативному. В эксперименте участвовали ведущие научно-исследовательские океанографические центры всех причерноморских стран. Составной частью этого эксперимента был расчёт прогноза основных гидрофизических полей на 48 часов с высоким разрешением в Грузинском секторе прибрежной зоны Чёрного моря с помощью региональной модели [11]. Проведению пилотного эксперимента предшествовал подготовительный этап, целью которой была состыковка нашей модели региональной циркуляции с моделью общей циркуляции Чёрного моря Морского гидрофизического Института (МГИ) НАНУ (г.Севастополь, Украина).

Опытный расчёт прогноза циркуляции проводился для временного интервала: 7 июня, 00 ч, 2003 – 15 июня, 00 ч, 2003.

Все входные данные, необходимые для расчёта прогноза на вставленной сетке с высоким разрешением в части Грузинской акватории мы получали из МГИ. Эти данные включали результаты прогноза циркуляции, температуры и солёности (трёхмерные поля для нашей локальной области), рассчитанные по модели МГИ с разрешением 5 км, а также климатические данные испарения, атмосферных осадков и потоков тепла на поверхности Чёрного моря, соответствующие прогностическому интервалу. Начало интегрирования системы уравнений модели соответствовало к моменту времени 00 ч 7 июня 2003 года.

На рисунке 2 показаны рассчитанные прогнозы циркуляции к моменту 12:00ч 9 июня 2003 года на глубине 5м по модели МГИ с горизонтальным разрешением 5 км и региональной модели - с разрешением 1 км .

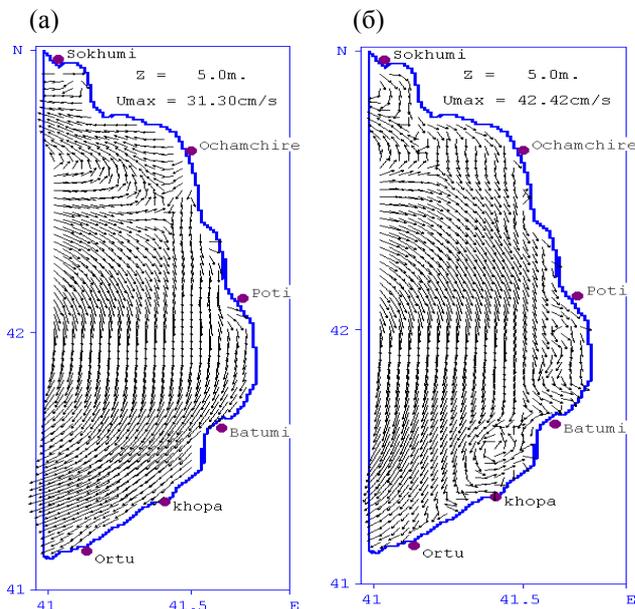


Рис. 2. Поля течения на глубине 5м в 12:00 ч, 9 июня 2003 года, рассчитанные (а) по модели МГИ и (б) региональной модели.

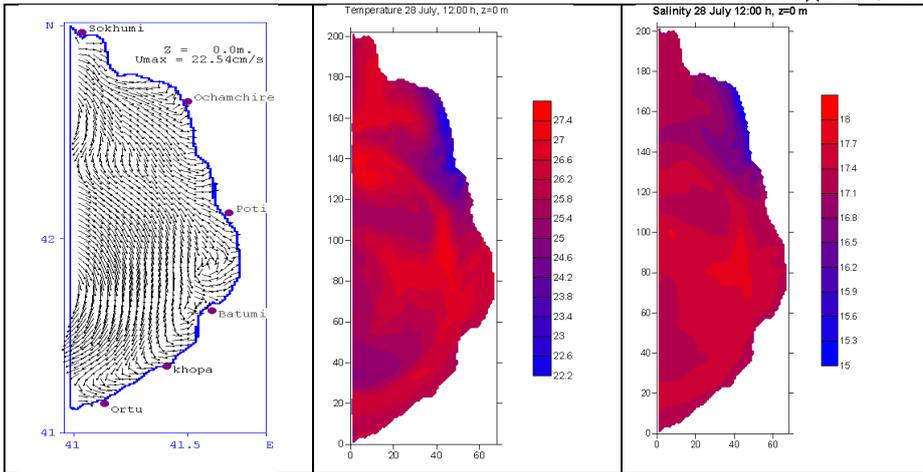
Из этих рисунков хорошо видно, что региональная модель с высоким разрешением описывает формирование прибрежных вихрей малых размеров, в то время как модель МГИ с более грубым разрешением не способна воспроизводить такие вихри.

Пилотный эксперимент стартовал в 12:00 ч 22 июля 2005 года и в течение 5 дней ежедневно рассчитывались морские прогнозы с заблаговременностью 48 часов. В качестве граничных условий на жидкой границе, использовались результаты расчёта по модели динамики Чёрного моря МГИ. После завершения расчётов прогноза, результаты пересылались по Интернету в МГИ для анализа и сопоставления с реальными данными.

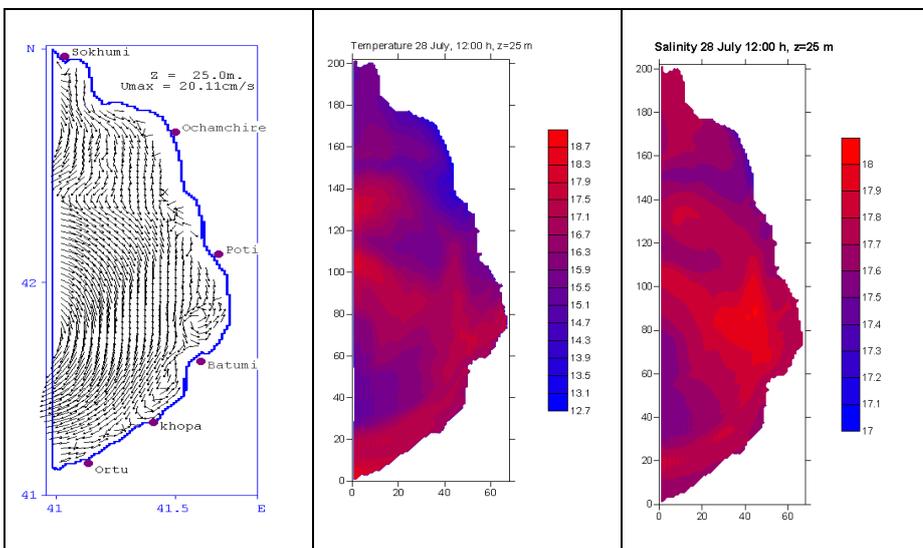
С целью иллюстрации на рисунках 3 и 4 представлены результаты прогнозов на 24 и 48 часов на поверхности моря и на глубине 25 м. В этом случае начало интегрирования соответствовало к моменту 12:00 ч 26 июля 2005 года. Из рисунков видно, что в период прогностического интервала в прибрежной зоне Грузии преобладала циркуляция антициклонического характера, которая, по-видимому, является частью хорошо известного Батумского антициклона. Этот вихрь является довольно устойчивым образованием на протяжении всего теплого сезона года [3, 10]. Из рисунков видно также, что узкая береговая зона характеризуется тенденцией формирования антициклонических вихрей малых размеров.

Сопоставление результатов морских прогнозов с данными наблюдений, которое проводилось в МГИ, показал способность высоко разрешающей региональной модели реально прогнозировать гидрофизические процессы [11].

(a)	(б)	(B)
-----	-----	-----



რის.3. Рассчитанные прогнозы (а) циркуляции, (б) температуры и (в) солёности к моменту времени 12:00 ч, 28 июля 2005 г. на поверхности Чёрного моря в части Грузинского сектора моря.



რის. 4. То же самое, что и на рис. 3, но на глубине 25 м.

ლიტერატურა - REFERENCES – ЛИТЕРАТУРА

- Oguz T., P. Malanotte-Rizzoli, D. Aubrey 1995. Wind and thermohaline circulation of the Black Sea driven by yearly mean climatological forcing, *J. Geophys. Res.*, 100 (C4), pp.6845-6863.
- Staneva, J. V., D. E. Dietrich, E. V. Stanev, M. J. Bowman 2001. Rim current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving Black Sea general circulation model, *J. Marine Systems*, v. 31, pp. 137-157.
- Korotaev, G., T. Oguz, A. Nikiforov, and C. Koblinsky 2003.
- Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data, *J. Geophys. Res.*, 108(C4), 3122, 2003, doi:10.1029/2002JC001508.
- Korotenko, K. A., Dietrich D. E., Bowman M. J. 2003. Modeling circulation and oil spill transport in the Black Sea, *Oceanology*, t.43, N 3, pp.367-378.
- Kara, A. B., A. J. Wallcraft and H. E. Hurlburt 2005. A New Solar Radiation Penetration Scheme for use in Ocean Mixed Layer Studies: An Application to the Black Sea Using a Fine –Resolution Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), *J. Physical Oceanography*, vol 35, pp. 13-32.
- Demetrashvili D. I.- Modeling of hydrophysical fields in the Black Sea 2003. *J. Georgian Geophys. Soc.*, v.8b, 2003, pp.19-27.
- Kordzadze A. A., Demetrashvili D. D. 2004. Numerical modeling of inner-annual variability of the hydrological regime of the Black Sea with taking into account of alternation of different types of the wind above its surface. *Proceed. of Intern. Conference: “A year after Johannesburg-Ocean Governance and Sustainable Development: Ocean and Coasts – a Glimpse into the Future”*. Kiev, Ukraine, October 27-30, 2003, pp.495-505.
- Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И., Сурмава А. А. 2007. О циркуляции в Чёрном море при очень сильных и слабых ветрах, *Метеорология и гидрология*, № 9, с.58-64.
- Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И., Сурмава А. А. 2008. Численное моделирование гидрофизических полей Чёрного моря в условиях чередования атмосферных циркуляционных процессов, *Изв. РАН, Физика атмосферы и океана*, т.44, № 2, с.227- 238.

11. Kordzadze A., Demetrashvili D. 2008. Simulation and forecast of hydrophysical fields in the part of the Georgian Black Sea coastal zone. J. Georgian Geophys. Soc., v.12b, 2008 (in press).
12. Марчук Г. И., Кордзадзе А. А., Скиба Ю. Н. 1975. Расчёт основных гидрологических полей Чёрного моря на основе метода расщепления. - Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. Т.11, N 4, с.379--393.
13. Марчук Г. И., Кордзадзе А. А., Залесный В. Б. 1979. Проблема математического моделирования морских и океанических течений. В кн.: Дифференциальные и интегральные уравнения. Краевые задачи. Тбилиси, с.99-151.
14. Кордзадзе А. А. 1989. Математическое моделирование динамики морских течений (теория, алгоритмы, численные эксперименты), М., ОВМ АН СССР, 218 с.
15. Марчук Г. И. 1974. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Л., Гидрометеиздат, 303 с.
16. Атлас волнения и ветра Чёрного моря 1969. Л., Гидрометеиздат, 112 с.

უაკ 551.465.5

შავი ზღვის ცირკულაციური პროცესების მოდელირება და პროგნოზი. /კორძაძე ა., დემეტრაშვილი დ./ჰმი-ს შრომათა კრებული -2008.-ტ.115.-გვ. 122-131.- რუს.; რეზ. ქართ., ინგლ., რუს.

განიხილება შავი ზღვის მთელ აუზსა და ზღვის საქართველოს სექტორში მიმდინარე დინამიკური პროცესების მოდელირების ზოგიერთი შედეგები შავი ზღვის ზოგადი (5კმ სივრცითი გარჩევისუნარიანობით) და რეგიონალური (1კმ სივრცითი გარჩევისუნარიანობით) ცირკულაციის ბაროკლინური პროგნოსტიკული მოდელების საფუძველზე, რომლებიც განვითარებულია მ. ნოდიას გეოფიზიკის ინსტიტუტში.

UDC 551.465.5

MODELING AND FORECAST OF CIRCULATION PROCESSES OF THE BLACK SEA./Kordzadze A., Demetrashvili D./Transactions of the Georgian Institute of Hydrometeorology. -2008. - т.115. – p. 122-131. - Russ.; Summ. Georg.; Eng.; Russ.

Some results of modelling of dynamic processes in the whole Black Sea and in the Georgian sector of the sea basin on the basis of the baroclinic prognostic models of the Black Sea general (spatial resolution 5 km) and regional circulations (spatial resolution 1 km), developed at M. Nodia Institute of Geophysics are considered. результаты моделирования ди Рассм Рассматриваются некоторые результаты моделирования д uak 551.465.5

УДК 551.465.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЧЁРНОГО МОРЯ./Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И./Сб.Трудов Института Гидрометеорологии Грузии. –2008. – т.115. – с. 122-131. – Рус.; Рез. Груз., Анг.,Рус.

Рассматриваются некоторые результаты моделирования циркуляционных процессов во всём бассейне и Грузинском секторе Чёрного моря на основе бароклиных прогностических моделей общей (пространственное разрешение 5 км) и региональной циркуляции (пространственное разрешение 1 км), развитых в Институте геофизики им. М. Нодиа.