

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ОСНОВНЫХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЧЁРНОМ МОРЕ

Корძაძე А. А., Деметрашвили Д. И.

Институт геофизики им. М. З. Нодиа, 0193, Тбилиси, ул. Алексидзе, 1

1. Введение

Изучение и прогноз гидротермодинамических процессов в Чёрном море является одним из основных вопросов океанографии Чёрного моря. Состояние морской экосистемы, распространение и трансформация разных загрязняющих веществ, биохимические процессы, протекающие в морском бассейне и т. д. во многом зависят от пространственно-временного распределения гидротермодинамических характеристик моря (течения, температура, солёность, плотность) [1-3]. Поскольку Чёрное море и атмосфера создают единую гидротермодинамическую систему, динамические процессы моря в значительной степени влияют и на распределение климатических характеристик в Черноморском регионе [4, 5].

В настоящее время методы математического моделирования являются одним из самых эффективных средств изучения динамических и экологических процессов в Мировом океане, включая внутренние моря. Широко опираясь на экспериментальные данные, они позволяют нам детально исследовать циркуляционные особенности и распределение гидротермодинамических характеристик, как по всему водному бассейну, так и в отдельных его районах в тесной связи с внешними физическими факторами, ответственными за состояние морской среды.

Численное моделирование динамических процессов Чёрного моря началось в начале 70-х годов прошлого столетия в бывшем СССР. Первая прогностическая модель, основанная на полной системе уравнений гидротермодинамики океана, и исследования, проведённые на основе этой модели, изложены в [6 - 11]. Работы по моделированию динамики Чёрного моря, выполненные до 90-х годов прошлого века, достаточно детально описаны в монографиях [11-12]. Эти работы показали способность моделей реально воспроизводить некоторые общие черты распределения гидрофизических параметров Чёрного моря.

В дальнейшем, быстрый прогресс вычислительной техники и широкое привлечение экспериментальных методов (включая методы дистанционного зондирования) способствовали поднятию математического моделирования процессов Чёрного моря на более высокий уровень. В настоящее время в ведущих океанографических центрах стран Черноморского региона и США разработаны прогностические модели динамики Чёрного моря, которые с достаточной адекватностью и высоким разрешением воспроизводят основные черты динамических процессов Чёрного моря [13-28]. Продолжением работ [6-11] являются развитые нами в последние годы бароклинные модели общей и региональной циркуляции Чёрного моря [23-28].

Вышеперечисленные модели отличаются друг от друга в основном методами параметризации разных физических факторов (турбулентная диффузия, поглощение солнечной радиации и т. д.), используемых координатной системой, численными методами решения, параметрами расчётной сетки.

В настоящее время одной из первоочередных задач оперативной океанографии Чёрного моря является создание оперативной системы диагноза и прогноза состояния Чёрного моря, которая позволит непрерывно следить за текущим и будущим состояниями Чёрного моря в реальном времени. Созданию такой оперативной прогностической системы служат финансируемые Евросоюзом в последние годы международные проекты ARENA и ECOOP. В рамках ARENA, в июле 2005 года, впервые для Черноморского региона был осуществлён пилотный эксперимент по функционированию оперативной системы диагноза и прогноза состояния Чёрного моря. Составной частью этого эксперимента был расчёт прогноза основных гидрофизических полей (течения,

температура, солёность) с высоким разрешением на 48 часов в Грузинском секторе Чёрного моря с помощью региональной модели [28].

Целью настоящей статьи является описание некоторых результатов моделирования гидротермодинамических процессов по всему бассейну Чёрного моря и прогноза течения и термохалинных полей в части Грузинского сектора моря на основе бароклинных прогностических моделей общей (с горизонтальным разрешением 5 км) и региональной циркуляций (с горизонтальным разрешением 1 км) Чёрного моря, развитых в Институте геофизики им. М. Нодиа.

2. Описание модели общей циркуляции

Численная, бароклинная 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 [23 - 28].

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 термохалинное 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 путём задания 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.

Водообмен со Средиземным морем и речной сток Дуная учитывались соответствующими неоднородными боковыми условиями с привлечением экспериментальных данных о расходах, температуре, солёности Босфорского нижнего и верхнего течений и р. Дунай.

Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости рассчитывался по формуле, предложенной в [29], а коэффициенты вертикальной турбулентной вязкости и диффузии – по формуле, представленной в [30].

В случае неустойчивой стратификации ($\partial\rho/\partial z < 0$), которая может возникнуть в процессе интегрирования, реализация этой устойчивости в модели учитывалась путём увеличения коэффициента турбулентной диффузии в 20 раз в соответствующих столбах от поверхности до дна.

3. Численная схема

Для рассматриваемой нелинейной нестационарной задачи динамики моря доказаны теоремы существования и единственности [31 - 33]. Для решения системы уравнений модели используется двухиндексный метод расщепления по физическим процессам, вертикальным координатным плоскостям и линиям, который достаточно подробно описан в [11, 34]. 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 исследования влияния 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 [35].

4.1 Параметры задачи

При реализации модели использовались три расчётных сетки с постоянными горизонтальными шагами 37, 10 и 5 км, соответственно. В последнем случае количество точек сетки по

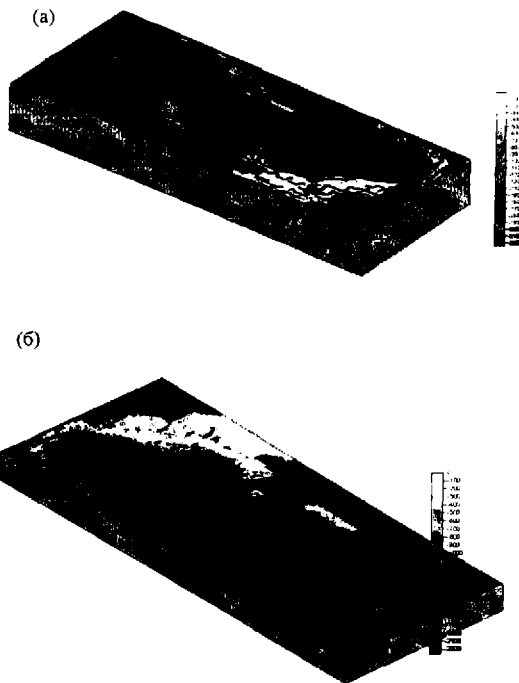


Рис.1. Пространственное изображение рельефа дна Чёрного моря, используемого в модели.
 (а) - вид с северной стороны, (б) – вид с южной стороны.

4.2 Результаты численных экспериментов

С помощью численных экспериментов была изучена роль разных факторов на формирование гидрофизического режима. Численные эксперименты показали, что эффект вращения Земли очень значителен в слоях до глубины примерно 700 м, а в более глубоких слоях влияние силы Кориолиса практически незначительно. Уменьшение эффекта силы Кориолиса в глубоких слоях несложно объяснить, если учесть тот факт, что с глубиной интенсивность циркуляции вод значительно ослабевает, следовательно уменьшается сила Кориолиса и одновременно возрастает вклад рельефа дна и конфигурации бассейна.

Оценивался вклад поглощения морской водой суммарной солнечной радиации в формировании термического режима верхнего слоя Чёрного моря и энергетическое влияние этого фактора. Расчёты

показали, что поглощение радиации морской водой вызывает малые суточные колебания температуры самого верхнего слоя моря толщиной примерно в 10-15 м с амплитудой 0.2-0.3°C. Несмотря на малые изменения температуры, из-за большой объёмной теплоемкости воды, верхние слои Чёрного моря аккумулируют значительное количество тепла. Анализ внутрисуточного хода прироста теплосодержания верхнего слоя, обусловленного поглощением радиации, показал, что энергетическое влияние поглощения радиации больше всего проявляется в августе, и в этот период верхний слой моря может поглощать такой запас тепловой энергии, который был бы достаточен для прогрева на 10°C слоя воздуха толщиной примерно 600 м, лежащего над акваторией Чёрного моря.

Одним из главных численных экспериментов, проведённых на основе предложенной модели (с разрешением 5 км), было моделирование внутрисуточной изменчивости гидрологического режима Чёрного моря в условиях чередования разных типов ветра. Эти типы ветров были взяты из [37], в котором на основе обработки данных наблюдений за 1946-1962 гг. установлен 41 тип атмосферной циркуляции над Чёрным морем. Численный эксперимент имел целью изучить отклик циркуляции Чёрного моря на нестационарное атмосферное воздействие. Начало интегрирования соответствовало 1 января, и в качестве начальных условий принимались среднегодовые климатические поля течения, солёности и температуры, полученные на основе той же модели, с использованием среднегодовых климатических входных данных. Нестационарность атмосферной циркуляции сводилась к чередованию 24 типов ветра, которые характеризуются наибольшей повторяемостью над Чёрным морем. Они вводились в модель в той последовательности, которая соответствовала результатам, полученным в [38]. При смене одного типа ветра другим, между ними предусматривалось состояние, близкое к штилевому, со скоростью ветра 1 м/с и направлением, соответствующим среднеарифметическому между двумя последующими типами ветров. Суммарная продолжительность почти штилевых ситуаций была минимальна в феврале (30%) и максимальна в августе (70%).

Анализ результатов численного эксперимента показал, что под влиянием нестационарности атмосферных процессов циркуляция поверхностного слоя моря испытывала непрерывную трансформацию и претерпевала значительные качественные и количественные изменения в течение года. Интенсивность морской циркуляции ослабевала летом, по мере ослабления атмосферной циркуляции и усиливалась осенью и зимой, когда ветры становились более интенсивными. Так, например, летом, в некоторые периоды времени, при почти штилевых условиях, скорость поверхностного течения уменьшалась до 10-12 см/с, а осенью и зимой достигала или чуть превосходила 100 см/с при штормовом ветре. Такие высокие скорости реально наблюдаются в Чёрном море [12, 39]. Численный эксперимент показал также, что интенсивная атмосферная циркуляция (>15 м/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 это показано в таблице.

Табл.1

Чередование типов ветра за 5668 – 5800 ч (август)

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

На рис. 2 показаны поля тангенциального напряжения трения ветра на поверхности моря, соответствующие северо-восточному (5-10 м/с) и юго-западному (5-10 м/с) ветрам, которые развивались за этот промежуток и использовались в расчётах.

(а)

(б)

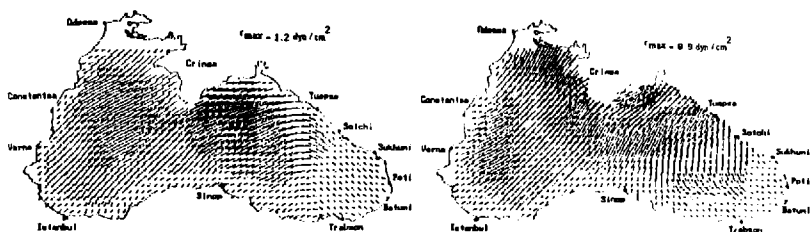


Рис.2. Поля тангенциального напряжения трения ветра, соответствующие (а) северо-восточному (5-10 м/сек) и (б) юго-западному (5-10 м/сек) ветрам.

Рис.3 и 4 показывают трансформацию циркуляции моря на глубинах 3 м и 15 м под влиянием перестройки атмосферной циркуляции. Из этих рисунков 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 тёплом сезоне года. следует отметить, что аналогичный вывод получен в [18].

Анализ проведённого численного эксперимента показал, что 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.

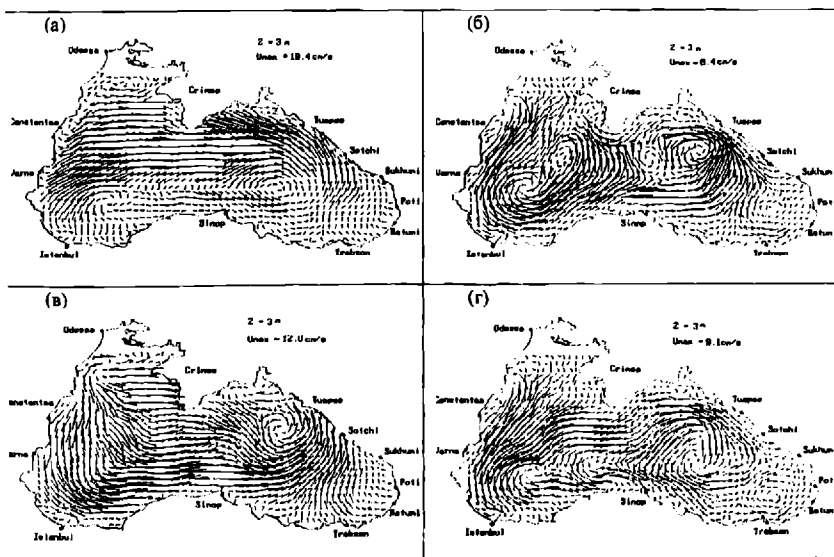


Рис.3. Поля течений в августе на глубине 3 м: (а) северо-вост. ветер (5-10 м/с), $t=5690$ ч; (б) северо-запад. ветер (1м/с), $t = 5734$ ч; (в) юго – запад. ветер (5-10 м/с), $t=5756$ ч; (г) запад.-северо-западн. ветер (1м/с), $t = 5798$ ч.

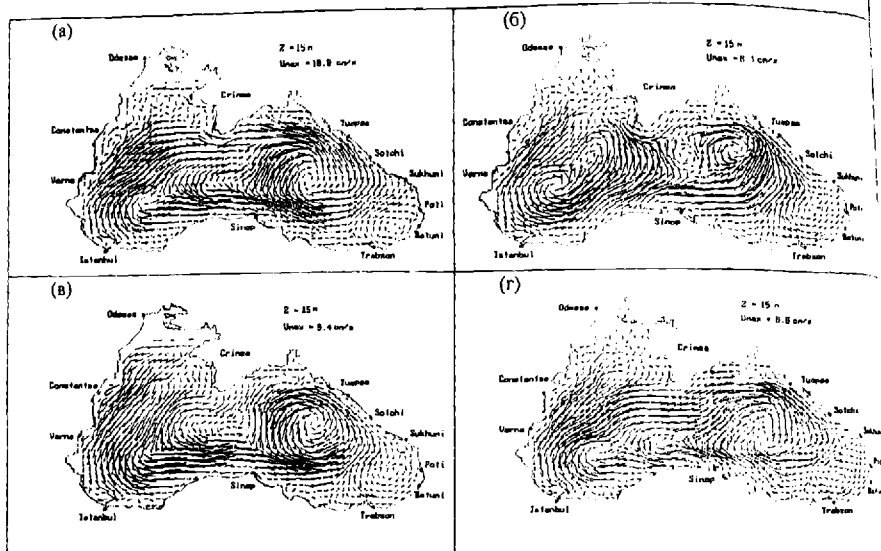


Рис.4. То же самое, что и на рис.3, но на глубине 15 м.

5. Моделирование и прогноз региональной циркуляции

В дальнейшем, в рамках проекта ARENA, главной целью которой являлось развитие оперативной прогностической системы Чёрного моря, модель общей циркуляции [23 - 27] была адаптирована к Грузинскому сектору Чёрного моря [28]. Для сокращения объёма данных, передаваемых по интернету и, следовательно, уменьшения времени подготовки оперативных численных прогнозов, область решения задачи охватывала только часть Грузинской акватории включая порты Сухуми, Батуми и Поти. 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. Проведению международного пилотного эксперимента по функционированию системы диагноза и прогноза Чёрного моря предшествовал подготовительный этап, целью которого 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 следующего временного интервала
00 ч 7 июня, 2003 – 00 ч 15 июня, 2003.

Все входные данные, необходимые для расчёта прогноза на вставленной сетке с высоким разрешением в части Грузинской акватории, мы получали из МГИ по интернету. Эти данные включали результаты прогноза циркуляции, температуры и солёности (трёхмерные поля для нашей локальной области), рассчитанные по модели МГИ с разрешением 4,9 км, а также климатические данные испарения, атмосферных осадков и потоков тепла на поверхности Чёрного моря, соответствующие прогностическому интервалу с одночасовым временным шагом. Расчётная программа предусматривала подготовку граничных условий на жидкой границе расчётной области в процессе интегрирования путём перевода функций с грубой сетки на сетку с высоким разрешением. Начало интегрирования системы уравнения модели соответствовало моменту времени 00 ч 7 июня 2003 года.

На рисунках 5-7 показаны рассчитанные прогнозы циркуляции по модели Морского гидрофизического института с горизонтальным разрешением 4,9 км и по региональной модели - с разрешением 1 км.

12:00 ч, 9 июня 2003

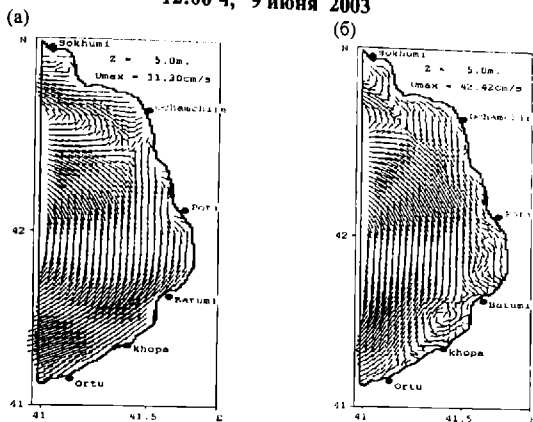


Рис. 5. Поля течения на глубине 5м в 12:00 ч, 9 июня 2003 года, рассчитанные по модели (а) МГИ и (б) региональной модели.

12:00 ч, 9 июня 2003

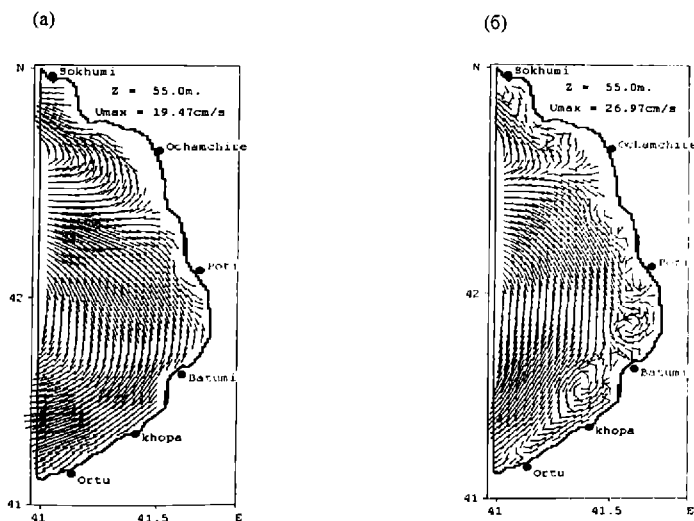


Рис. 6. То же самое, что и на рис.5, но на глубине 55м.

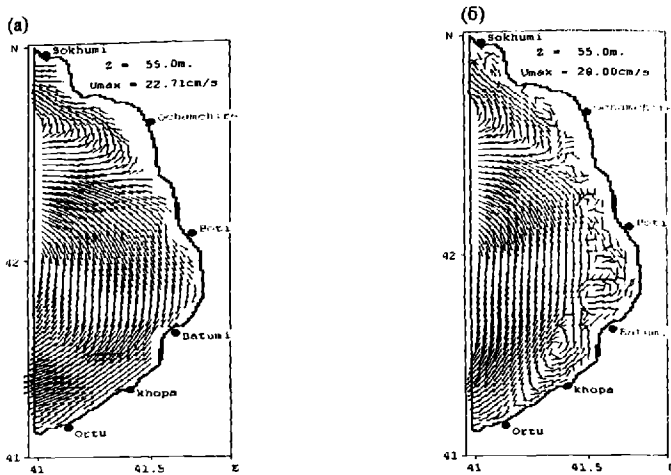


Рис. 7. То же самое, что и на рис.6, но в момент 12:00 ч, 11 июня 2003

Из этих рисунков хорошо видно, что высоко разрешающая, вставленная в грубую сетку наша региональная модель хорошо описывает формирование прибрежных вихрей малых размеров, в то время, как модель с более грубым разрешением не способна воспроизводить такие вихри.

В течение 22-26 июля 2005 года в рамках проекта ARENA, впервые для Чёрного моря был проведён пилотный эксперимент по функционированию прогностической системы Чёрного моря в режиме времени, приближённом к оперативному. В эксперименте участвовали ведущие научно-исследовательские океанографические центры всех причерноморских стран – Болгарии, Грузии, России, Румынии, Турции и Украины. Одной из составных частей этого эксперимента был расчёт прогнозов гидрофизических полей за 48 ч. с высоким разрешением в части Грузинской акватории Чёрного моря.

Суть международного эксперимента была в следующем. В национальной гидрометеорологической администрации Румынии с помощью региональной модели динамики атмосферы ALADIN рассчитывался прогноз на двое суток. Эти данные поступали по Интернету в МГИ, которые вместе с информацией, полученной с помощью спутников, дрейфтеров и других измерительных платформ, использовались для расчёта морских прогнозов по всему бассейну с помощью модели динамики моря МГИ. После завершения расчёта морского прогноза, результаты прогноза (вместе с другими необходимыми данными) передавались из МГИ по Интернету в океанографические центры всех причерноморских стран, включая Институт геофизики им М. З. Нодиа. Там эти данные вводились в региональные математические модели циркуляции, которые уже рассчитывали гидрофизические параметры в отдельных морских районах с высоким разрешением. После завершения расчётов, результаты региональных прогнозов снова передавались по Интернету в МГИ, где эти данные анализировались и сравнивались с реальными данными наблюдений.

12:00 ч, 28 июля 2005

(а) Течение, $z = 0$

(б) Температура, $z = 0$

(в) Солёность, $z = 0$

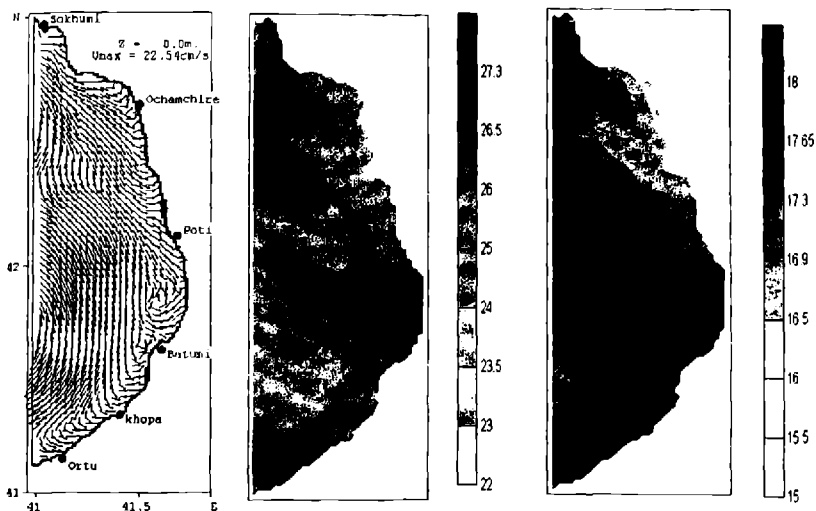


Рис. 8. Рассчитанные прогнозы (а) циркуляции, (б) температуры и (в) солёности к моменту времени 12:00 ч, 28 июля 2005 г. на поверхности Чёрного моря в части Грузинского сектора моря.

12:00 ч, 28 июля 2005

(а) Течение, $z = 10$

(б) Температура, $z = 10$

(в) Солёность, $z = 10$

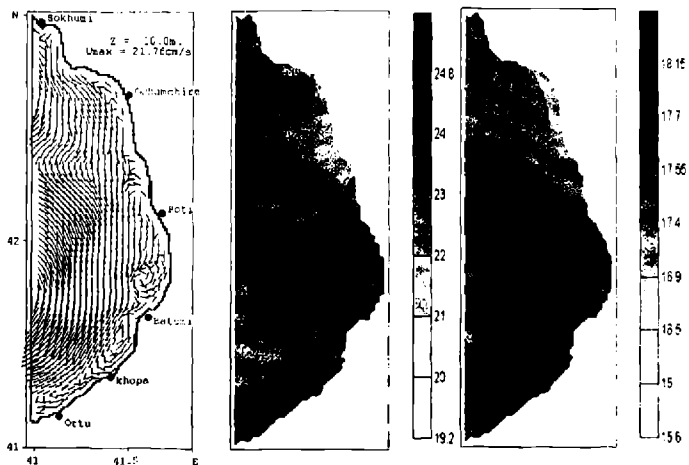


Рис. 9. То же самое, что и на рис. 8, но на глубине 10 м.

На рис. 8 и 9 представлены результаты прогноза за 48 часов циркуляции, температуры и солёности на поверхности моря и на глубине 10 м. В этом случае начало интегрирования соответствовало 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. 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, показало способность высоко разрешающей региональной модели реально прогнозировать гидрофизические процессы [40].

Следует отметить, что проведённый международный научно-технический эксперимент по функционированию оперативной системы диагноза и прогноза состояния Чёрного моря вызвал широкий интерес, и его как научное, так и практическое значение было высоко оценено специалистами-океанологами причерноморских стран [41].

6. Заключение

Модели общей и региональной циркуляции, развитые в Институте геофизики им. М. З. Нодия применялись для исследования и прогнозирования циркуляционных процессов Чёрного моря. Численные эксперименты, проведённые с помощью модели общей циркуляции, позволили получить ряд выводов, касающихся влияния отдельных физических факторов на характер общей циркуляции Чёрного моря. Значительными выводами являются: сильные ветры, развитые над территорией Чёрного моря, способствуют распаденю вихревых циркуляций у поверхности моря и наоборот; при умеренных и сильных ветрах, с возрастанием глубины, циркуляция моря претерпевает более существенные качественные и количественные изменения, чем при слабых ветрах, в результате которого, начиная уже с глубины примерно 15-20 метров, циркуляция принимает вихревой характер с формированием основного черноморского потока и циклонических вихрей в открытой части бассейна.

С помощью региональной модели впервые проведены расчёты по моделированию и прогнозу гидрофизических полей в части Грузинской акватории Чёрного моря в рамках международного проекта ARENA. В качестве граничных условий на жидкой границе, отделяющей эту акваторию от открытой части Чёрного моря, использовались результаты расчёта по модели динамики Чёрного моря Морского гидрофизического института (г. Севастополь, Украина).

Литература

1. Grégoire M., Beckers J., Nihoul J., Stanev E. Reconnaissance of the main Black Sea eohydrodynamics by means of a 3D interdisciplinary model. *J. Mar. Sys.* 1997. 16 PP.85-105.
2. Oguz T. The Black Sea biogeochemistry and circulation dynamics. *Proceed. of the Second International Conference on Oceanography of Eastern Mediterranean and Black Sea: Similarities and Differences of two International Basins.* Ankara, Turkey. 14-18 October, 2002. PP. 289-295.
3. Kiknadze A., Kordzadze A., Demetrasvili D., Surmava A., Kacharava G. Simulation of diffusion and sedimentation of Rioni River alluvium in the Georgian Black Sea coast (water area of Poti city). *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences.* 2006. Vol.173. № 3. PP. 504-506.
4. Самойленко В. С. Единство атмосферы и океана. *Вестник МГУ.* 1967. Сер. 5. География. № 6. С. 20-30.
5. Солянкин Е. В. Микроклиматическая роль Чёрного моря. *Океанология* 1964. Т.4. Вып. 2. С. 28-36.
6. Кордзадзе А. А., Скиба Ю. Н. Численные расчёты основных характеристик Чёрного моря в рамках трёхмерной модели. *Препринт ВЦ СО АН СССР.* Новосибирск. 1973. 34 с.
7. Марчук Г. И., Кордзадзе А. А., Скиба Ю. Н. Расчёт основных гидрологических полей Чёрного моря на основе метода расщепления. *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1975. Т.11. № 4. С.379-393.
8. Марчук Г. И., Кордзадзе А. А., Залесный В. Б. Проблемы математического моделирования морских и океанических течений. В кн.: *Дифференциальные и интегральные уравнения. Краевые задачи.* Тбилиси. 1979. С. 99-151.

9. Марчук Г. И., Кордзадзе А. А. Численное моделирование динамики моря на основе метода расщепления. В Кн.: Численное моделирование климата Мирового океана. ОВМ АН СССР. Москва. 1986. С.151-163.
10. Кордзадзе А. А. Численное моделирование циркуляции вод бассейна Чёрного моря. В кн.: Моделирование гидрофизических процессов в замкнутых водоемах и морях., Москва, Наука. 1988. С.
11. Кордзадзе А. А. Математическое моделирование динамики морских течений. (теория, алгоритмы, численные эксперименты), М.: ОВМ АН СССР, 1989, 218с.
12. Станев Е., Трухчев Д., Русенов В.- Циркуляция вод и численное моделирование течений Чёрного моря. София. Университетское издательство "Климент охридски". 1988. 221 с.
13. Oguz T., Latun V. S., Latif M. A. et al. - Circulation in the surface and intermediate layers in the Black Sea. Deep Sea Res. 1993. Vol.. 1. N 40. PP. 597-612.
14. Демьшев С. Г., Коротаев Г. К. Численное моделирование сезонного хода синоптической изменчивости в Чёрном море. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т.32. №1. С.108-116.
15. Oguz T., P. Malanotte-Rizzoli, D. Aubrey. Wind and thermohaline circulation of the Black Sea Driven by yearly mean climatological forcing. J. Geophys. Res. 100 (C4). 1995. PP.6845-6863.
16. Girgvliani A. The coriolis force parametrization in numerical model of the Black Sea dynamics. J. Georgian Geoph. Soc. 1999 Vol. 4b. PP.15-27.
17. Staneva, J. V., D. E. Dietrich, E. V. Stanev, M. J. Bowman. Rim current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving Black Sea general circulation model. J. of Marine Systems. Elsevier. 2001. Vol. 31. PP. 137-157.
18. Korotaev, G., T. Oguz, A. Nikiforov, and C. Koblinsky. 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.
19. Коротенко К. А., Дитрих Д. Е., Боуман М. Дж. Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Чёрном море. Океанология. 2003. Т.43. №3. С.367-378.
20. Kara, A. B., A. J. Wallcraft and H. E. Hurlburt. 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. 2005. Vol.35. PP.13-32.
21. Kara, A. B., A. J. Wallcraft and H. E. Hurlburt. Sea Surface Temperature Sensitivity to Water Turbidity from Simulations of the Turbid Black Sea Using HYCOM. Journal of Physical Oceanography. 2005. Vol. 35. PP.33-54.
22. Kara, A. B., H. E. Hurlburt, A. J. Wallcraft and M. A. Bourassa. Black Sea Mixed Layer Sensitivity to Various Wind and Thermal Forcing Products on Climatological Time Scales. J. Climate. 2005. Vol. 18. PP. 5266-5293.
23. Demetrasvili D. I. Modeling of hydrophysical fields in the Black Sea. J. Georgian Geophys.Soc.2003. Vol.8b. PP.19-27.
24. Kordzadze A. A., Demetrasvili D. D. Results of numerical experiment on modeling of inner-annual hydrological regime of the Black Sea. J. Georgian Geophys. Soc.2003. Vol.8b PP.3-18.
25. Kordzadze A. A., Demetrasvili D. D. 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.
26. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И., Сурмава А. А. О циркуляции в Чёрном море при очень сильных и слабых ветрах. Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 58-64.
27. Кордзадзе А. 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. № 2, С.227- 238.
28. Kordzadze A., Demetrasvili D. Simulation and forecast of hydrophysical fields in the part of the Georgian Black Sea coastal zone. J. Georgian Geophys. Soc. 2008. Vol.12b. PP.3-16.
29. Зилитинкевич С. С., Монин А. С. Турбулентность в динамических моделях атмосферы Ленинград, Наука. 1971. 44 с.
30. Марчук Г. И., Кочергин В. П., Саркисян А. С. и др. Математические модели циркуляции океана. Новосибирск, Наука. 1980. 288 с.
31. Кордзадзе А. А. Об единственности решения одной задачи динамики океана. ДАН СССР. 1974. Т.219. № 4. С.856-859.

32. Кордзадзе А. А. Математические вопросы решения задач динамики океана. Новосибирск, ВЦ СО АН СССР. 1982. 148 с.
33. Сухонос В. И. О корректности в целом трёхмерной задачи динамики океана. В кн.: Механика неоднородных сплошных сред. Новосибирск, СО АН СССР. 1981. Вып. 52. С. 37-53.
34. Марчук Г. И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Ленинград, "Гидрометеиздат". 1974. 303 с.
35. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И. Результаты моделирования распространения примесей в Чёрном море. (См. настоящий сборник).
36. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И. Численные эксперименты по модели динамики Чёрного моря, учитывающей поглощение солнечной радиации. В кн.: Вычислительная математика и математическое моделирование. Труды международной конференции, посвящённой 75-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука и 20-летию основания Института Вычислительной математики Российской АН. Москва. 2000. Т. 1, С.125-134
37. Атлас волнения и ветра Чёрного моря. Ленинград, "Гидрометеиздат". 1969. 112 с.
38. Kordzadze A., Tavartkiladze K., Kvaratskhelia D. A structure of the wind continuous field on the Black Sea surface. J. Georgian Geophys. Soc.2000. Vol.5b. PP.28-38.
39. Богуславский С. Г., Ефимов В. В., Черкесов Л. В. и др. Комплексные океанографические исследования Чёрного моря. Киев, "Наукова думка", 1980. 240 с.
40. Korotaeв G. K., Dorofeeв V. L., Kubriakov A. I., Cordoneanu E., Grigorieв A. V., Nesterov E. S., Kordzadze A., Oguz T., Slabakov H. - Development of the hydrometeorological service system for the Black Sea region including diagnosis and forecast of hazardous events (project ARENA). The International Conference on the problems of hydrometeorological security (prediction and adaptation of the society to the extreme climatic changes). M., Russia, September 26-29, 2006.
41. Оперативная океанография: Чёрное море под контролем учёных. Газета "Слава Севастополя". Украина. 2005. № 153(22088). 19 августа.

პირითადი ჰიდროფიზიკური მუშაების მოდელირება და პროგნოზი შავ ზღვაში

კორძაძე ა., დემეტრაშვილი დ.

რეზიუმე

განხილულია მთელ შავ ზღვასა და ზღვის აუზის საქართველოს სექტორში მიმდინარე დინამიკური პროცესების მოდელირების ზოგიერთი შედეგები შავი ზღვის ზოგადი (4,9კმ სიღრმის გარჩევისუნარიანობით) და რეგიონალური (1კმ სიღრმის გარჩევისუნარიანობით) ცირკულაციის ბაროკლინური პროგნოსტიკული მოდელების საფუძველზე, რომლებიც განვითარებულია მ. ნოდას გეოფიზიკის ინსტიტუტში. მოდელები დაფუძნებულია ოკეანის ჰიდროფერმოდინამიკის განტოლებათა სისტემებზე პიდროსტატიკურ მიახლოებაში, რომელთა ამოსახსნელად გამოყენებულია გახლენის ორციკლიანი მეთოდი. შავი ზღვის ჰიდროლოგიური რეჟიმის შიდა წლიური ცვალებადობის მოდელირების რიცხვითი ექსპერიმენტი ჩატარებულია შავი ზღვის ტერიტორიისათვის დამახასიათებელი ატმოსფერული ცირკულაციის სხვადასხვა ტიპების მონაცემების პირობებში. რეგიონალური მოდელის საფუძველზე ჩატარებულია გამოთვლები ჰიდროლოგიური ველების მოდელირებისა და პროგნოზის მიზნით შავი ზღვის საქართველოს აკვატორიის ნაწილში საერთაშორისო პროექტის ARENA -ს ფარგლებში. თხევად საზღვარზე, რომელიც გამოყოფს აღნიშნულ აკვატორიას შავი ზღვის დია ნაწილისაგან, გამოყენებულია ზღვის ჰიდროფიზიკის ინსტიტუტის (ქ. ხევასტოპოლი, უკრაინა) შავი ზღვის დინამიკის მოდელის საფუძველზე მიღებული შედეგები.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ОСНОВНЫХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЧЁРНОМ МОРЕ

Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И.

Реферат

Рассматриваются некоторые результаты моделирования динамических процессов по всему бассейну Чёрного моря и в Грузинском секторе морского бассейна на основе бароклинических прогностических моделей общей (пространственное разрешение 4,9 км) и региональной циркуляции (пространственное разрешение 1 км) Чёрного моря, развитых в Институте геофизики им. М. Нодиа. Модели основаны на полных системах уравнений гидротермодинамики океана в гидростатическом приближении и решаются двуциклическим методом расщепления. Численные эксперименты по моделированию внутригодовой изменчивости гидрологического режима Чёрного моря проведены с учётом чередования разных типов атмосферной циркуляции, характерных для территории Чёрного моря. С помощью региональной модели проведены расчёты по моделированию и прогноза гидрофизических полей в части Грузинской акватории Чёрного моря в рамках международного проекта ARENA. В качестве граничных условий на жидкой границе, отделяющих эту акваторию от открытой части Чёрного моря, использовались результаты расчёта по модели динамики Чёрного моря Морского гидрофизического института (г. Севастополь, Украина).

SIMULATION AND FORECAST OF MAIN HYDROPHYSICAL FIELDS IN THE BLACK SEA

Kordzadze A., Demetrashvili D.

Abstract

Some results of modelling of dynamic processes in the whole basin and Georgian sector of the Black Sea on the basis of the basin-scale (spatial resolution 4,9 km) and regional (spatial resolution 1 km) baroclinic prognostic models of the Black Sea, developed at M. Nodia Institute of Geophysics are considered. The models are based on the full systems of the ocean hydrothermodynamic equations in hydrostatic approximation. A two-cyclic splitting method is used for solution of the equation systems. Numerical experiment on modelling of inner-annual variability of a hydrological mode of the Black Sea is carried out with taken into account of alternation of different types of atmospheric circulation, characteristic for the territory of the Black Sea. By means of the nested grid regional model calculations on modelling and forecast of hydrophysical fields in the Georgian water area of the Black Sea within the International project ARENA are carried out. As boundary conditions on the liquid boundary, separating this water area from the open part of the Black Sea, results of calculation by the Black Sea dynamics model of Marine Hydrophysical Institute (Sevastopol, Ukraine) were used.