

Национальная Академия наук Украины
Морской гидрофизический институт

Кубряков Александр Иванович

УДК 551.465

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ И ПРОЦЕССОВ
МАССОПЕРЕНОСА В ЧЕРНОМ МОРЕ
В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ ОПЕРАТИВНОЙ
ОКЕАНОГРАФИИ

04.00.22 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Севастополь – 2014

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте
Национальной Академии наук Украины

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор
Залесный Владимир Борисович,
Институт вычислительной математики РАН,
ведущий научный сотрудник

доктор физико-математических наук
Зацепин Андрей Георгиевич,
Институт океанологии РАН,
заведующий Лабораторией экспериментальной физики океана

доктор физико-математических наук
Дианский Николай Ардальянович,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный океанографический институт
имени Н.Н.Зубова»,
ведущий научный сотрудник

Защита состоится «29» декабря 2014 г. в 11⁰⁰ часов на заседании
специализированного ученого совета Д 50.158.02
Морского гидрофизического института НАН Украины по адресу:
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Морского гидрофизического института НАН Украины по адресу:
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Автореферат разослан «____» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета Д 50.158.02
доктор физико-математических наук

В.В.Кныш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время весьма актуальной является проблема осуществления междисциплинарного диагноза состояния и прогноза эволюции окраинных и внутренних морей, их прибрежных акваторий, в которых сосредоточены интересы основных потребителей информации о состоянии морской среды. Создаваемые для решения этой проблемы системы входят в круг задач оперативной океанографии.

Наблюдаемые изменения климата и антропогенное воздействие человека на окружающую среду Черного моря приводят к её значительным изменениям. Для окружающих Черное море стран – Болгарии, Грузии, Румынии, России, Турции и Украины – существенная часть населения которых живет в прибрежной области и исторически связана с морскими отраслями промышленности (рыболовство, мореплавание, судостроение и др.) и туризмом, изменения морской окружающей среды всегда были весьма значимы. Промышленная эксплуатация шельфа моря и его использование для добычи и транспортировки нефти и газа с неизбежностью приводят к возрастанию вероятности крупных антропогенных катастроф, требующих усилий соответствующих служб прибрежной страны для минимизации ущерба рекреационным и биологическим ресурсам морской среды. В современных условиях стало ясно, что возможные будущие изменения окружающей среды Черного моря должны быть адекватно оценены для того, чтобы соответствующие управленческие решения и финансовые затраты основывались на прочном фундаменте. В связи с этим состояние Черного моря требует повышенного внимания и детального анализа.

Возможность осуществления диагноза и прогноза состояния моря обеспечили новые технологии наблюдений морской среды, современные модели циркуляции морей и океанов, основанные на физически полных нелинейных системах уравнений морской динамики, способные адекватно не только качественно, но и количественно воспроизводить реальные процессы, а также высокопроизводительные компьютеры, позволяющие выполнять численное интегрирование этих уравнений с необходимым временным и пространственным разрешением. Разработка и создание междисциплинарных систем, позволяющих, подобно метеорологическим системам диагноза и прогноза погоды, оперативно контролировать и прогнозировать состояние морской среды, является одной из основных задач нового бурно развивающегося направления физической океанографии – оперативной океанографии. Для бассейна Черного моря основы оперативной океанографии были разработаны специалистами Морского гидрофизического института Академии наук Украины в 80-х годах прошлого века с началом спутникового мониторинга состояния моря.

В настоящее время оперативная океанография является разделом науки об океане, который на регулярной основе делает доступными данные наблюдений и моделирования высокого качества, как для фундаментальных исследований, так и для практических приложений. В основе всех систем мониторинга морской среды лежит идея использования данных наблюдений, в первую очередь данных дистанционного зондирования с ИСЗ, в численных моделях циркуляции морей и океанов. Данные наблюдений, как правило, разнородны и имеют различное пространственное и временное разрешение. Дистанционные измерения, хотя и охватывают интересующую акваторию практически единовременно, дают информацию, в основном, только о поверхностном слое моря, тогда как практически важно полное описание трехмерной структуры

гидрофизических полей. Численные модели, используя данные измерений для задания граничных условий, инициализации и ассимиляции, способны не только восстановить трехмерную структуру морской среды, но и прогнозировать изменение ее состояния.

Математическое моделирование является одним из основных инструментов исследования динамики Мирового океана, его влияния на климат Земли, его роли в жизни планеты. Прогресс океанографии на современном этапе обусловлен, наряду с разработкой и созданием новых средств и методов наблюдений, развитием численного моделирования. Поскольку любой эксперимент требует воспроизводимости и, желательно, управляемости, что в натурных геофизических исследованиях практически невозможно, преимущества численных экспериментов, дающих возможность имитации процессов, которые нельзя непосредственно наблюдать, становятся очевидными. А в задачах диагноза и прогноза циркуляции и состояния вод Мирового океана математическое моделирование играет решающую роль. Именно математические модели, описывающие механизмы взаимодействия между элементами морской среды, позволяют выявить основные тенденции и спрогнозировать поведение среды при различных стратегиях антропогенного воздействия. Для большинства упомянутых проблем задача является междисциплинарной и требует построения интегрированных математических моделей, представляющих собой синтез гидродинамической модели, описывающей структуру и изменчивость гидрофизических полей, моделей переноса загрязняющих примесей и химико-биологической модели, описывающей трансформацию основных компонент морской среды. Исследования в области оперативной океанографии требуют проведения огромного количества вычислительных экспериментов с использованием моделей циркуляции океана разной сложности, основанных на физически полных нелинейных системах уравнений.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется значением ее результатов как для фундаментальной океанологии в части исследования динамики процессов разной природы в Черном море, его прибрежных акваториях для различных пространственно-временных масштабов, так и для прикладных морских наук и технологий для решения задач морской навигации и военной гидрографии, обслуживания морских портов, безопасности морских хозяйственных операций, планирования спасательных и природоохранных мероприятий, рыболовства, контроля и прогноза распространения загрязнений, рекреации и туризма.

Связь работы с научными программами. В диссертации обобщены результаты исследований автора в области численного моделирования динамических процессов в Черном море и его прибрежных акваториях. Работа выполнялась в соответствии с планами научных исследований Морского гидрофизического института НАН Украины (МГИ НАНУ), а также международного сотрудничества в рамках следующих завершенных и действующих научно-исследовательских программ.

– Проект НАН Украины «Исследование закономерностей функционирования шельфовых экосистем в условиях антропогенной и техногенной нагрузок» (шифр «Шельф»), 2001–2005, ГР № 0101U001019, исполнитель;

– Проект НАН Украины «Современное состояние шельфовой зоны Черного моря и рекомендации по использованию минеральных и рекреационных ресурсов» (шифр «Ресурсы шельфа»), 2002–2006, ГР № 0102U001482, исполнитель;

- Проект НАН Украины «Разработка новых методик тематической обработки космической информации для исследования морей и океанов» (шифр «Методика»), 2006–2009, ГР № 0107U007964, исполнитель;
- Проект НАН Украины «Комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования морской среды с целью устойчивого, экологически и техногенно безопасного использования ее ресурсного потенциала» (шифр «Океанография»), 2007–2009, ГР № 0107U004396, исполнитель;
- Проект НАН Украины «Фундаментальные исследования физических процессов, определяющих состояние морской среды» (шифр «Физика моря»), 2009–2010, ГР № 0109U003178, исполнитель;
- Проект НАН Украины «Создание и развитие на основе современных технологий междисциплинарной океанографической системы мониторинга и прогноза состояния Черного моря» (шифр «Оперативная океанография»), 2007–2010, ГР № 0106U001407, исполнитель;
- Проект НАН Украины «Создание национального модуля Черноморских прогнозов как элемента единой Европейской системы» (шифр «Черноморский прогноз»), 2010–2011, ГР № 0110U000964, исполнитель;
- Проект НАН Украины «Оперативный морской прогноз» (шифр «Морской прогноз»), 2011–2013, ГР № 0111U001419, исполнитель;
- Проект Государственного агентства по вопросам науки, инноваций и информатизации Украины «Мониторинговые исследования состояния прибрежных экосистем при использовании Черноморского экспериментального подспутникового полигона» (шифр «Полигон»), 2012–2013, исполнитель;
- Проект НАН Украины «Развитие междисциплинарной системы наблюдений и прогноза прибрежной зоны Черного моря» (шифр «Геосфера: исследования Земли из космоса»), 2012–2013, ГР № 0111U004990, исполнитель;
- Проект НАН Украины «Климатические сценарии, мониторинг и риски» (шифр «Риски»), 2012–2014, ГР № 0112U000709, исполнитель;
- Проект НАН Украины «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий» (шифр «Фундаментальная океанология»), 2011–2014, ГР № 0111U001420, исполнитель;
- Международный проект «Исследование Измирского залива», 1994–1997, ответственный исполнитель;
- Международный проект Black Sea GOOS (The Global Ocean Observing System), 2000–2002, ГР № 0100U004542, исполнитель;
- Международный проект EU FP4 ARENA (A Regional Capacity Building and Networking Programme to Upgrade Monitoring and Forecasting Activity in the Black Sea), 2003–2006, ГР № 0104U06731, ответственный исполнитель;
- Международный проект EU FP5 ASCABOS (A Supporting Programme for Capacity Building in the Black Sea Region towards Operational Status of Oceanographic Services), 2006–2008, ответственный исполнитель;
- Международный проект EU FP6 ECOOP (European Coastal-shelf Sea Operational Observing and Forecasting System), 2007–2009, исполнитель;

- Международный проект EU FP6 SESAME (Southern European Seas: Assessing and modelling ecosystem changes), 2008-2011, исполнитель;
 - Международный проект MONINFO (Environmental Monitoring of the Black Sea Basin: Monitoring and Information Systems for Reducing Oil Pollution), 2010–2011, исполнитель;
 - Международный проект EU FP7 MyOcean, 2009–2012, исполнитель;
 - Международный проект EU FP7 MyOcean2, 2012–2014, исполнитель;
- Международный проект РАН-НАНУ «Черное море как имитационная модель океана» (шифр «Черное море»), 2011–2014, ГР № 0112U001884 исполнитель.

Цели и задачи исследования. Целью работы является разработка и создание на основе математических моделей общей циркуляции океана моделей и систем, направленных на решение задач оперативной океанографии по исследованию и прогнозированию процессов динамики вод и массопереноса в Черном море и его прибрежных акваториях.

Были поставлены и решены следующие задачи:

1. На основе моделей переноса и диффузии, инкорпорированных в оперативную численную модель циркуляции Черного моря:

- восстановлен сезонный ход фоновое пространственного распределения эмульсионно - растворенной фракции нефтеуглеводородов в аэробной зоне Черного моря;

- проведены оценки степени распространения цезия-137 в поверхностном слое Черного моря в первый год после черновобильской аварии.

2. На основе балтийской системы SeaTrackWeb и оперативной модели циркуляции МГИ создана оперативная система прогноза распространения нефтяных разливов в Черном море BlackSeaTrack Web.

3. Исследовано влияние распресняющего эффекта речного стока во время весеннего половодья на формирование стратификации и циркуляции вод в северо-западной части Черного моря.

4. Выполнена реконструкция климатического сезонного хода гидрофизических полей Черного моря.

5. Проведен ретроспективный анализ гидрофизических полей Черного моря за период 1971–1993 гг.

6. Исследованы процессы формирования холодного промежуточного слоя Черного моря на основе данных реанализа гидрофизических полей.

7. Исследовано влияние оптических свойств воды на динамику и стратификацию верхних слоев Черного моря.

8. Проведены сценарные расчеты распространения техногенного загрязнения в акватории моря у Южного берега Крыма в результате аварии в Ласпинской бухте.

9. Проведено моделирование циркуляции и распространения загрязняющих примесей в Балаклавской бухте.

10. Создана оперативная система морских прибрежных прогнозов Черного моря.

11. Разработана система тренингов по моделированию циркуляции в бассейне Черного моря.

Объект исследования – Черное море и его прибрежные акватории.

Предмет исследования – динамика и термохалинная структура вод, процессы массопереноса.

Методы исследований – численное моделирование на основе конечно-разностных алгоритмов решения нелинейных дифференциальных уравнений гидродинамики в частных производных.

Методология исследования заключается в адаптации моделей общей циркуляции океана высокого уровня, использующие различные типы вертикальных координат, к физико-географическим условиям полузамкнутых прибрежных и замкнутых морских бассейнов; разработке и реализации на их основе систем прогноза динамики вод и распространения примесей; проведении численных экспериментов и сравнительного анализа их результатов с данными наблюдений.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые для Черного моря проведен реанализ гидрофизических полей за более чем 20-летний период времени. На основе результатов реанализа исследованы особенности процессов формирования холодного промежуточного слоя Черного моря в реальные периоды чередования атмосферного воздействия.

2. Впервые на основе набора моделей циркуляции с высоким разрешением создана оперативная система морских прибрежных прогнозов Черного моря.

3. Впервые исследовано влияние межгодовой изменчивости прозрачности вод Черного моря на изменчивость термохалинной структуры и циркуляции вод в верхних слоях моря, получены новые количественные результаты, касающиеся изменения теплового бюджета верхних слоев моря и пространственного распределения гидрофизических параметров за счет учета реальных оптических свойств вод Черного моря.

4. Впервые создана оперативная система прогноза распространения нефтяных разливов в Черном море BlackSeaTrack Web на основе адаптированных к физико-географическим условиям Черного моря модулей балтийской оперативной системы прогноза нефтяных разливов SeaTrackWeb и оперативной модели циркуляции МГИ.

5. Впервые описан сезонный ход фоновое пространственное распределение эмульсионно-растворенной фракции углеводородов в аэробной зоне Черного моря.

6. Получен новый массив данных, отражающий климатический сезонный ход гидрофизических полей Черного моря.

7. Исследованы особенности формирования стратификации и циркуляции вод на северо-западном шельфе Черного моря, обусловленные влиянием речного стока во время весеннего половодья.

8. Впервые получены оценки степени распространения техногенного загрязнения в акватории моря у Южного берега Крыма в результате аварии в Ласпинской бухте.

9. Впервые рассчитаны трехмерная бароклинная циркуляция вод в Балаклавской бухте и распространение загрязнений от источников, расположенных на берегах бухты.

10. Впервые разработана система тренингов по моделированию циркуляции в бассейне Черного моря.

Практическое значение полученных результатов. Полученные в диссертации результаты можно использовать для решения целого круга прикладных задач в области морской навигации и военной гидрографии, обслуживания морских портов, безопасности морских хозяйственных операций, планирования спасательных и

природоохранных мероприятий, рыболовства, контроля и прогноза распространения загрязнений, рекреации и туризма.

Разработанная система прогноза распространения нефтяных загрязнений BlackSeaTrack Web функционирует в оперативном режиме и была уже использована в ряде операций по поиску и спасению на водах и мероприятиях по оценке нефтяных разливов.

Модули созданной системы морских прибрежных прогнозов установлены в прибрежных черноморских странах. Система функционирует в оперативном режиме и обеспечивает трехдневный прогноз циркуляции и состояния вод в соответствующих акваториях.

Основными потенциальными потребителями полученной в работе научно-технической продукции являются: научные учреждения, занимающиеся исследованиями океанов и морей; гидрографические службы; оперативные подразделения Гидрометеорологической службы; Министерство по чрезвычайным ситуациям; Министерство экологии и природных ресурсов.

Личный вклад соискателя. Автором сформулированы основные научные положения и выводы, которые вошли в диссертацию. Во всех цитируемых совместных работах, относящихся к предмету диссертации и основанных на численных экспериментах, разработка и внедрение в модели необходимых программных блоков, их отладка и реализация на их основе численных экспериментов принадлежат автору. В работах, опубликованных с соавторами, конкретный вклад соискателя заключался в следующем:

- в работах [5, 14, 25] – разработка моделей транспорта примеси, проведение расчетов, участие в обработке и анализе результатов моделирования;
- в работах [3, 12, 21] – участие в постановке задач, проведение численных экспериментов, обработка результатов моделирования, участие в анализе и интерпретации результатов моделирования;
- в работах [38, 39, 51, 52] – реализация концепции создания оперативной системы прогноза распространения нефтяных разливов в Черном море, проведение расчетов, обработка и анализ их результатов;
- в работах [16–18, 20, 28, 29, 31, 35, 41, 46] – адаптация модели циркуляции вод, проведение численных экспериментов, обработка, анализ интегральных характеристик, участие в интерпретации результатов расчетов;
- в работах [15, 22, 23, 32] – постановка задач, адаптация моделей циркуляции к прибрежным акваториям, разработка моделей транспорта примеси, проведение расчетов, обработка и анализ результатов моделирования, участие в сопоставлении с натурными данными;
- в работах [6–8, 10, 13, 19, 30, 34, 36, 37, 40, 42–45, 47–50] – разработка и установка системы прибрежных морских прогнозов, использование метода вложенных сеток, проведение расчетов, участие в обработке и анализе результатов моделирования, участие в сопоставлении с натурными данными, разработка системы тренингов по моделированию;
- в работах [1, 9, 11, 33] – обработка данных, участие в анализе и интерпретации данных наблюдений;
- в работах [2, 4, 26] – разработка дизайна и стратегии создания системы мониторинга состояния Черного моря.

Апробация результатов диссертации. Материалы исследований, представленных в диссертации, докладывались на семинарах, рабочих группах и ученых советах Морского гидрофизического института, а также на следующих международных конференциях:

1. Euromech Colloquium 327 «Effects of organized vortex motion on heat and mass transfer». Kiev, Aug. 25–27, 1994;
2. International Conference «Dynamics of ocean and atmosphere», Moscow, Nov. 22–25, 1995;
3. International Conference «Physical processes on the ocean shelf». Svetlogorsk, Kaliningrad Region (Baltic Sea coast), June–7, 1996;
4. International Conference «Marine Research in the Izmir Bay». Izmir, September 17–19, 1997;
5. International Conference «Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea. Similarities and differences of two interconnected basins». Athens, Greece, 23–26 February 1999;
6. VI Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований», Москва, 2000;
7. II International conference «Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea. Similarities and differences of the two interconnected basins». METU, Ankara, Turkey, 14–18 October 2002;
8. 30th Pacem in Maribus. «A year after Johannesburg. Ocean Governance and Sustainable Development: Ocean and Coasts – a Glimpse into the Future». Kiev, Ukraine, October 27–30, 2003;
9. The Fourth EuroGOOS International Conference «European Operational Oceanography: Present and Future». Brest, France, 6–9 June 2005;
10. Международная научная конференция «Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей». Крым, Донузлав, 2005;
11. International conference «Fluxes and Structures in Fluids». Moscow, June 20–23, 2005;
12. Научная конференция «Ломоносовские чтения–2006». ЧФ МГУ, Севастополь, 2006;
13. International conference on the problems of hydrometeorological security (prediction and adaptation of the society to the extreme climate changes). Москва, Россия, 26–29 сентября 2006 г.;
14. 1st Biannual Scientific Conference. «Black Sea Ecosystem 2005 and Beyond. Dedicated to the 10th Anniversary of the Strategic Action Plan for Rehabilitation and Protection of the Black Sea». Istanbul, Turkey, 8–10 May 2006;
15. X Международная конференция «Современные методы и средства океанологических исследований». ИОРАН, Москва, 2007;
16. 38th CIESM Congress. Istanbul (Turkey), 2007;
17. 5th EuroGOOS Conference «Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges». Exeter, UK, 20–22 May 2008;
18. Международная конференция по проблемам гидрометеорологической безопасности. Москва, 2008;
19. 2nd Biannual Scientific and Black Sea Scene EC Project Joint Conference «Climate Change in the Black Sea – Hypothesis, Observations, Trends Scenarios and Mitigation Strategy for the Ecosystem» – BS-HOT'2008. Sofia, Bulgaria, 6–9 October 2008;
20. ASCABOS Final Project Meeting. Istanbul, 22–24 October 2008;

21. Fifth International Conference on EuroGOOS «Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges». Exeter, UK, 20–22 May 2008;
22. MyOcean Science Days. Toulouse, 1–3 December 2010;
23. ECOOP Workshop. Istanbul, Turkey, 23–24 March, 2010;
24. 6th EuroGOOS Conference «Sustainable Operational Oceanography». Sopot, Poland, 4–6 October, 2011;
25. Украинско-российская конференция: «Гидродинамическое моделирование динамики Черного моря». Севастополь, 20–24 сентября, 2011;
26. EGU General Assembly Conference. Vienna, Austria, 22 – 27 April 2012;
27. Украинско-российская конференция «Южные моря как имитационная модель океана» Севастополь, МГИ НАН Украины, 17–21 сентября 2012;
28. MyOcean Science Days 2012, Geesthacht, Germany, 19 – 21 November 2012.

Публикации. В диссертацию вошли результаты 69 публикаций. Из них: статей – 50, в том числе в периодических изданиях – 37 (из них в наукометрическую базу SCOPUS входит 16 работ); тезисов в трудах научных конференций – 19. 2 работы выполнены без соавторов. В изданиях рекомендованных МОН Украины опубликовано 30 работ.

Структура и объем диссертации. Работа, общим объемом 399 стр., состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Она содержит 156 рисунков, 7 таблиц и список использованных источников из 478 наименований на 51 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации. Указывается, что разработка и создание междисциплинарных систем, позволяющих, подобно метеорологическим системам диагноза и прогноза погоды оперативно контролировать и прогнозировать состояние морской среды, является одной из основных задач нового бурно развивающегося раздела физической океанографии - оперативной океанографии, который на регулярной основе делает доступными данные наблюдений и моделирования высокого качества как для фундаментальных исследований, так и для практических приложений. При этом прогресс оперативной океанографии на современном этапе обусловлен, наряду с разработкой и созданием новых средств и методов наблюдений, развитием математического моделирования. Отмечается, что модели циркуляции находятся на индустриальном этапе их становления, который характеризуется переходом от фундаментальных разработок к их повсеместному практическому применению и который на первый план выдвигает перед пользователем проблему адаптации модели к конкретному объекту исследования и настройки параметров модели для решения поставленных задач. Формулируются цель и задачи исследования, описывается научное и практическое значение работы, перечисляются научные программы и темы, в рамках которых выполнялась работа. Общность и связанность поставленных и решенных задач проистекает из их оперативных приложений к единому объекту – Черному морю. Приводятся сведения об апробации результатов диссертации, научных публикациях и личном вкладе соискателя.

В **первом разделе** описывается, на каких уравнениях базируются входящие в систему мониторинга гидродинамические модели, на основе которых рассматриваются перенос и распространение загрязняющих примесей в морском бассейне. Отмечается, что сложность и разнообразие процессов в морях и океанах, наличие особенностей

протекания этих процессов в открытых и прибрежных областях вызывают необходимость разработки и применения при их исследовании различных моделей. Одним из отличий моделей является используемая система координат, при этом наиболее важным аспектом является выбор вертикальных координат.

В *подразделе 1.1* описываются три основных вида вертикальных координат, используемых в моделях, которые можно отнести к классу современных моделей высокого уровня, т.е. наиболее полных с точки зрения физического наполнения, и в то же время наиболее распространенных, документированных и, зачастую, доступных через интернет.

В *подразделе 1.2* приводится краткое описание физико-географических особенностей объекта исследования – Черного моря.

Далее рассматриваются задачи о переносе и распространении загрязняющих примесей в Черном море, основанные на использовании оперативной модели циркуляции МГИ, служащей гидродинамическим блоком в системе диагноза и прогноза, которая функционирует в Черноморском Центре мониторинга Черного моря. Уравнения оперативной модели циркуляции МГИ (Демышев С.Г., Коротаев Г.К., 1989, 1992), граничные и начальные условия приводятся в *подразделе 1.3*.

Подраздел 1.4 посвящен моделированию сезонного хода пространственного распределения эмульсионно-растворенной фракции нефтяных углеводородов (НУ) в аэробной зоне Черного моря, включающему параметризацию химико-биологических процессов окисления НУ в морской воде, с целью восстановления фонового (в отсутствие аварийных разливов и сбросов НУ) распределения НУ в море. В случае хронического загрязнения НУ поступают в морскую среду преимущественно в растворенной форме или в форме эмульсий, которые системой течений перераспределяются по акватории, а химические и биохимические процессы определяют окончательную судьбу НУ в море. Предполагалось, что масса растворенных в морской воде нефтепродуктов состоит из трех фракций – легкой, средней и тяжелой, процесс трансформации которых описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, выражающих изменение во времени и пространстве концентрации C_m ($m = 1, 2, 3$) каждой фракции:

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + \frac{\partial C_m u}{\partial x} + \frac{\partial C_m v}{\partial y} + \frac{\partial C_m w}{\partial z} = F_m + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C_m}{\partial z} \right) + \mu_m C_m, \quad (1)$$

где C_m - концентрация m -ой фракции; t - время; u, v, w - компоненты скорости в прямоугольной системе координат (x, y, z) , оси которой направлены соответственно на восток, север и вертикально вниз; $F_m \equiv \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial C_m}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial C_m}{\partial y})$ - член, описывающий горизонтальную турбулентную диффузию; A_H, K_H - коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно; μ_m - коэффициент неконсервативности, учитывающий изменение концентрации примеси вследствие химических и биологических превращений и в общем случае являющийся функцией координат и времени. Вид коэффициента μ_m определялся согласно параметризации процессов окисления НУ, предложенной Коноваловым С.К. (2004) на принципах формальной кинетики химических процессов с учетом их зависимости от температуры морской воды и концентрации клеток микроорганизмов, перерабатывающих m -ю фракцию. Модель переноса (1) была инкорпорирована в модель циркуляции Черного

моря. Для задания атмосферного воздействия использовались среднемесячные климатические данные о ветре, осадках и испарении (Staneva J.V., Stanev E.V., 1998). Поступление НУ в Черное море с речными водами и водами нижнего босфорского течения задавалось пропорционально объему среднемесячного стока. На дне моря задавалось отсутствие потоков НУ, а на поверхности моря - поток НУ, попадающих в море с осадками. Анализировались результаты двух численных экспериментов: при суммарном поступлении НУ в море равном опубликованным оценкам и превышающем опубликованные величины в 10 раз. Результаты выполненных численных экспериментов позволили исследовать роль отдельных фракций НУ в сезонном ходе среднего суммарного вертикального распределения НУ. Получено, что при поступлении НУ, соответствующем опубликованным оценкам, от 90 до 100% средней концентрации обеспечивается присутствием тяжелой фракции НУ. Легкая и средняя фракции НУ определяют особенности сезонного хода среднего вертикального распределения НУ в Черном море, для которого характерны максимальные величины концентраций в весенне-летний период и минимальные величины в зимний. Показано, что в горизонтальном распределении максимальные концентрации НУ наблюдаются в шельфовых районах и на периферии основных циклонических круговоротов, в том числе в глубоководной части, разделяющей районы влияния западного и восточного циклонических образований.

В подразделе 1.5 оперативная модель циркуляции МГИ используется при создании оперативной системы прогноза распространения нефтяных разливов в Черном море BlackSeaTrackWeb (BSTW). Влияние нефтяного загрязнения на экологию прибрежных и морских экосистем особенно разрушительно в случае аварийных разливов. Авария лишь на одном нефтеналивном танкере может привести к единовременному поступлению в морскую среду Черного моря количества нефти, сравнимого с его годовым поступлением. Мониторинг незаконных разливов и использование обратных по времени расчетов траекторий разливов (backtracking) позволяет быстро и эффективно определить источник загрязнения. Поэтому необходимо использование самых современных систем прогноза распространения и эволюции нефтяных разливов. Основным компонентом любой системы прогноза нефтяных разливов является программный комплекс, обеспечивающий необходимыми оперативными данными о динамике вод и атмосферном воздействии в рассматриваемом регионе. В рамках проекта “Environmental Monitoring of the Black Sea Basin: Monitoring and Information Systems for Reducing Oil Pollution” (MONINFO) Комиссии по защите Черного моря от загрязнения (Black Sea Commission) на основе разработанной в Шведском институте метеорологии и гидрологии (Swedish Meteorological and Hydrological Institute -SMHI) для Балтийского моря системы прогноза распространения нефтяных разливов SeaTrackWeb, которая была использована в качестве прототипа, создана система оперативного прогноза распространения нефтяных загрязнений в Черном море - BlackSeatrack Web (BSTW). Основной задачей системы BSTW является расчет распространения нефтяных разливов, поступивших в Черное море в результате аварийных или несанкционированных сбросов. Система BSTW также может быть использована и для прогноза переноса морскими течениями других объектов, таких как водоросли, некоторые химические вещества и различного рода плавающие объекты, такие, как спасательные шлюпки или затонувшие тела. Системы BSTW состоит из трех основных компонент: данных трехдневного прогноза гидрометеорологических параметров, поступающих из гидродинамического блока Системы мониторинга и

прогноза состояния Черного моря Центра морских прогнозов МГИ; нефтяной модели PADM (PAricle Dispersion Model), разработанной Шведским институтом метеорологии и гидрологии (SMHI) и Датской администрацией по морской безопасности (Danish Maritime Safety Administration-DAMSA); графического интерфейса пользователя, позволяющего запускать систему на персональном компьютере, проводить расчеты и анализ их результатов. Результаты расчета дрейфа нефтяных разливов представляются на мониторе компьютера в виде траекторий частиц на карте Черного моря. Движение частиц может быть анимировано. Векторные поля поверхностных течений и ветра так же могут быть отображены. Кроме того, различные характеристики эволюции нефтяного пятна в процессе дрейфа представляются в виде таблиц и графиков.

Система BSTW является, в первую очередь, полезным инструментом для организаций, ответственных за ликвидацию последствий нефтяных разливов в Черном море и спасение на водах. В дополнение к прогнозу дрейфа нефти, система предоставляет возможность проводить обратный во времени расчет. В этом случае расчет начинается в момент времени, когда объект или пятно были обнаружены и система рассчитывает траекторию дрейфа объекта назад во времени, показывая его предыдущее положение в акватории. Это особенно актуально для выявления судов, ответственных за незаконный сброс нефтепродуктов в море, после обнаружения загрязнений, например, по спутниковым данным. Система BSTW круглосуточно доступна через всемирную сеть интернет, учитывает почти все физические процессы, определяющие эволюцию нефтяного пятна (эмульгирование, седиментация, испарение, погружение, вязкость, поверхностное натяжение и др.), обеспечивает мгновенный доступ к данным последних морских прогнозов, предоставляет возможность расчета траекторий переноса морскими течениями различных плавающих объектов и, наконец, поддерживает функцию отслеживания к исходному состоянию (backtracking).

В конце подраздела приводятся примеры использования системы BSTW в реальных ситуациях: аварийного разлива нефти в северо-западной части Черного моря, приведшего к катастрофическому загрязнению пляжей Одессы и Ильичевска, и операции по поиску и спасению потерявшего управление судна в штормовых условиях.

Подраздел 1.6 посвящен моделированию эволюции поля концентрации долгоживущих радионуклидов в Черном море после аварии на Чернобыльской атомной электростанции. Исследование распространения техногенной радиоактивности в морской среде входит в круг проблем, охватываемых рамками оперативной океанографии. В первую очередь эти исследования связаны с задачами экологического характера, а также с расширением круга задач, в которых долгоживущие радиоизотопы используются в качестве трассеров различных гидродинамических процессов. В отличие от выпадений на поверхность суши, которые в течение длительного времени могут оставаться без изменений, распределение радионуклидов в морском бассейне начинает трансформироваться системой течений уже с момента поступления. Поэтому первоначальное распределение чернобыльских радионуклидов в поверхностных водах должно существенно отличаться от наблюдаемого в июне 1986 г. Оценка общих тенденций изменения поля концентрации ^{137}Cs в Черном море за последние несколько десятилетий проводилась с использованием гидродинамической модели исследователями Staneva J.V., Buessler K.O., Stanev E.V., Livingston H.D. (1999). В настоящем подразделе, применяя аналогичный подход, на основе синтеза модели циркуляции МГИ и модели переноса, описанных в подразделе 1.3 и 1.4, оценивалась

степень распространения пятна высокого содержания ^{137}Cs в поверхностном слое Черного моря в первый год после аварии на ЧАЭС. Транспорт пятна описывался уравнением вида (1). Начальное положение пятна в море с условной концентрацией в 100% задавалось на основе анализа данных измерений загрязнения на побережье и результатов предварительных численных экспериментов. По вертикали в начальный момент времени радионуклиды были равномерно распределены в приповерхностном 5-ти метровом слое, глубже концентрация ^{137}Cs принималась равной нулю. Проведенные расчеты позволили детально описать эволюцию пятна в море и оценить максимальный уровень плотности загрязнения поверхностных вод Черного моря в результате Чернобыльской аварии, который мог достигать значений 1800-2100 Бк/м³.

Во втором разделе поставленные задачи по исследованию динамики гидрофизических процессов решаются с помощью адаптированной к физико-географическим условиям Черного моря модели в σ -координатах.

В *подразделе 2.1* рассматриваются особенности применения σ -координат. Одной из проблем, которую приходится решать при использовании σ -координат, является проблема расчета горизонтальных градиентов давления, в англоязычной литературе - проблема «pressure gradient errors» (PGE). Дается обзор разработанных к настоящему времени методов снижения этих ошибок до приемлемого уровня. Другая проблема – это корректный выбор σ -координатной сетки модели и аппроксимации рельефа дна для удовлетворения условию гидростатической согласованности.

В *подразделе 2.2* одна из самых распространенных моделей циркуляции – модель Принстонского университета (Blumberg A.F., Mellor G.L., 1987) – POM (Princeton Ocean Model) берется за основу адаптированной к Черному морю σ -координатной модели. Описываются отличительные особенности модели POM и её версий, приводятся

уравнения модели и их трансформация при преобразовании из декартовой системы координат в σ -координатную систему. Описывается схема интегрирования по времени, основанная на технологии разделения на моды, дискретизация по пространству, расчетная область и параметры адаптированной σ -координатной модели. Число узлов по горизонтали 141 x 88, по вертикали 26 σ -уровней. Приводятся данные о расходах рек и через проливы, учитываемые в модели.

В *подразделе 2.3* с помощью разработанной версии σ -координатной модели проводится реконструкция климатического сезонного хода гидрофизических полей Черного моря. Предварительно был проведен эксперимент по восстановлению «модельного» сезонного климатического хода гидрофизических полей Черного моря, реализуемого в виде вынужденной реакции на изменения ветра и потоков тепла и массы годового периода на поверхности моря.

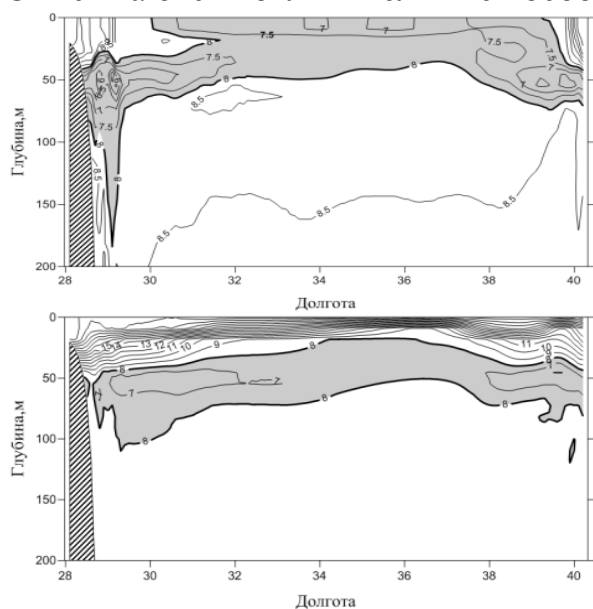


Рис.1. Зональный разрез поля температуры вдоль 43° с.ш. в середине февраля (вверху) и августа (внизу) последнего расчетного года.

Закрашенная область - вода с температурой $< 8^{\circ}\text{C}$

Цель - оценка способности модели при длительных расчетах выходить на квазипериодический режим при периодическом внешнем воздействии с качественно

правильным воспроизведением структуры гидрофизических полей. При проведении расчетов среднемесячные поля параметров атмосферного воздействия подвергались корректной процедуре интерполяции в соответствии с методом, предложенном Killworth P.D (1996). Расчет проведен на 10 лет и, примерно, через 5 лет расчетного времени модель вышла на квазипериодический режим. При этом линейные тренды интегральных параметров ничтожно малы. Анализ результатов расчетов показал, что модель качественно правильно воспроизводит известные особенности климатической сезонной изменчивости циркуляции и термохалинной структуры Черного моря. В частности, эволюция холодного промежуточного слоя (ХПС) носит квазипериодический характер на протяжении всего времени расчета, и он наблюдается в течение всего годового периода (рис.1). В дальнейшем проводится восстановление «реального» климата Черного моря на основе ассимиляции в модели климатических данных о температуре и солености. Для этого в правую часть уравнений переноса – диффузии тепла и соли (2,3) добавляются члены типа источников/стоков:

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{1}{D} \frac{\partial I}{\partial \sigma} + D\tilde{Q}_T; \quad (2)$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S + D\tilde{Q}_S, \quad (3)$$

где $\tilde{Q}_T$, $\tilde{Q}_S$ – функции мощности источников, имеющие следующий вид:

$$\tilde{Q}_T(\bar{x}, t) = \frac{1}{REL[1 + \eta^2(\bar{x})]} [T^{Cl}(\bar{x}, t) - T(\bar{x}, t)], \quad \tilde{Q}_S(\bar{x}, t) = \frac{1}{REL[1 + \eta^2(\bar{x})]} [S^{Cl}(\bar{x}, t) - S(\bar{x}, t)]. \quad (4)$$

В формулах (2)-(4) следующие обозначения: $\bar{x} = (x, y, \sigma)$; U, V – горизонтальные составляющие скорости течений; ω – нормальная к σ -поверхности скорость; T – температура; S – соленость; F^T и F^S – боковая диффузия тепла и соли соответственно; D – полная глубина моря; I – поток коротковолновой солнечной радиации; K_H – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии. T^{Cl} , S^{Cl} – среднемесячные климатические температура и соленость соответственно (Белокопытов, 2004); REL – параметр релаксации; $\eta^2(\bar{x})$ – дисперсия ошибок «измерений» климатических температуры и солености, нормированная на дисперсию поля. Предполагается, что погрешности «измерений» имеют характер белого шума и не коррелированы с полезным сигналом, не зависят от времени, и одинаковы для температуры и солености. Время релаксации принято равным одним суткам. Расчет проводился на 10 лет.

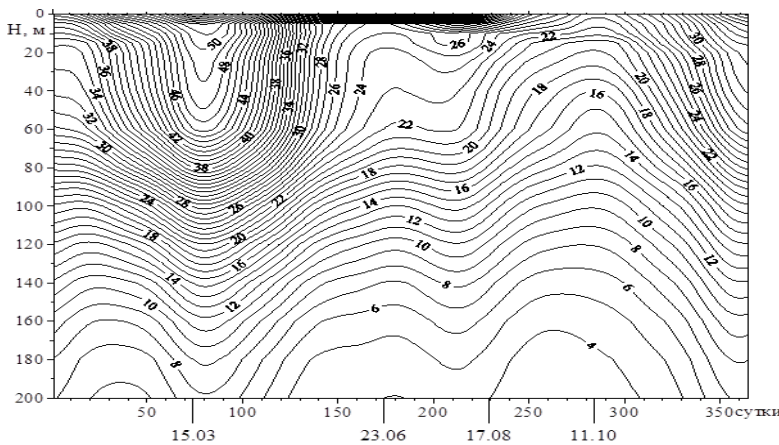


Рис.2. Вертикально-временная диаграмма средней по акватории моря кинетической энергии (см²/с²)

Графики изменения по времени средней по объему кинетической энергии и среднего по площади уровня показали, что уже после 4 лет интегрирования модель вышла на квазипериодический режим. Вертикально-временная диаграмма средней по акватории

моря кинетической энергии течений (рис.2) дает представление о внутригодовой изменчивости и интенсивности климатической циркуляции. Подробно рассмотренные в работе рассчитанные вертикальные и горизонтальные распределения температуры, солености, скорости и их годовой ход показал, что модель удовлетворительно описывает известные особенности термохалинной структуры и циркуляции вод Черного моря, и их сезонную климатическую изменчивость. Полученные массивы климатических данных использованы при проведении ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря.

Подраздел 2.4 посвящен реанализу гидрофизических полей Черного моря, выполненному с помощью разработанной версии σ -координатной модели. На сегодняшний день, пожалуй, единственным способом описать долговременную изменчивость морей и океана от самых малых до самых больших пространственных и временных масштабов является реанализ, восстанавливающий полную трехмерную картину объекта как функцию времени. Реанализ океана представляет собой метод комбинирования общей модели циркуляции, в которой внешние возбуждающие факторы обусловлены историческими оценками поверхностного ветра, потоками тепла и пресной воды на его границах, с историческими наблюдениями океана на основе некоего алгоритма усвоения данных в целях реконструкции исторических изменений состояния океана (Russell J., Cohn R., 2012). Описываются сферы использования продуктов реанализа, являющегося одной из важнейших задач оперативной океанографии. Качество воспроизведения эволюции трехмерных гидрофизических полей Черного моря зависит как от уровня физической адекватности численной модели циркуляции, так и от уровня обеспеченности данными, ассимилируемыми в модели. Для проведения реанализа был выбран период с 1971 по 1993 гг., отличающийся наибольшей интенсивностью проведения океанографических работ в Черном море. Общее количество гидрологических станций в этот промежуток времени составило 101 тысячу. На основе данных измерений температуры и солености были подготовлены данные для ассимиляции (Моисеенко В.А., Белокопытов В.Н., 2008), представляющие собой непрерывный ряд ежемесячных массивов до глубины 300 м, полученных оптимальной интерполяцией в узлы сетки отклонений данных измерений на станциях от восстановленного климата. Глубже 300 м использовались климатические данные. Ассимиляция в модели натурных данных проводилась аналогично методу (2)-(4), а именно путем включения в правую часть уравнений переноса-диффузии тепла (2) и соли (3) членов типа источника/стока (4). Однако, в этом случае функции мощности источников зависели от точности оптимальной интерполяции данных измерений, а вместо климатических данных T^{cl} , S^{cl} использовались данные измерений. Данные об атмосферном воздействии были подготовлены на основе средиземноморского массива глобального реанализа ERA-40, созданного в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды ECMWF с временной дискретностью 6 часов. Результаты проведенного расчета позволили описать сезонную и межгодовую изменчивость термохалинных и динамических характеристик Черного моря в период 1971–1993 гг. Приведенный на рис.3 пример демонстрирует отличия сезонного хода средней на горизонте 50 м температуры в теплом 1981 г. от её хода в холодном 1985 г. Заметно смещение фазы максимальных осенних значений температуры 1981 и 1985 гг. по отношению к максимуму климатического

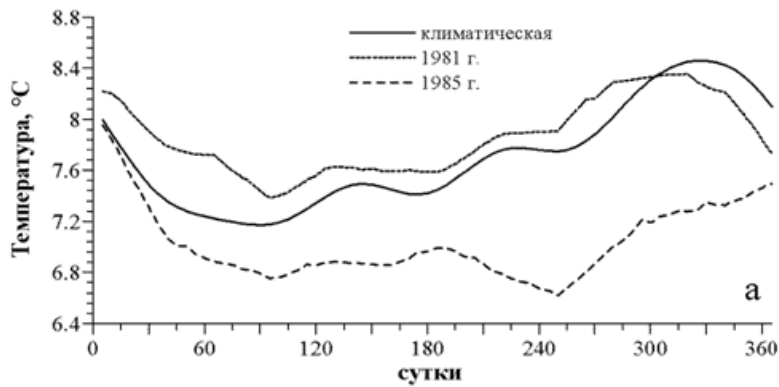


Рис.3. Годовой ход средней по акватории моря температуры на глубине 50 м

сезонного хода температуры. На рис.4 показаны изменчивость среднего по поверхности моря суммарного потока тепла и диаграмма межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам температуры в слое 0–300 м за 23-летний срок. Можно видеть, как в течение каждого года прослеживаются основные процессы, формирующие термохалинную структуру: осенне-

зимнее выхолаживание вод, формирование верхнего квазиоднородного слоя (ВКС), обновление ХПС, весенне-летний прогрев вод, образование сезонного термоклина, формирование нового ХПС, уменьшение холодозапаса ХПС к осени и нарушение в отдельные годы его сплошности. В работе подробно проанализирована межгодовая изменчивость термохалинных и динамических характеристик, а также тенденции в их изменчивости, выявленные по результатам реанализа. Получено совпадение линейных трендов на соответствующих участках временной шкалы при сопоставлении с результатами междесятилетней изменчивости температуры и солёности, полученной по независимым данным измерений (Белокопытов В.Н., Шокурова И.Г., 2005).

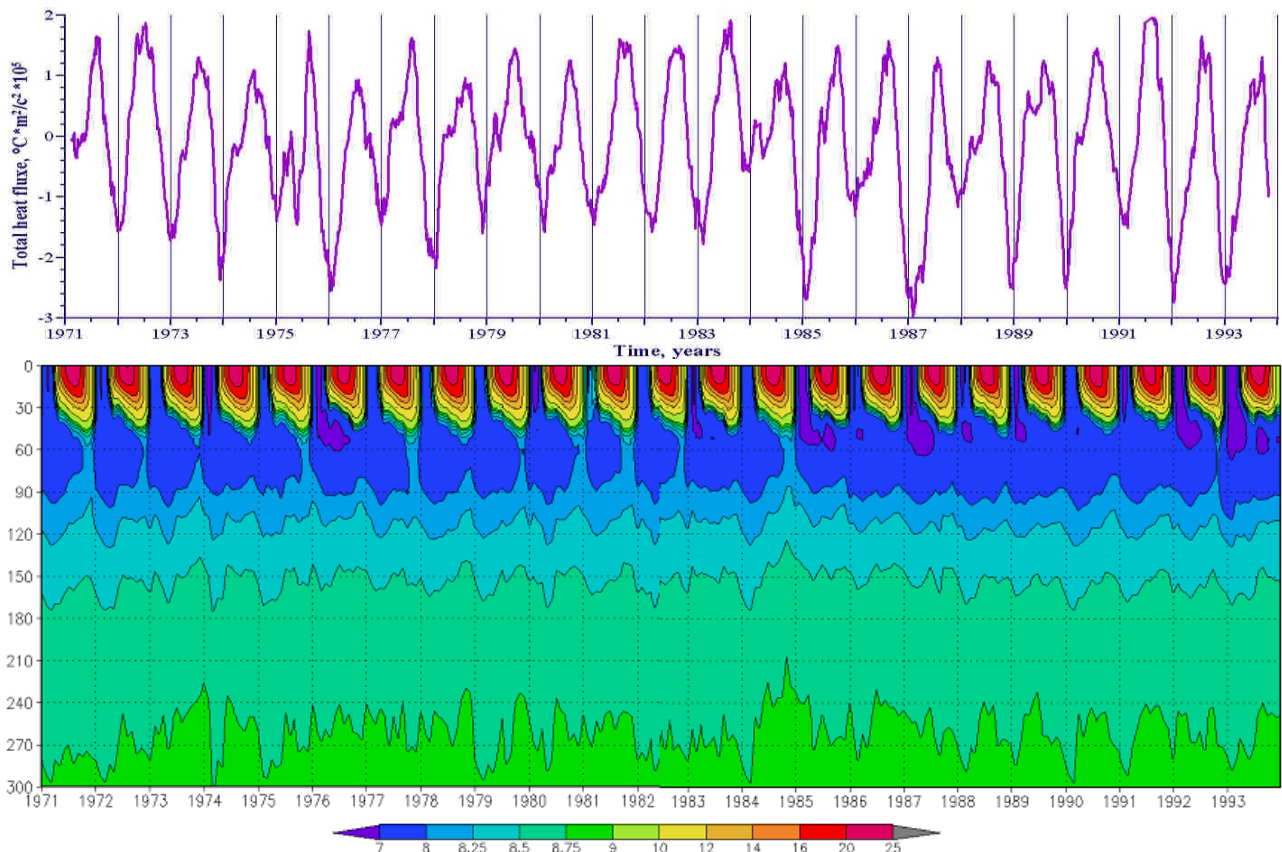


Рис.4. Изменчивость среднего по поверхности моря суммарного потока тепла (вверху) и диаграмма межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам температуры в слое 0–300 м (внизу).

Полученные в результате реанализа массивы температуры, солёности, плотности и течений позволили с временной дискретностью в одни сутки проследить особенности их сезонной эволюции. По этим данным подробно описаны механизмы формирования ХПС: адвективный – связанный с адвекцией холодных вод, формирующихся на северо-западном шельфе, и конвективный – обусловленный зимней конвекцией внутри циклонических круговоротов в центральной части моря, а также процессы формирования ХПС в периоды чередования атмосферного воздействия: аномально теплой зимы 1980 – 1981 гг., нормальной зимы 1987 – 1988 гг. и холодной зимы 1992 – 1993 гг. Показано, что в теплую зиму 1980-1981 гг. адвективное формирование ХПС включилось более чем на месяц позже, чем в холодную зиму 1992-1993 гг., а локальное формирование ХПС в центре ВЦК запоздало на полмесяца.

Состояние моря, рассчитываемое с помощью той или иной математической модели циркуляции, описывает в фазовом пространстве свою, присущую данной модели, траекторию, которая может достаточно сильно отличаться от реальной траектории. Поэтому в моделях циркуляции, используемых для оперативного прогноза реального состояния моря, применяется та или иная процедура ассимиляции данных наблюдений, которая как бы «притягивает» собственную траекторию модели к реальной траектории состояния системы. Проведенное в работе сопоставление расчета с ассимиляцией данных наблюдений с прогностическим расчетом при одних и тех же возбуждающих силах показало, что, действительно, фазовые траектории термогидродинамической системы Черного моря в пространстве состояний отличаются. Однако, эти отличия даже при достаточно длительном проведенном расчете не приводят к катастрофическим расхождениям. Используемая модель качественно правильно воспроизводит стратификацию Черного моря и её эволюцию на масштабах десятилетий, что позволяет сделать вывод о том, что на её основе можно проводить гидродинамическую интерполяцию данных наблюдений с целью восстановления истинного состояния Черного моря. При этом ассимиляция архивных данных корректирует чисто прогностический расчет в сторону лучшего количественного соответствия модельных полей данным наблюдений.

В *подразделе 2.5* исследуется влияние оптических характеристик морской воды на динамику и стратификацию вод в верхних слоях Черного моря с помощью разработанной версии σ -координатной модели циркуляции и биооптической модели, описывающей проникновение коротковолновой радиации в толщу моря. Оценивается влияние оптического состояния моря на его гидродинамический режим в период конца XX столетия, в течение которого оптические свойства Черного моря претерпевали значительные изменения. Были проведены два прогностических расчета изменчивости циркуляции в период с 1985 по 2001 гг. при идентичном задании начальных и граничных условий и с привлечением данных реанализа ERA40 об атмосферном воздействии. Однако, в одном из них полагалось, что прозрачность вод постоянна, а во втором при вычислении коротковолновой радиации I в уравнении (2) учитывался спектральный состав излучения и изменчивость прозрачности вод во времени и пространстве согласно биооптической модели поглощения и рассеяния света основными оптически активными компонентами в Черном море (Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Сосик Х.М., 2008, 2009). Результаты расчетов показали, что учет реальных оптических свойств вод Черного моря приводит к изменению теплового бюджета верхних слоев моря, которое, в свою очередь, вызывает заметные отличия в динамике и, как следствие, достаточно значимые отличия в

пространственном и временном распределении целого ряда гидрофизических параметров: толщины ВКС, кинетической энергии течений, адвективных потоков тепла, толщины и холодозапаса ХПС и других.

Третий раздел посвящен моделированию циркуляции и процессов переноса в прибрежных морских районах. Специфические условия и особенности протекания гидрофизических процессов в прибрежных областях моря требуют от моделей существенно более высокого разрешения. Но, несмотря на ошеломляющий прогресс в компьютерных технологиях, в настоящее время пока невозможно построить модель общей циркуляции моря с достаточно высоким разрешением и разумным временем счета. Выходом из этой ситуации является построение региональных – локальных – моделей циркуляции. И тогда на сравнительно небольшой, ограниченной, акватории можно использовать достаточно малые шаги по пространству, сохраняя приемлемое время расчетов. Однако, при этом возникает необходимость учета влияния акватории открытого моря, примыкающей к рассматриваемой прибрежной области, которое может быть доминирующим, несмотря на наличие собственной динамики в этой области. То есть возникает проблема постановки краевых условий на открытых жидких границах области.

В *подразделе 3.1* для выбора того или иного способа задания условий на открытой границе проблема рассматривается с общей точки зрения. Приводится корректная формулировка задачи, состоящая в том, чтобы найти решение в прибрежной области, учитывающее влияние внешней, открытой, части моря, т.е. адекватно связанное с решением в этой внешней области через жидкую границу. В подразделе описываются различные подходы, применяемые для решения этой проблемы. Особое внимание уделяется технологии вложенных сеток. Приводятся несколько типов краевых условий на открытой границе, используемых в работе.

В *подразделе 3.2* исследуется распресняющий эффект речного стока во время весеннего половодья на северо-западном шельфе, который занимает особое место в Черном море. Сюда попадает большая часть всего речного стока. Он во многом определяет гидрологическую структуру моря, в первую очередь, вертикальное распределение солёности, которое, в свою очередь, влияет на циркуляцию в этом регионе. При решении задач оперативного прогноза необходимо знать, каким образом циркуляция на шельфе трансформируется благодаря речному стоку. Решается модельная задача о втекании речных вод с нулевой солёностью и постоянной температурой в море с той же температурой воды и с солёностью 18‰, имитируя однородное состояние вод в конце зимы вследствие конвективного перемешивания. Для решения задачи привлекалась модель в z -координатах, разработанная в МГИ (Михайлова Э.Н., Семенюк И.М., Шапиро Н.Б., 1992; Андросович А.А., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б., 1994). В результате расчета максимальное удаление границы распресненных вод на поверхности моря от устья Дуная за 30 суток составило, примерно, 100 км. Проведенные оценки показали, что распреснение в верхних слоях происходит в основном за счет горизонтальной адвекции, а вертикальная структура поля солёности поддерживается главным образом за счет вертикальной адвекции. Примерно через 10 суток от начала расчета в районе устья Дуная в подповерхностных слоях начинает формироваться антициклонический вихрь, который, интенсифицируясь, как бы отжимает северную границу циклонического потока к открытой части моря. Через 30 суток характерный размер этого вихря составляет 70 км. Подобного рода вихри хорошо видны на спутниковых фотографиях.

В подразделе 3.3 проводится расчет распространения техногенного загрязнения у Южного берега Крыма в результате аварии в Ласпинской бухте. В результате аварии, произошедшей в ночь 4 сентября 1999 г., теплоход «Кристина» раскололся пополам и затонул в бухте Ласпи в непосредственной близости от берега на глубине около 8 м. На борту судна находилось 56 т горюче-смазочных материалов. Возникла угроза экологической катастрофы. Задача состояла в определении возможных путей и степени распространения техногенного загрязнения в Ласпинской бухте в первые несколько суток после аварии при различных ветровых условиях. Целью являлась оценка, прежде всего, поверхностного распространения загрязнения, как наиболее неблагоприятного для курортных прибрежных районов рассматриваемого региона. Были проведены сценарные расчеты переноса течениями нефтепродуктов под воздействием ветров различного направления. Для расчета циркуляции в рассматриваемом районе, примыкающем к Южному берегу Крыма, использовалась разработанная версия σ -координатной модели, описанная в разделе 2, а процесс переноса загрязняющей примеси описывался уравнением, аналогичным уравнению (1) подраздела 1.4, записанному в σ -координатах:

$$\frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial CuD}{\partial x} + \frac{\partial CvD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H D \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + \mu C, \quad (5)$$

где C - концентрация загрязняющих веществ; A_H - коэффициент боковой турбулентной диффузии; μ - коэффициент неконсервативности, учитывающий изменение концентрации

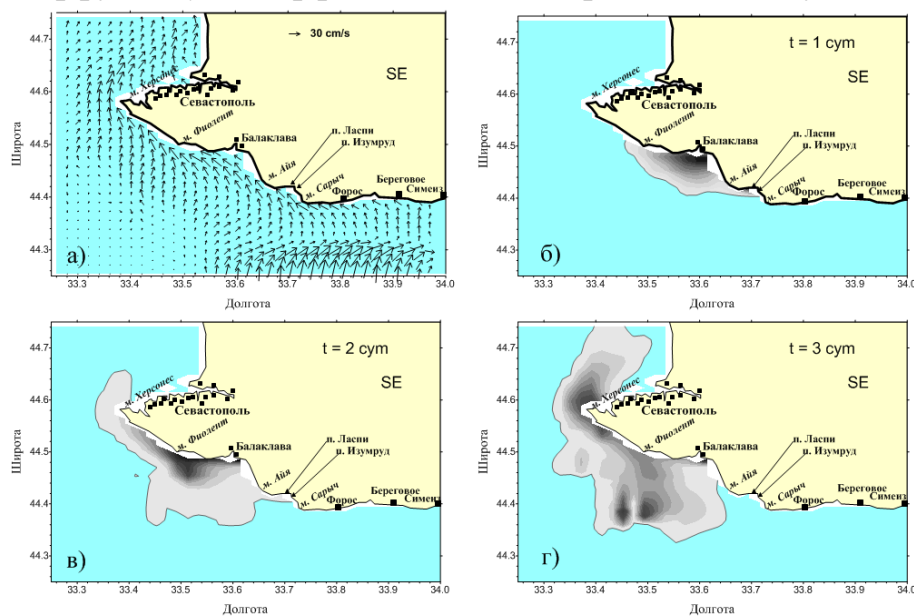


Рис.5. Поверхностные течения (а) и положение нефтяного пятна через одни (б), двое (в) и трое (г) суток при юго-восточном ветре

и времени со значением напряжения трения равным 1 дин/см^2 . В месте аварии на поверхности двух боксов задавалась начальная концентрация $C_0 = 1$ и в остальной части акватории $C_0 = 0$ и вместе с уравнениями модели считалось уравнение (5) на срок в 3 суток. При решении уравнения (5) использовалась итеративная схема Smolarkiewicz P.K. (1983, 1984). На рис.5 приведены результаты расчетов поверхностной циркуляции моря при юго-восточном ветре, который по полученной апостериори информации соответствовал реальному направлению, и конфигурация на поверхности моря нефтяного пятна на конец каждого расчетного дня. По истечении вторых суток пятно,

примеси вследствие химических и биологических превращений и в общем случае являющийся функцией координат и времени. Шаги по горизонтали составляли 1 км вдоль широты и 2 км вдоль долготы, по вертикали использовалось 10 σ -уровней. Расчет скоростей течений проводился диагностическим методом, т.е. при заданном поле плотности. Сценарные расчеты проводились для ветров различного направления, однако, во всех вариантах ветер принимался равномерным по пространству

распространяясь в непосредственной близости от берега, обогнув мыс Херсонес, продвигается в Каламитский залив, полностью перекрыв Севастопольские бухты. Работы по очистке района аварии от загрязнения (вместе с топливом было откачено более 3000 т льяльных вод) велись в течение 2-х недель и потребовали привлечения значительных сил и средств. Для более обоснованного выбора мероприятий по ликвидации последствий катастрофических аварий, выбросов и т. д., а также во избежание неоправданно крупных финансовых затрат при осуществлении этих мероприятий необходимо создание и внедрение в действие соответствующих систем контроля морской среды.

Подраздел 3.4 посвящен моделированию циркуляции и распространения загрязняющей примеси в Балаклавской бухте. В системе Севастопольских бухт Балаклавская бухта занимает особое место. Она значительно отличается от остальных бухт не только Севастополя, но и всего Черного моря. Природно-климатические условия и географическое положение Балаклавской бухты открывают широкие возможности для развития курортно-рекреационного комплекса. Но нерациональное с экологической и рекреационной точки зрения использование акватории и территории бухты привело к серьезным последствиям. Экологическими аспектами, прежде всего, и определяется актуальность задачи диагноза циркуляции вод. Расчет течений проводился на основе адаптированной σ -координатной модели диагностическим методом. Для задания полей температуры и солености использовались данные гидрологической съемки, выполненной в рамках экологического мониторинга Балаклавской бухты. В акватории бухты были установлены автономные буйковые станции (рис.6),

данные измерений с которых использовались для сопоставления с результатами расчетов и задания граничных условий на жидкой границе, примыкающей к открытому морю. Шаги по горизонтали равнялись, примерно, 16,5 м вдоль долготы и 20 м вдоль широты, по вертикали использовалось 6 σ -уровней. На рис.8 приведена расчетная область и рельеф дна. Треугольниками указаны места постановки автономных буйковых станций, стрелками - места выброса загрязняющих веществ: *A*- выпуск сточных вод пос. Балаклава; *B* – ливневый сток; *C* – сточные воды завода «Металлист». На врезке показано положение Балаклавской бухты на Крымском побережье.

Численные эксперименты состояли из расчета квазистационарной циркуляции, возбуждаемой из состояния покоя заданным ветром, который ввиду малости акватории бухты предполагался однородным по площади. Максимальные скорости в поверхностном слое имеют место в западной прибрежной зоне у входа в бухту и достигают величины 12 см/сек. В придонном слое в самой бухте течения направлены в противоположную сторону по сравнению с поверхностной циркуляцией. На протяжении всей бухты вода вытекает из бухты вдоль западного берега. На рис.7 приведено распределение вертикальной скорости в приповерхностном слое и в ближайшем к придонному слою.

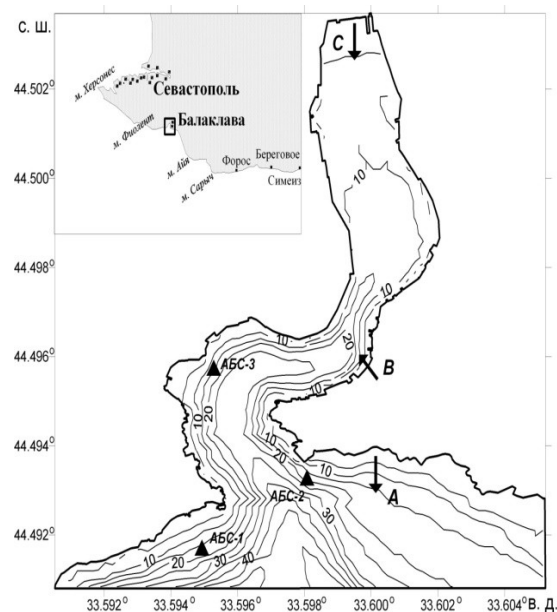


Рис.6. Рельеф дна Балаклавской бухты

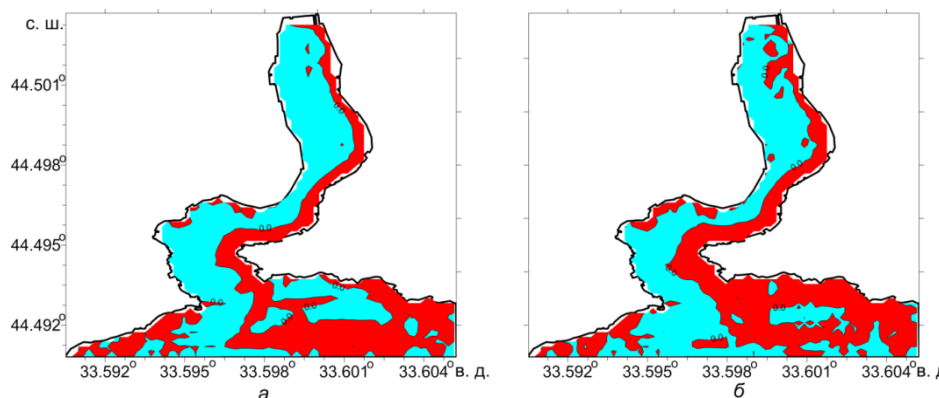


Рис. 7. Распределение вертикальной скорости в приповерхностном (а) и ближайшем к придонному (б) слоях Голубой цвет—область подъема вод, красный—опускания

открытого моря, примыкающей к бухте, также превалирует опускание вод, хотя наблюдается и небольшой участок зоны апвеллинга. Максимальная скорость подъема вод составляла величину порядка 1 мм/сек. Полученные трехмерные поля течений использовались для расчета распространения загрязняющей примеси из мест выброса, указанных на рис.8 стрелками. Процесс переноса загрязняющей примеси, так же, как и в предыдущем подразделе, описывался уравнением (5), выброс предполагался импульсным. В работе подробно описываются процессы распространения загрязнений от трех указанных источников. Следует отметить, что, как показали проведенные расчеты, на распространение пятен примеси сильное влияние оказывает вертикальная циркуляция. Выполненные расчеты циркуляции вод и адаптированная к условиям Балаклавской бухты σ -координатная модель могут служить основой для исследования экологических последствий различного рода техногенных аварий и катастроф в бухте.

Четвертый раздел посвящен разработанной и созданной Черноморской оперативной системе морских прибрежных прогнозов.

В подразделе 4.1 описана пилотная версия Черноморской оперативной системы морских прибрежных прогнозов, которая была разработана в рамках европейского проекта EU FP5 «ARENA» (A Regional Capacity Building and Networking Programme to Upgrade Monitoring and Forecasting Activity in the Black Sea Basin). В основе системы лежали 6 прибрежных моделей различного типа. В качестве глобальной модели выступала оперативная модель циркуляции Черного моря, описанная в 1 разделе. Выбор областей был обусловлен тем, что все они отличаются наличием интенсивного судоходства, рыболовства и других видов промышленной эксплуатации акваторий, то есть большой антропогенной нагрузкой. В то же время в этих областях имеет место сложная динамика вод, обусловленная резким свалом глубин, сложной конфигурацией береговой черты, влиянием внешней границы ОЧТ и другими факторами, в частности, речным стоком. Две региональные модели - для Бургасского залива (Ибраев Р.А., Трухчев Д.И., 1996) и района у берегов Грузии (Kordzadze A., Demetrashvili D.I., 2008) являлись моделями в z -координатах. Остальные четыре прибрежные модели: для северо-западного шельфа, для Каламитского залива, для акватории у берегов Румынии и для прибрежной акватории России использовали σ -координаты, причем последние три из них были основаны на разработанной версии σ -координатной модели циркуляции Черного моря, описанной в разделе 2.

Распределения практически одинаковы, причем аналогичная картина имеет место по всей глубине бассейна. Вдоль всего западного берега широкой полосой тянется зона подъема вод, а вдоль восточного берега в самой бухте располагается зона опускания вод шириной, примерно, в два раза меньшей. В восточной части области

В *подразделе 4.2* описываются принятые граничные условия и алгоритм расчета для этих трех σ -координатных моделей. При их разработке использовалась технология вложенных сеток. Выбранная прибрежная область ограничивалась прямоугольником, стороны которого проходили параллельно широте и долготе по узлам сетки глобальной оперативной модели, в которых вычислялась температура и соленость; узлы мелкомасштабной сетки для температуры и солености располагались на этих же линиях. Шаг по пространству для локальной прибрежной модели принимался кратным шагу глобальной модели. При этом узлы, в которых рассчитывались составляющие скорости, были сдвинуты в соответствующем направлении на полшага мелкомасштабной сетки. При постановке краевых условий на открытой границе применялся описанный в разделе 3 односторонний (без обратной связи) метод вложенных сеток. Сравнительный анализ различных типов условий (Cailleau S., Fedorenko V., Barnier B., Blayo E., Debreu L., 2008) показал, что «прозрачность» жидкой границы при использовании одностороннего метода вложенных сеток намного больше по сравнению с другими методами при условии, что значения на открытой границе поступают от внешней модели достаточно часто. Немногим более лучшие результаты показывает двухсторонний (с обратной связью) метод вложенных сеток. Однако, вычислительные затраты при использовании этого метода сводят на нет его преимущества по сравнению с односторонним методом. В то же время при оперативном прогнозе вычислительная эффективность выдвигается на первый план. По глобальной модели рассчитываются поля на всей акватории, включая и область прибрежной модели, причем непрерывно усваиваются данные дистанционных и контактных измерений. Учитывая это, обратное влияние малой ограниченной области на глобальную область вряд ли будет достаточно большим. Кроме того, принятый подход позволяет проводить расчеты для всей акватории и выбранных регионов независимо друг от друга, что сулит выигрыш во времени при эксплуатации системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей в оперативном режиме. Были выбраны следующие краевые условия на открытых границах прибрежных региональных моделей:

- для нормальных компонент баротропной (средней по глубине) скорости:

$$U_R^{normal} = U_G^{normal} + \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{g}{H}} \cdot (\eta_R - \eta_G) \quad , \quad (6)$$

где индекс R обозначает параметр региональной модели, а G - параметр глобальной модели в соответствующем узле расчетной сетки региональной модели. Константа $\varepsilon = 1$ для восточной и северной границы и $\varepsilon = -1$ для западной и южной границы;

- для касательных компонент баротропной скорости:

$$U_R^{tangent} = U_G^{tangent} \quad . \quad (7)$$

- для нормальных и касательных компонент бароклинной скорости:

$$u_R^{normal} = u_G^{normal} \quad ; \quad u_R^{tangent} = u_G^{tangent} \quad , \quad (8)$$

- для температуры и солености в точках, где вода втекает во внутреннюю область:

$$T_R = T_G \quad ; \quad S_R = S_G \quad , \quad (9)$$

а в точках, где вода вытекает, значения параметров экстраполируются с использованием схемы направленных разностей против потока для уравнения адвекции:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_n \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial S}{\partial t} + u_n \cdot \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

Требуемые значения параметров глобальной модели в узлах региональной модели вычислялись с использованием сначала линейной интерполяции по горизонтали по значениям в ближайших узлах глобальной сетки, а затем с помощью сплайнов – по вертикали. Процедура интерполяции значений параметров из узлов глобальной модели в узлы локальной прибрежной модели для последующего удовлетворения граничным условиям (6)-(10) приводит к тому, что потоки массы и тепла в глобальной и региональной моделях через открытую границу не совпадают. Кроме того, необходимо учитывать, что топография дна вдоль жидкой границы в одной модели, как правило, отличается от оной в другой модели, что также приводит к неравенству потоков. Особенно важно (Zodiatis G., Lardner R., Lascaratos A., Georgiou G., Korres G., and Syrimis M.B., 2003) для согласованности решения в двух областях соблюдать условие равенства потоков массы через жидкую границу. Поэтому после интерполяции составляющих скорости течений глобальной модели в узлы локальной сетки скорости корректировались таким образом, чтобы потоки массы через открытую границу совпадали, а именно:

$$u_G^{normal} = \tilde{u}_G^{normal} - \Delta u, \quad (11)$$

где $\tilde{u}_G^{normal}$ - интерполированное значение глобальной переменной в узел локальной модели, а Δu - поправка, вычисляемая следующим образом:

$$\Delta u = \frac{M_R - M_G}{S_R}, \quad (12)$$

$$M_R = \int_{l_1}^{l_2} dl \int_{-H_R}^{\eta} \tilde{u}_G^{normal} dz; \quad M_G = \int_{l_1}^{l_2} dl \int_{-H_G}^{\eta} \tilde{u}_{G_0}^{normal} dz; \quad S = \int_{l_1}^{l_2} dl \int_{-H_R}^{\eta} dz \quad (13)$$

где l_1, l_2 - пределы открытой границы по горизонтали; $\tilde{u}_{G_0}^{normal}$ - нормальная составляющая скорости течений глобальной модели в узлах глобальной модели.

Алгоритм расчета заключался в следующем. Пусть $[t_n, t_m]$ - период времени, на который предполагается делать прогноз (n, m - номер дня), т.е. t_n - начальный момент прогноза. За начальный момент времени расчета принимается момент времени t_{n-1} , за сутки до начала времени прогноза, т.е. в качестве начальных значений температуры, солености, уровня моря и скорости в прибрежной модели принимались интерполированные в узлы сетки прибрежной модели значения соответствующих параметров глобальной модели в начальный момент времени t_{n-1} . И затем проводился расчет до момента времени t_m (рис.8). Это дает возможность согласования

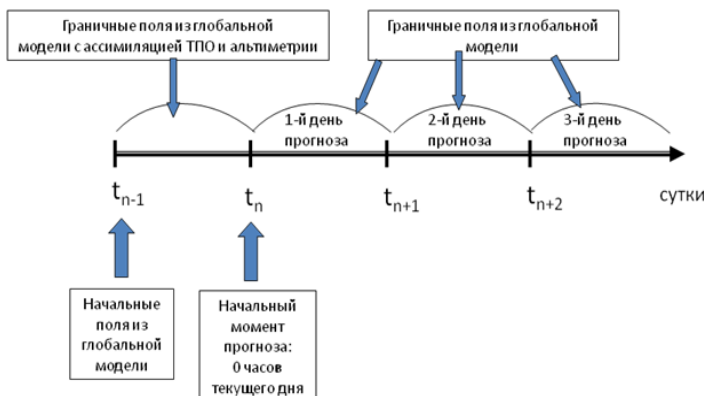


Рис.8.Схема алгоритма расчета

рассчитываемых по локальной модели полей до момента начала прогноза, поскольку возмущения от границы, ввиду малости прибрежной расчетной области, успевают за сутки пройти всю область. Кроме того, период времени в одни сутки, предвещающий начальный момент прогноза, был выбран оптимальным, исходя из требований ограниченности времени прогно-стического расчета, а также из результатов серии численных экспериментов, которые показали, что увеличение этого периода до 3-х суток незначительно влияло на распределение гидрофизических полей в начальный момент прогноза t_n . В течение расчета в локальную модель из глобальной модели с заданной дискретностью передавались данные для определения параметров на жидкой границе раздела в соответствии с процедурой, описанной выше, а также с помощью билинейной интерполяции данные о напряжении ветра, потоках тепла, осадках и испарении на поверхности выбранной области. На каждый расчетный момент времени граничные значения получались путем линейного интерполирования с использованием соседних во времени значений.

В подразделе 4.3 описываются тестовые расчеты, проведенные с целью оценки эффективности применяемой технологии вложенных сеток, а также способности локальных моделей воспроизводить известные черты и особенности прибрежной циркуляции в Черном море. Полученные результаты моделирования сопоставляются со спутниковыми данными. При проведении расчетов для задания атмосферного воздействия использовались данные реанализа Национальных Центров Предсказания Окружающей Среды (National Centers for Environmental Prediction – NCEP) и Национального Центра Изучения Атмосферы (National Center for Atmospheric Research – NCAR) с 6-часовой дискретностью. С этой же дискретностью передавались данные из глобальной модели в региональные. На рис.9 приведено распределение температуры поверхности моря (ТПМ) в Каламитском заливе, рассчитанное по модели (шаг по пространству ~ 600 м, 20 σ -уровней) и полученное со спутника “MODIS-Terra” на один и

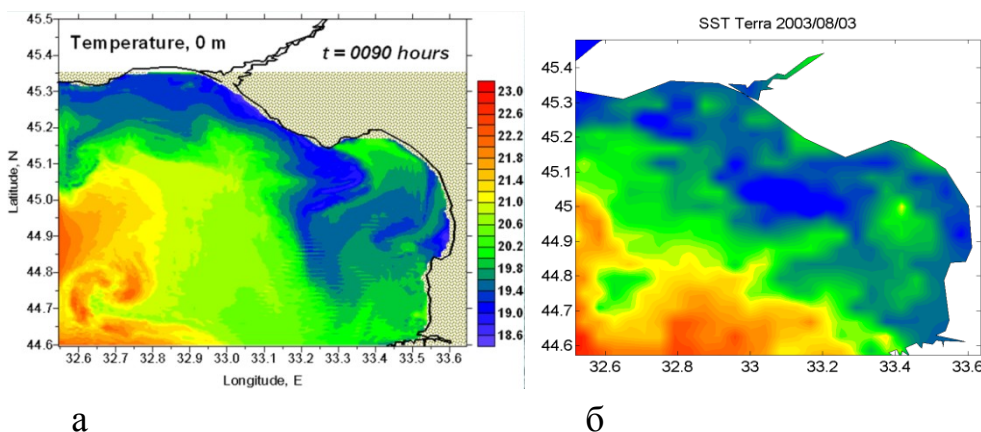


Рис. 9. Температура поверхности моря, рассчитанное по модели (а) и полученное со спутника “MODIS-Terra” (б).
(Снимки любезно предоставлены Станичным С.В.)

тот же момент времени. Видно достаточно хорошее соответствие обеих картин. Для модели циркуляции в прибрежной области России соотношение шагов по пространству в глобальной и региональной моделях составляло 1:4, так что шаг равнялся ~ 1200 м, использовалось 25 σ -уровней. В качестве примера на рис.10 приведены рассчитанные карты распределения уровня моря, солености и скоростей течений на глубине 200 м на восьмые сутки после начала расчета, соответствующего 07.06.2003 г. На всех рисунках отчетливо проявляется антициклонический вихрь в южной части акватории. В поле скорости на глубине 200 м, кроме этого вихря, наблюдается также наличие антициклонических вихрей более малых

масштабов у северной границы и на юго-востоке области. В самом юго-восточном углу наблюдается циклоническое образование. На рис.11 приведен спутниковый снимок температуры поверхности моря, полученный в этот период времени. На снимке четко виден антициклонический вихрь, северная половина которого находится в пределах нашей области. Более того, к юго-востоку от него наблюдается грибовидное динамическое образование, ветви которого с противоположной завихренностью как раз попадают в юго-восточный угол рассматриваемой области. Следует отметить, что, просматривая непрерывную серию спутниковых снимков за весь расчетный период, можно отчетливо наблюдать вдольбереговой перенос, направленный на северо-восток.

В подразделе 4.4 описывается проведенный в период с 22.07 по 27.07 2005 г. пилотный эксперимент по оперативному функционированию описанной системы морских прибрежных прогнозов. При задании атмосферного воздействия использовались с дискретностью 2 часа данные региональной атмосферной модели ALADIN Национальной метеорологической администрации Румынии. Необходимая информация из глобальной модели поступала в каждую прибрежную модель с такой же дискретностью. Ежедневно в течение эксперимента впервые для региона Черного моря в

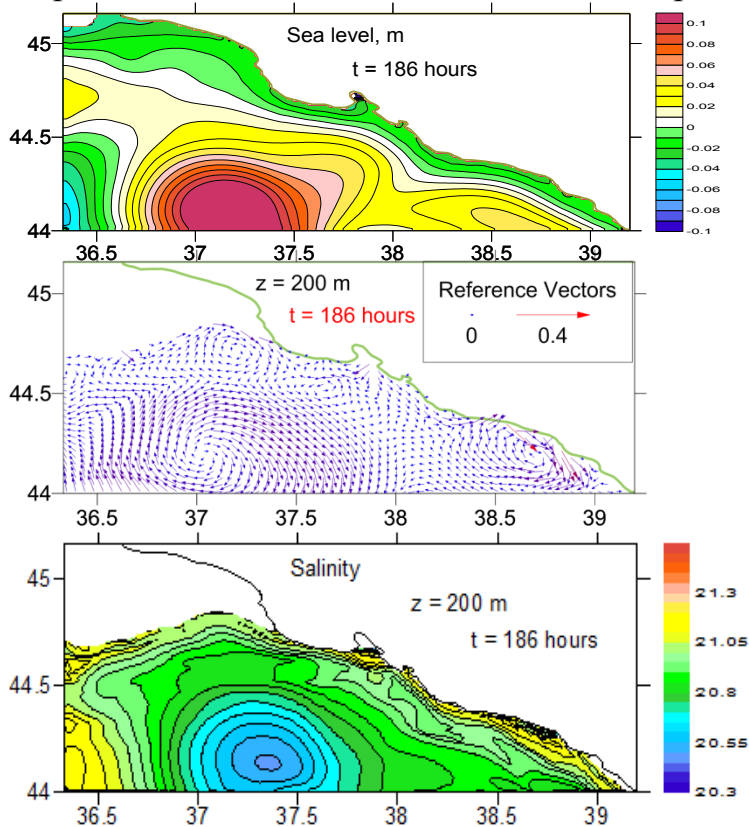


Рис.10. Уровень моря (а); скорости течений (м/сек) (б) и соленость (в) на глубине 200 м

интернете на специальный веб-сайт www.arena.mhi.net.ua выставлялся двух-дневный прогноз метеорологических и гидрологических параметров как для всего бассейна, так и для 6 прибрежных районов моря. Проведенный эксперимент продемонстрировал

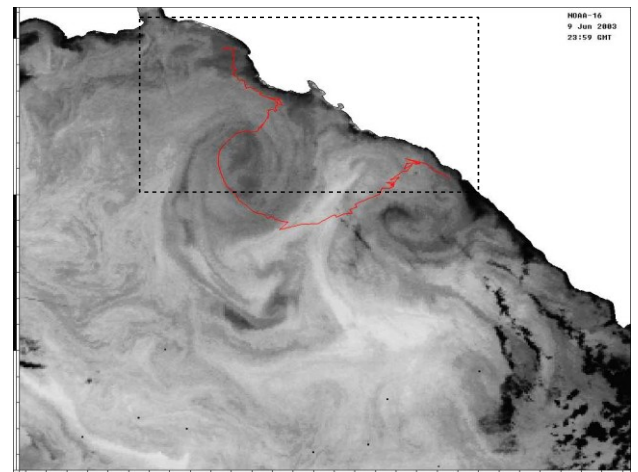


Рис.11. Снимок ТПМ моря 09.06.2003г. со спутника NOAA-16.

Прямоугольником отмечена область расчета.

возможность функционирования разработанной системы прибрежных прогнозов в оперативном режиме и получил высокую оценку со стороны Управляющего Комитета проекта «Глобальная океаническая наблюдательная система Черного моря» (ГОНСЧМ) - Black Sea GOOS и Черноморского регионального Комитета Межправительственной

океанографической комиссии ЮНЕСКО (BSRC IOC UNESCO). Результаты расчетов показали удовлетворительное соответствие с данными дистанционного зондирования.

В *подразделе 4.5* описано дальнейшее развитие Черноморской оперативной системы морских прибрежных прогнозов, которое она получила в рамках Европейских программ FP6 “European COastal-shelf sea OPerational observing and forecasting system” (ECOOP), направленной на создание систем прибрежных морских прогнозов в окружающих Европу морях, и FP7 “MyOcean”. Эклектичный дизайн Черноморской системы, состоящий из набора разнородных моделей, создавал естественные при этом сложности при подготовке необходимых данных, анализе и сопоставлении результатов расчета. Поэтому дальнейшее развитие система получила, прежде всего, в направлении унификации используемых прибрежных моделей. В качестве базовой модели была выбрана разработанная версия σ -координатной модели, которая описана в разделе 2. Была также модифицирована конфигурация расчетных прибрежных областей. Число этих областей уменьшилось, однако суммарная площадь покрытия акватории увеличилась. На рис.12 приведена карта Черного моря с указанием расчетных областей и числа узлов по горизонтали для каждой области. Были также унифицированы шаг по горизонтали и число расчетных уровней по вертикали. Для всех моделей шаг по горизонтали равнялся 1/5 шага глобальной модели, т.е. около 1 км. По вертикали использовалось 18 σ -уровней, а именно: 0, -0.004, -0.009, -0.013, -0.022, -0.034, -0.046, -0.058, -0.079, -0.110, -0.171, -0.268, -0.366, -0.463, -0.561, -0.780, -0.902, -1. На открытых жидких границах использовались краевые условия (6)-(11) с коррекцией согласно формулам (12),(13). Прибрежные модели были инсталлированы в организациях причерноморских стран: модель, обозначенная на рис.14 буквами **BT** - в Институте океанологии в г. Варна, Болгария; модель **Ro** - в Национальном институте морских исследований и развития им. Г.Антипа в Констанце, Румыния; модель **Cr** – в Морском гидрофизическом институте в г. Севастополь, Россия; модель **Ru** – в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова» в Москве. Следует отметить, что для акватории у побережья Грузии по желанию грузинских океанографов в оперативном режиме в системе была оставлена модель в z -координатах (Kordzadze A.A., Demetrashvili D.I., 2008), использовавшаяся в пилотной версии системы. Однако, региональная прибрежная модель в σ -координатах **Ge** была дополнительно инсталлирована в Севастополе на сервере МГИ и могла быть запущена при необходимости, например, в случае сбоя в системе интернет-связи.

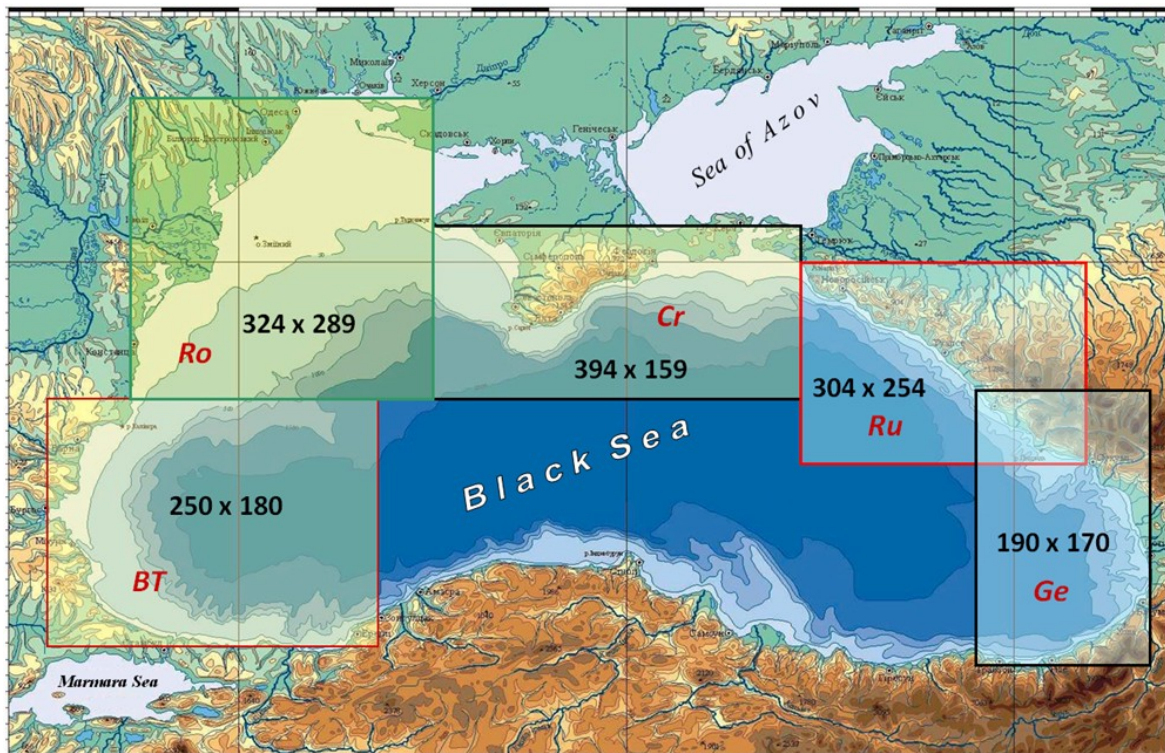


Рис.12. Расчетные области региональных прибрежных моделей с указанием числа узлов по горизонтали. Красными буквами показаны условные обозначения моделей.

Функционирование системы происходит следующим образом. Оперативная крупномасштабная модель, описанная в разделе 1 и лежащая в основе системы диагноза и прогноза состояния всего бассейна Черного моря, обеспечивает необходимыми данными для задания начальных и граничных условий все 5 прибрежных локальных моделей. Глобальная модель использует данные региональной атмосферной модели ALADIN Метеорологической Администрации Румынии (NMA) или модели SKIRON (Греция) в качестве атмосферного воздействия и ассимилирует спутниковую поверхностную температуру, климатические профили температуры и солености, а также спутниковые альтиметрические данные. После осуществления глобального прогноза, данные атмосферного воздействия, начальные и граничные условия автоматически подготавливались для каждой прибрежной области и выгружались на FTP-сервер МГИ. Начальные данные соответствовали моменту времени за сутки до текущего времени, атмосферное воздействие и граничные данные с 3-х часовым интервалом покрывали срок в 4 дня, включая день диагноза за сутки до текущего момента времени. Региональные операторы в указанных океанографических организациях причерноморских стран обеспечивали выгрузку этих данных и запуск своих прибрежных моделей, осуществляя однодневный диагноз и трехдневный прогноз трехмерных полей температуры, солености и скорости течений в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис.8. Результаты прогноза накапливались на сервере Института морских наук в Эрдемли, Турция, и передавались на сервер EuroMISS (EUROpean Marine Information System of Systems) проекта ECOOP. Пользователи имели свободный доступ к результатам прогноза на веб-сайте проекта, при этом программные средства EuroMISS позволяли построить распределение параметра на заданной глубине или разрезе, а также создать анимацию. В режиме реального времени Черноморская система морских прибрежных прогнозов начала функционировать с начала 2009 г. В рассматриваемом подразделе приводятся примеры прогностических расчетов.

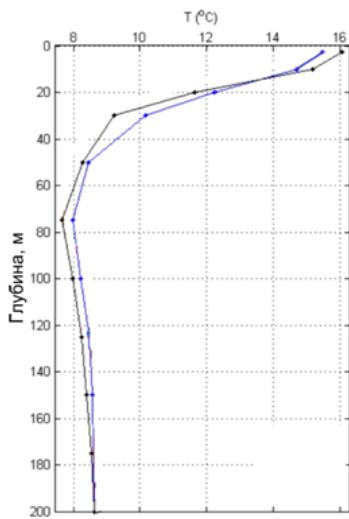


Рис.13. Измеренный (черный) и рассчитанный (синий) профили температуры. Координаты станции: 44.0°N, 34.4°E; дата: 18.05.2007г.

Важной составной частью любой системы прогнозов является валидация результатов расчета, призванная отслеживать качество прогностических продуктов и вырабатывать рекомендации по его улучшению. В режиме реального времени валидация выполнялась посредством сопоставления результатов моделирования с полями температуры поверхности моря, полученной по спутниковым данным. В отсроченном режиме времени валидация трехмерных полей температуры и солёности проводилась на основе данных зондирования, выполненных во время гидрологических съемок, а также данных измерений с дрейфующих буев. На рис.13 представлен пример сопоставления измеренного профиля температуры с модельным на время прогноза 13.5 часов в ближайшем к станции расчетном узле. Разница между наблюдением и моделью не превышает 0.5°C для большинства глубин. Наибольшее отклонение наблюдается в сезонном термоклине, где вертикальные градиенты температуры максимальны и даже небольшое возмущение в положении изотермы дает значительный вклад в величину температуры на данном

горизонте. Хорошее соответствие между наблюдениями и моделью обычно имеет место во время прогрева верхних слоев моря в начале мая, а также в начале их выхолаживания в сентябре-октябре. На рис. 14 приведен профиль солёности для времени прогноза около 2.5 суток. Наибольшие отклонения имеют место в слое 150-300 м, наименьшие, около 0.2 ppt, в верхнем 100-метровом слое. В режиме реального времени валидация ТПМ выполнялась на основе сопоставления со спутниковыми данными NOAA/AVHRR. Для сопоставления отбирались карты ТПМ, максимально свободные от облачности, которые сравнивались с ближайшими во времени одно-, двух- и трехдневными прогностическими картами распределения ТПМ. Прогностическая и спутниковая карты ТПМ для области **ВТ**, а также карта их разности приведены на рис.15. В этом примере стандартное отклонение равно 0.41°C , среднее отклонение равно -0.4°C . В каждую из локальных прибрежных моделей включен блок расчета пассивной примеси, основанный на решении уравнения (5). В случае необходимости он может быть активирован и, после задания распределения концентрации примеси в начальный момент времени, также в оперативном режиме будет производиться трехдневный прогноз распространения примеси по акватории моря. Такой блок может быть полезен при необходимости оперативной оценки путей распространения загрязнений в результате аварий или несанкционированных выбросов в море загрязняющих веществ. Решение о включении такого блока в локальные модели системы прибрежных прогнозов было принято после произошедшей в середине ноября 2007 года

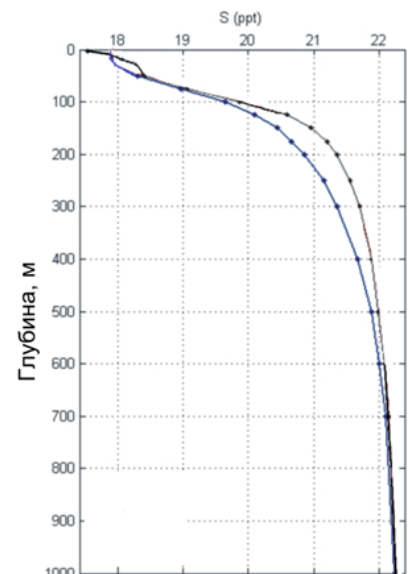


Рис.14. Измеренный (черный) и рассчитанный (синий) профили солёности для станции с координатами 44.4°N, 35.2°E; дата 24.07.2007г.

крупнейшей техногенной катастрофы в Керченском проливе. На рис.12 видно, что исключительную 200-мильную экономическую зону Украины покрывают две расчетных области: **Ro** и **Cr**.

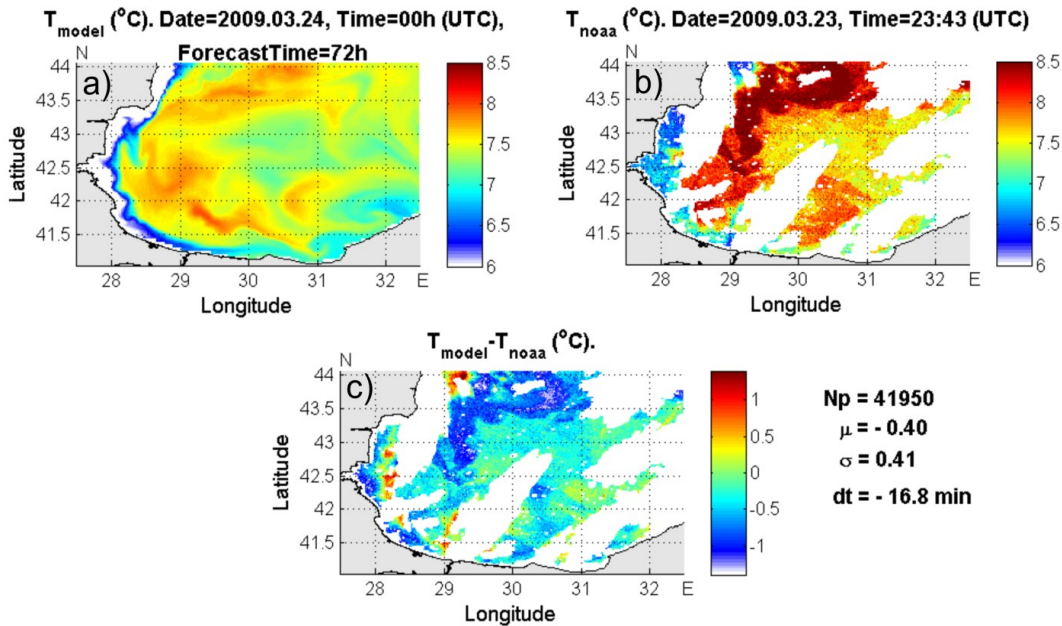


Рис.15. Модельная (a) и спутниковая (b) температура поверхности моря и их разность (c) на 24 марта 2009 г. в области **BT**. Период прогноза 3 суток. N_p - число пикселей на снимке, μ - среднее отклонение, σ - среднеквадратичное отклонение, dt - разность модельного времени и времени получения спутникового снимка

Поскольку соответствующие локальные модели установлены в разных организациях, расположенных в разных государствах, то, несмотря на то, что необходимые данные для

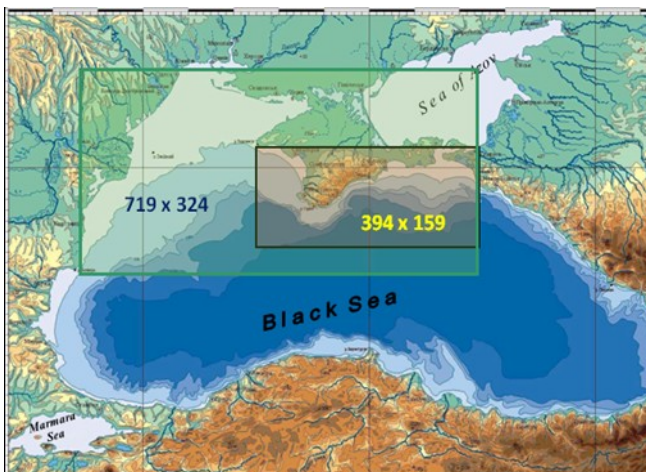


Рис.16. Первоначальная и расширенная области прибрежной модели, включающей исключительную экономзону Украины, с указанием числа узлов по горизонтали

покрывает практически всю исключительную экономическую зону Украины (рис.16). Локальная прибрежная модель для указанной акватории входит в состав модернизированной системы диагноза и прогноза Центра морских прогнозов МГИ, отличающейся от предыдущей по составу передаваемых данных, их форматам и интерфейсам передачи информации. На рис.17 приведен примеры результатов расчета в расширенной области. Результаты прогноза в оперативном режиме выставляются на

всех локальных моделей подготавливаются одновременно, имеет место расхождение во времени получения результатов прогноза и анализа. Это обусловлено не только разной размерностью расчетных сеток моделей, но также разной производительностью используемых каналов связи, компьютерной техники и других объективных и субъективных причин. И хотя такое расхождение во времени часто может быть не критичным, представляется более целесообразным получать прогноз состояния вод во всей исключительной экономической зоне Украины одновременно. Исходя из этого, область **Cr** была значительно расширена и теперь

веб-сайте: <http://www.innovation.org.ua>. На рис.18 представлен пример сопоставления рассчитанной прогностической температуры морской воды в этой прибрежной области с измеренной с помощью буя–профилера ARGO вдоль траектории его дрейфа в течение почти полугодового периода: с 13 января по 6 июня 2012 г. для интервала модельного прогноза 67 – 69 часов.

В подразделе 4.6. описывается разработанная система тренировок по моделированию циркуляции в бассейне Черного моря. Для эксплуатации систем морских прогнозов, включающих подготовку необходимых данных, запуск системы, анализ результатов прогноза, необходимую модернизацию и пр., требуются кадры, обладающие специальными навыками и соответствующим уровнем подготовки. Одним из множества разделов оперативной океанографии, которые включены в сложный конгломерат системы морских прогнозов, является использование математических моделей циркуляции. В рамках европейского проекта EU FP6 ASCABOS (A Supporting Programme for Capacity Building in the Black Sea Region towards Operational Status of Oceanographic Services) была разработана система тренировок по моделированию циркуляции вод в Черном море и его прибрежных районах. Одной из основных целей проекта, работы по которому были направлены на углубление знаний общественности о методах, средствах и возможностях оперативной океанографии, являлось увеличение ресурсных возможностей посредством создания и модернизации коммуникаций между

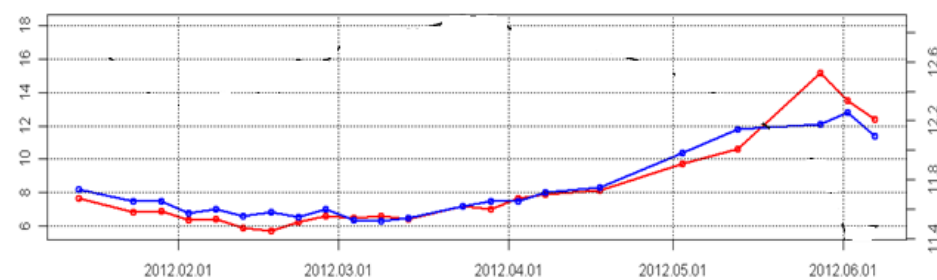


Рис.18.Изменение со временем прогностической (красный) и измеренной (синий) температуры воды в пределах второго σ -слоя модели вдоль траектории буя–профилера ARGO №6900805

Черноморскими странами и обучение молодых ученых и конечных пользователей. Для достижения этой цели и была создана система тренировок по моделированию циркуляции. Тренинги состояли из теоретической части, включающей научные лекции по основам динамики Черного моря, средствам и методам оперативной океанографии, управлению данными, особенностям применения отобранных моделей циркуляции, и практических занятий. Особенностью разработанной системы является её практическая часть, которая основана на использовании версии σ -координатной модели общей циркуляции Черного моря, описанной в разделе 2, и методики построения локальных σ -координатных моделей с применением метода вложенных сеток, описанной в разделе 3. Участники тренинга после прослушивания теоретической части получали практические навыки по использованию моделей циркуляции для решения задач диагноза и прогноза состояния вод, как во всем море, так и более подробно, т.е. с высоким разрешением, в отдельных её акваториях. Практические занятия включают в себя: работу с данными, состоящую из поиска необходимых данных, подготовки данных для инициализации модели, для

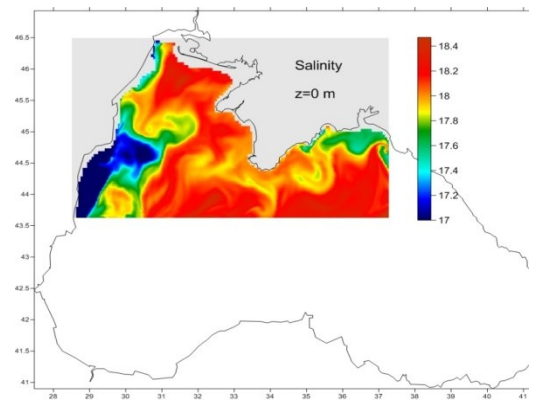


Рис.17 Пример расчета 3-х дневного прогноза поверхностной солёности (‰) в расширенной локальной области

задания граничных условия и ассимиляции; работу с моделями, включающую в себя инсталляцию двух моделей в σ - координатах: глобальной модели Черного моря и локальной модели, причем алгоритм и программа позволяют стажеру инсталлировать локальную модель с высоким разрешением для произвольной прямоугольной области в любой части Черного моря; проведение расчетов в разных режимах: диагностическом, прогностическом, с ассимиляцией и без ассимиляции данных; и визуализацию результатов расчетов. На основе разработанной системы было проведено пять тренировочных курсов, в том числе два тренинга в Остенде, Бельгия, при поддержке Проектного Офиса по Международному обмену океанографическими данными Межправительственной океанографической Комиссии ЮНЕСКО (IOC Project Office for IODE). В курсах принимали участие стажеры из всех шести причерноморских стран, а также из Перу.

ВЫВОДЫ

Общность и связанность рассмотренных задач проистекает из их оперативных приложений к единому объекту – Черному морю. Полученные результаты можно рассматривать в качестве нового решения задачи оперативной океанографии Черного моря в части использования моделирования динамики процессов разной природы при комплексной разработке и развитии систем диагноза и прогноза состояния морской среды и распространения загрязнений в море. Основные результаты проведенных исследований могут быть сформулированы в следующем виде:

1. На основе моделей переноса и диффузии, инкорпорированных в оперативную численную модель циркуляции Черного моря:

- восстановлен сезонный ход фоновое пространственное распределение эмульсионно-растворенной фракции углеводородов с учетом химико-биологических процессов их окисления в аэробной зоне Черного моря. По результатам расчетов выявлено пространственно-временное распределение экстремальных величин концентрации углеводородов в море, а также исследована роль отдельных фракций в сезонном ходе среднего суммарного вертикального распределения углеводородов;

- проведены оценки степени распространения цезия-137 в поверхностном слое Черного моря в первый год после черновыльской аварии. Показано, что высокие значения концентрации цезия-137 вблизи юго-западного берега Крыма имели место в течение трех месяцев, а повышение содержания радионуклидов в западной части моря осенью 1986 г. вызвано переносом более загрязненных вод из северо-восточной части моря. По результатам расчетов получена оценка первоначального уровня концентрации радионуклида в море, который мог достигать значений 1800-2100 Бк/м³.

2. На основе балтийской системы SeaTrackWeb и оперативной модели циркуляции МГИ впервые создана оперативная система прогноза распространения нефтяных разливов в Черном море BlackSeaTrackWeb (BSTW). Назначение системы BSTW-обеспечение мероприятий по повышению экологической безопасности Черного моря и по спасению на водах. Система доступна через сеть интернет, обеспечивает мгновенный доступ к данным последних морских прогнозов и функционирует круглосуточно. При расчетах учитываются почти все физические процессы, определяющие эволюцию нефтяного пятна (эмульгирование, седиментация, испарение, погружение, вязкость, поверхностное натяжение и др.). Система предоставляет

возможность расчета траекторий переноса морскими течениями различных плавающих объектов и поддерживает функцию отслеживания к исходному состоянию (backtracking). Продемонстрирована удовлетворительная работоспособность системы BSTW в приложении к реальным ситуациям.

3. Исследовано влияние распределяющего эффекта речного стока во время весеннего половодья на формирование стратификации и циркуляции вод в северо-западной части Черного моря. По результатам расчетов детально описана динамика и структура зоны распреденения в процессе воздействия речного стока и после его прекращения, а также процесс образования и эволюции антициклонического вихря в районе устья Дуная, обусловленный речным стоком. Выявлены особенности вертикальной циркуляции вод близ устьев рек. Показано, что влияние рельефа дна на циркуляцию в рассматриваемом регионе обуславливает лишь возникновение компенсационного потока соленой воды через южную открытую границу рассматриваемой акватории, тогда как стратификация вод приводит к появлению обоих отмеченных элементов циркуляции — и антициклонического вихря и компенсационного потока.

4. Выполнена реконструкция климатического сезонного хода гидрофизических полей Черного моря на основе адаптированной к физико-географическим условиям Черного моря версии σ -координатной модели Принстонского университета с ассимиляцией климатических полей температуры и солености и корректной интерполяцией среднемесячных климатических данных об атмосферном воздействии. Проведен анализ восстановленной климатической изменчивости термохалинной структуры и динамики вод моря. Результаты расчетов были использованы при проведении реанализа и внедрены в оперативную систему диагноза и прогноза состояния Черного моря Черноморского центра морских прогнозов для использования в алгоритме ассимиляции альтиметрических данных.

5. Впервые для Черного моря проведен ретроспективный анализ его состояния более чем за 20-летний период времени с 1971 по 1993 год. Результаты расчетов позволили описать реальную сезонную и межгодовую изменчивость термохалинных и динамических характеристик Черного моря за рассматриваемый период и выявить различные тенденции в их долговременной эволюции.

6. На основе результатов реанализа детально рассмотрены процессы формирования холодного промежуточного слоя и исследованы механизмы, ответственные за эти процессы, в периоды чередования атмосферного воздействия: аномально теплой зимы 1980 – 1981 гг., нормальной зимы 1987 – 1988 гг. и холодной зимы 1992 – 1993 гг.

7. Исследовано влияние оптических свойств воды на динамику и стратификацию верхних слоев Черного моря на основе версии σ -координатной модели и корректной параметризации процессов поглощения и рассеяния света основными оптически активными компонентами в Черном море. Получены количественные оценки вклада оптического состояния моря в его гидродинамический режим в 15-летний период конца XX столетия, в течение которого оптические свойства Черного моря претерпевали значительные изменения. Результаты проведенного исследования внедрены в оперативную модель системы диагноза и прогноза состояния Черного моря Черноморского центра морских прогнозов.

8. С помощью σ - координатной модели циркуляции проведены сценарные расчеты распространения техногенного загрязнения в результате аварии в Ласпинской бухте.

Исследована зависимость ареала аварийного загрязнения в акватории моря у Южного берега Крыма от направления ветров.

9. На основе данных гидрологической съемки и σ - координатной модели циркуляции проведены диагностические расчеты скоростей течений в Балаклавской бухте и распространения загрязнений от источников, расположенных на берегах бухты. Благодаря высокому пространственному разрешению детализирована трехмерная картина течений в бухте и выявлены особенности распространения загрязнений от каждого берегового источника.

10. Впервые разработана и создана оперативная система морских прибрежных прогнозов Черного моря на основе набора локальных σ -координатных моделей. Компоненты системы установлены в причерноморских странах. Дополнительно разработана расширенная, покрывающая всю исключительную 200-мильную экономическую зону Украины, локальная прибрежная модель с высоким разрешением, которая включена в состав системы диагноза и прогноза Центра морских прогнозов МГИ. Результатом функционирования Черноморской оперативной системы морских прибрежных прогнозов является однодневный диагноз и трехдневный прогноз трехмерных полей температуры, солености и скорости течений в соответствующем прибрежном районе моря.

11. Разработана система тренингов по моделированию циркуляции вод в Черном море и его прибрежных районах. Особенностью системы является использование версии σ -координатной модели общей циркуляции Черного моря в разных режимах и методики построения локальных σ -координатных моделей с применением технологии вложенных сеток.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет / [Богуславский С.Г., Иванов В.А., **Кубряков А.И.** и др.]; под ред. Еремеева В.Н. – Севастополь: МГИ НАН Украины), 2004. – С. 375–392. – (Глава 12. Региональные исследования).

2. Black Sea GOOS Strategic Action and Implementation Plan / [Bilashvili K., Cordoneanu E., **Kubryakov A.** et all.] – GOOS Report, 133 (IOC/INF–1176). UNESCO: Paris. 63; March 2003, II annexes. –2003. – 75 p.

3. Моделирование распресняющего эффекта речного стока во время весеннего половодья на северо–западном шельфе Черного моря / В.А. Иванов, **А.И. Кубряков**, Э.Н. Михайлова, Н.Б. Шапиро // Известия РАН, ФАО. – 1996. – Т. 32, N 1. – С. 152–160.

4. **Кубряков А.И.** Океан – наследие будущего / **Кубряков А.И.**, Суворов А.М. // Керчь: Рыбное хозяйство Украины. – 1998. – № 1. – С. 3–8.

5. Демышев С.Г. Эволюция поля концентрации долгоживущих радионуклидов в Черном море после прохождения чернобыльского облака / Демышев С.Г., Запелалов А.С., **Кубряков А.И.**, Чудиновских Т.В. // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 10. – С. 49–61.

6. Дорофеев В.Л. Мониторинг динамики и экосистемы Черного моря на основе спутниковых технологий. Космічні дослідження в Україні. 2004–2006 / Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К., **Кубряков А.И.** и др.; под ред. О.П. Федоров. // Національне космічне агенство України. – Київ, 2006. – С. 29–40.

7. Коротаев Г.К. Национальный модуль черноморских прогнозов как элемент европейской системы / Коротаев Г.К., Ратнер Ю.Б., **Кубряков А.И.** и др. // Наука та інновації. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 5–10.
8. Коротаев К. Оперативная система диагноза и прогноза состояния Черного моря с усвоением спутниковой информации / Коротаев К., Дулов В.А., **Кубряков А.И.** и др. // Космічні дослідження в Україні 2010–2012. – 2012. – С. 87–96.
9. Ратнер Ю.Б. Использование данных измерений с дрейфующих буев SVP–BTC и ARGO для валидации результатов прогноза температуры воды в прибрежной области Черного моря / Ратнер Ю.Б., **Кубряков А.И.**, Холод А.Л. и др. // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 5. – С. 33–48.
10. **Kubryakov A.I.** Black Sea coastal forecasting system / **Kubryakov A.I.**, Korotaev G.K., Dorofeev V.L. и др. // Ocean Sci., 2012, 8, p. 183–196, doi:10.5194/os-8-183-2012.
11. Boguslavsky S.G. Variations of the Black Sea Level / Boguslavsky S.G., **Kubryakov A.I.**, Ivashchenko I.K. // Physical Oceanography. – 1998. – Volume 9, No. 3. – P. 199–208.
12. Mikhailova E.N. Distinctive features of circulation of waters in the region of the Zmeiny Island under the action of winds of various directions / Mikhailova E.N., Ivanov V.A., **Kubryakov A.I.**, Shapiro N.B. // Physical Oceanography. – 2000. – Volume 10, Issue 4. – P. 305–311.
13. Stefanescu S. Ocean wave and circulation modeling at NIMH Romania / Stefanescu S., Cordoneanu E., **Kubryakov A.** // Romanian Journal of Meteorology. – 2004. – Vol. 6, No.1–2. – P. 75–88.
14. Konovalov S.K. Parametrization of the Biochemical Processes of Oxidation and Numerical Modeling of the Seasonal Behavior of the Distribution of Oil Hydrocarbons in the Aerobic Zone of the Black Sea / S.K. Konovalov, **A.I. Kubryakov**, S.G. Demyshev // Physical Oceanography. – 2004. – Vol. 14, Issue 1. – P. 27–41.
15. **Kubryakov A.I.** Modeling of Circulation and Propagation of Contaminating Impurities in the Balaklava Bay. / **Kubryakov A.I.**, Popov M.A. // Physical Oceanography. – 2005. – Volume 15, Issue 3. – P. 180–191.
16. Demyshev S. The MyOcean Black Sea from a scientific point of view / Demyshev S., Knysh V., **Kubryakov A.** et all. // Mercator Ocean Quart. Newslet. – 2010. – 39. – P. 16–24.
17. Dorofeev V. The MyOcean Black Sea coupling of dynamics and ecosystem / Dorofeev V., Oguz T., **Kubryakov A.** et all. // Mercator Ocean Quarterly Newsletter No. – 2011. 40 – January 2011. – P. 26–35.
18. Knysh V.V. Seasonal and interannual variability of Black Sea hydrophysical fields reconstructed from 1971–1993 reanalysis data / Knysh V.V., Korotaev G.K., Moiseenko V.A., **Kubryakov A.I.** et all. // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2011. – Vol. 47, no. 3. – P. 399–411.
19. Korotaev G.K. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system / Korotaev G.K., Oguz T., **Kubryakov A.I.** et all. // Ocean Sci. – 2011. – 7. – P. 629–649, doi:10.5194/os-7-629-2011.
20. Korotaev G.K. Study of formation process of cold intermediate layer based on reanalysis of Black Sea hydrophysical fields for 1971–1993 / Korotaev G.K., Knysh V.V., **Kubryakov A.I.** // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – January 2014. – Vol. 50, Iss. 1. – P. 35–48.
21. Иванов В.А. Формирование и эволюция вихревых образований, обусловленных стоком рек на северо-западном шельфе Черного моря / Иванов В.А., **Кубряков А.И.**,

Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. // Исследования шельфовой зоны Азово–Черноморского бассейна. – Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика», 1995. – С. 147–167.

22. Шапиро Н.Б. Разработка региональных гидротермодинамических моделей как элемента моделей экосистем Черного моря. Разработка региональных гидротермодинамических моделей как элемента моделей экосистем Черного моря / Шапиро Н.Б., **Кубряков А.И.**, Иванов В.А., Михайлова Э.Н. [под ред. Еремеева В.Н.] // Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суша–море. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 1997. – С. 12.

23. Еремеев В.Н. Расчет распространения техногенного загрязнения у Южного берега Крыма в результате аварии в Ласпинской бухте / Еремеев В.Н., **Кубряков А.И.**, Щипцов А.А. // Глобальная система наблюдений Черного моря: фундаментальные и прикладные аспекты. – Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2000. – С. 45 – 55.

24. **Кубряков А.И.** О механизме реализации годового хода гидрофизических полей океана / **Кубряков А.И.** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2001. – Т. 5. – С. 61–71.

25. Демышев С.Г. Анализ формирования и трансформации поля ^{137}Cs в Черном море после аварии на ЧАЭС / Демышев С.Г., Запелалов А.С., **Кубряков А.И.**, Чудиновских Т.В. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2001. – Вып. 4. – С. 28–34.

26. Еремеев В.Н. Глобальная океаническая система наблюдений Черного моря: научные стратегия и дизайн / Еремеев В.Н., Коротаев Г.К., **Кубряков А.И.** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2003. – Вып. 2(7). – С. 5–17.

27. **Кубряков А.И.** Применение технологии вложенных сеток при создании системы мониторинга гидрофизических полей в прибрежных районах Черного моря / **Кубряков А.И.** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2004. – Вып. 11. – С. 31–50.

28. Кныш В.В. Восстановление климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе модели в σ – координатах с использованием ассимиляции данных о температуре и солености / Кныш В.В., **Кубряков А.И.**, Инюшина Н.В., Коротаев Г.К. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. – Вып. 16. – С. 243–265.

29. Тенденции в изменчивости термohалинных и динамических характеристик Черного моря, выявленные по результатам реанализа за период 1985–1994 гг. / В.В. Кныш, **А.И. Кубряков**, В.А. Моисеенко и др. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. – Вып. 16. – С. 279–290.

30. Баянкина Т.М. Структура и результаты опытной эксплуатации многокомпонентной системы диагноза и прогноза динамики Черного моря / Баянкина Т.М., Иванчик М.В., **Кубряков А.И.** и др. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: «ЭКОСИ–Гидрофизика», 2009. – Вып. 19. – С. 182–188.

31. Моисеенко В.А. Межгодовая изменчивость термохалинных и динамических характеристик Черного моря по результатам реанализа за период 1971–1993 гг. / Моисеенко В.А., Коротаев Г.К., Кныш В.В., **Кубряков А.И.** и др. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2009. – Вып. 19. – С. 216–227.

32. **Кубряков А.И.** Результаты экспериментальных и теоретических исследований динамики вод и распространения загрязняющих веществ в Балаклавской бухте / **Кубряков А.И.**, Ломакин П.Д., Попов М.А. // Вестник Гидрометцентра Черного и Азовского морей. Одесса, 2011. – №2, (13). – С. 88–103.

33. Григорьев А.В. Антициклонический вихрь рингового типа на свале глубин северо-западной части Черного моря / Григорьев А.В., Иванов В.А., **Кубряков А.И.**, Шапиро Н.Б. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2001. – Вып.3. – С. 57–61.

34. Коротаев Г.К. Сопоставление данных оперативного прогноза гидрофизических полей Черного моря с данными наблюдений на морских и береговых станциях метеорологической службы Украины / Коротаев Г.К., Ратнер Ю.Б., **Кубряков А.И.** и др. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2011. – Вып. 24. – С. 244–258.

35. **Кубряков А.И.** Влияние оптических свойств воды на динамику верхних слоев Черного моря в период с 1985 до 2001 гг. / **Кубряков А.И.**, Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Коротаев Г.К. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2012. – Вып. 26. – Т. 2. – С. 224–255. (ISSN 1726–9903).

36. Коротаев Г.К. Архитектура и результаты работы Международного Черноморского центра морских прогнозов, созданного на базе МГИ НАН Украины в рамках проекта Европейского Союза "Мой Океан" / Коротаев Г.К., Демышев С.К., **Кубряков А.И.** и др. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2013. – Вып. 27. – С. 128 – 133.

37. Коротаев Г.К. Итоги развития Экспериментального Центра морских прогнозов МГИ НАН Украины в 2011–2013 гг. / Коротаев Г.К., **Кубряков А.И.**, Баянкина Т.М. и др. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2013. – Вып. 27. – С. 134 – 138.

38. **Kubryakov A.** Short comparison oil spill drift forecasting systems. Permanent Secretariat of the Commission on Protection of the Black Sea Against Pollution. / **Kubryakov A.**, Korotayev G. // MONINFO Project, Istanbul, Turkey, 2011. – P. 8.

39. Korotayev G. K. Identifying sources of pollution in the Black Sea. The Growing Use of GMES across Europe's Regions / Korotayev G. K., **Kubryakov A. I.**, Thoorens F. // X.NEREUS–ESA joint publication., 2012. – P. 92–93, (<http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/NEREUS/>).

40. Korotayev G. Near Operational Black Sea nowcasting/forecasting system. European Operational Oceanography: Present and Future / Korotayev G., Cordoneanu E., **Kubryakov A.** et all. [eds. H. Dahlin, N. C. Flemming, P. Marshand and S. E. Petersson.] // Proceedings of the

Fourth EuroGOOS International Conference on EuroGOOS, 6–9 June 2005: Brest, France, ISBN 92–894–9788–2, 2006. – P. 269–275.

41. Dorofeyev V. Long term evolution of physics and ecosystem of the Black Sea. Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges / Dorofeyev V., Oguz T., **Kubryakov A.** et all. // Proceedings of the Fifth International Conference on EuroGOOS, 20–22 May 2008: Exeter, UK. EuroGOOS Office, SMHI, Norkoping, Sweden, 2010. – P. 206–212.

42. Korotaev G.K. Operational forecast of the Black Sea dynamics. Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges. / Korotaev G.K., Ratner Yu.B., **Kubryakov A.I.** et all. // Proceedings of the Fifth International Conference on EuroGOOS, 20–22 May 2008: Exeter, UK. EuroGOOS Office, SMHI, Norkoping, Sweden, 2010. – P. 177–183.

43. **Kubryakov A.** The Black Sea Neashore Regions Forecasting System: operational implementation. Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges / **Kubryakov A.**, Korotaev G., Ratner Y. et all. // Proceedings of the Fifth International Conference on EuroGOOS, 20–22 May 2008: Exeter, UK. EuroGOOS Office, SMHI, Norkoping, Sweden, 2010. – P. 293–296.

44. **Kubryakov A.** Pilot experiment on operational functioning of the Black Sea Nowcasting/Forecasting System / **Kubryakov A.**, Grigoriev A., Dorofeev V. et all. // Современное состояние экосистем Черного и Азовского морей: международная научная конференция, 2005: тезисы. – Крым, Донузлав, 2005. – С. 92.

45. **Kubryakov A.** Nowcasting subsystem of the circulation in the Black Sea nearshore regions. European Operational Oceanography: Present and Future. eds. H. Dahlin, N. C. Flemming, P. Marshand and S. E. Petersson. / **Kubryakov A.**, Grigoriev A., Kordzadze A. et all. // Proceedings of the Fourth EuroGOOS International Conference on EuroGOOS, 6–9 June 2005: Brest, France, ISBN 92–894–9788–2, 2006. – P. 605–610.

46. Korotaev G. Modelling of the decade hydrometeorological variability in the Black Sea / Korotaev G., Oguz T., **Kubryakov A.** et all. // 2nd Biannual Scientific and Black Sea Scene EC Project Joint Conference «Climate Change in the Black Sea – Hypothesis, Observations, Trends Scenarios and Mitigation Strategy for the Ecosystem» – BS–HOT’2008, 6–9 October 2008: abstracts. – Sofia, Bulgaria, 2008.

47. Коротаев Г.К. Развитие гидрометеорологической системы черноморского региона, включающей диагноз и прогноз чрезвычайных явлений / Коротаев Г.К., **Кубряков А.И.**, Кордонеану Е. и др. // Материалы Международной конференции по проблемам гидрометеорологической безопасности, 2008: тезисы. – Москва, 2008.

48. Korotaev G., **Kubryakov A.** ASCABOS Project achievements. WP3 Expertise / Korotaev G., **Kubryakov A.** // ASCABOS Final Project Meeting, 22–24 October 2008: abstracts. – Istanbul, Turquie, 2008.

49. **Kubryakov A.** Variability of the Black Sea dynamics during two decades / **Kubryakov A.**, Korotaev G., Knysh V. et all. // 2nd Biannual Scientific and Black Sea Scene EC Project Joint Conference «Climate Change in the Black Sea – Hypothesis, Observations, Trends Scenarios and Mitigation Strategy for the Ecosystem» – BS–HOT’2008, 6–9 October 2008: abstracts. – Sofia, Bulgaria, 2009.

50. **Kubryakov A.** The Black Sea Training System. Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges / **Kubryakov A.**, Korotaev G., Dorofeyev V., Oguz T. // 5th EuroGOOS Conference, 20–22 May 2008: abstracts. – Exeter, UK, 2008. – P.165.

51. **Kubryakov A.I.** The Black Sea Track Web: forecast of oil spill transport / **Kubryakov A.I.**, Korotayev G.K., Thoorens F.-X. et al. // Sustainable Operational Oceanography: 6th EuroGOOS Conference, 4–6 October 2011: book of abstracts. – Sopot, Poland, 2011. – P. 83.

52. **Kubryakov A.I.** New tool for the Black Sea environmental safety: BlackSea Track Web / **Kubryakov A.I.**, Korotayev G.K., Thoorens F.-X. // In EGU General Assembly Conference, 22 – 27 April 2012: abstracts. – Vienna, Austria, 2012. – Vol. 14. – P. 4432.

АННОТАЦИЯ

Кубряков А.И. - Моделирование циркуляции и процессов массопереноса в Черном море в приложении к задачам оперативной океанографии. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика. – Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, 2014.

Диссертационная работа посвящена разработке и созданию на основе математических моделей общей циркуляции океана моделей и систем, направленных на решение задач оперативной океанографии по исследованию и прогнозированию процессов динамики вод и массопереноса в Черном море и его прибрежных акваториях. Для решения поставленных задач использовались различные модели циркуляции в z - и в σ -координатах. Модели переноса и диффузии были инкорпорированы в оперативную численную модель циркуляции МГИ, и на их основе восстановлен сезонный ход фонового пространственного распределения эмульсионно-растворенной фракции нефтеуглеводородов с учетом химико-биологических процессов их окисления в аэробной зоне Черного моря, а также исследована степень распространения долгоживущих радионуклидов в поверхностном слое Черного моря в первый год после черновыльской аварии.

На основе балтийской системы SeaTrackWeb и оперативной модели циркуляции МГИ впервые создана оперативная система прогноза распространения нефтяных разливов в Черном море BlackSeaTrackWeb (BSTW). Назначение системы BSTW - обеспечение мероприятий по повышению экологической безопасности Черного моря и по спасению на водах. Система доступна через сеть интернет, обеспечивает мгновенный доступ к данным последних морских прогнозов и функционирует круглосуточно. При расчетах учитываются почти все физические процессы, определяющие эволюцию нефтяного пятна. Система предоставляет возможность расчета траекторий переноса морскими течениями различных плавающих объектов и поддерживает функцию отслеживания к исходному состоянию (backtracking). В работе продемонстрирована удовлетворительная работоспособность системы BSTW в приложении к реальным ситуациям.

Проведено численное исследование влияния распресняющего эффекта речного стока во время весеннего половодья на формирование стратификации и циркуляции вод в северо-западной части Черного моря. По результатам модельных расчетов детально описана динамика и структура зоны распреснения, а также процесс образования и эволюции антициклонического вихря в районе устья Дуная, обусловленный речным стоком. Выявлены особенности вертикальной циркуляции вод близ устьев рек.

Выполнена реконструкция климатического сезонного хода гидрофизических полей Черного моря на основе адаптированной к физико-географическим условиям Черного моря версии σ -координатной модели Принстонского университета (POM) с

ассимиляцией климатических полей температуры и солёности и корректной интерполяцией среднемесячных климатических данных об атмосферном воздействии.

Впервые для Черного моря проведен ретроспективный анализ его состояния более чем за 20-летний период времени с 1971 по 1993 год. При этом был использован массив данных восстановленного климата моря. Результаты расчетов позволили описать реальную сезонную и межгодовую изменчивость термохалинных и динамических характеристик Черного моря за рассматриваемый период и выявить различные тенденции в их долговременной эволюции. На основе результатов реанализа детально рассмотрены процессы формирования холодного промежуточного слоя и исследованы механизмы, ответственные за эти процессы, в периоды чередования атмосферного воздействия: аномально теплой зимы 1980 – 1981 гг., нормальной зимы 1987 – 1988 гг. и холодной зимы 1992 – 1993 гг.

Исследовано влияние оптических свойств воды на динамику и стратификацию верхних слоев Черного моря на основе версии σ -координатной модели и корректной параметризации процессов поглощения и рассеяния света основными оптически активными компонентами в Черном море. Получены количественные оценки вклада оптического состояния моря в его гидродинамический режим в 15-летний период конца XX столетия, в течение которого оптические свойства Черного моря претерпевали значительные изменения.

С помощью σ -координатной модели циркуляции проведены сценарные расчеты распространения техногенного загрязнения в результате аварии в Ласпинской бухте. Исследована зависимость ареала аварийного загрязнения в акватории моря у Южного берега Крыма от направления ветров.

На основе данных гидрологической съемки и σ -координатной модели циркуляции проведены диагностические расчеты скоростей течений в Балаклавской бухте и распространения загрязнений от источников, расположенных на берегах бухты. Благодаря высокому пространственному разрешению детализирована трехмерная картина течений в бухте и выявлены особенности распространения загрязнений от каждого берегового источника.

Впервые разработана и создана оперативная система морских прибрежных прогнозов Черного моря на основе набора локальных σ -координатных моделей. Компоненты системы инсталлированы в причерноморских странах. Результатом функционирования Черноморской оперативной системы морских прибрежных прогнозов является однодневный диагноз и трехдневный прогноз трехмерных полей температуры, солёности и скорости течений в соответствующих прибрежных районах моря.

Разработана система тренингов по моделированию циркуляции вод в Черном море и его прибрежных районах. Особенностью системы является использование версии σ -координатной модели общей циркуляции Черного моря в разных режимах и методики построения локальных σ -координатных моделей для произвольной области с применением технологии вложенных сеток.

Ключевые слова: численное моделирование, оперативная океанография, системы морских прогнозов, процессы переноса и диффузии примесей, реанализ.

ANNOTATION

Kubryakov A.I. - Modelling of circulation and mass transfer processes in the Black Sea as applied to operational oceanography. - Manuscript.

Thesis is to claim the academic degree of Doctor in physics and mathematics, specialty 04.00.22 - geophysics. - Marine Hydrophysical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Sevastopol, 2014.

The thesis is dedicated to the development of models and systems to address the operational oceanography challenges of research and forecasting processes of water dynamics and mass transfer in the Black Sea and its coastal waters on the basis of mathematical ocean general circulation models. Different circulation models in z - and σ – coordinates are used to solve the problems. The transport model has been incorporated into the MHI operational numerical circulation model. Seasonal variability of the background spatial distribution of emulsion-soluble fraction of petroleum hydrocarbons with the chemical and biological processes of oxidation in the aerobic zone of the Black Sea is reproduced on the base of this model. Also the propagation of long-lived radionuclides in the surface layer of the Black Sea during the first year after the Chernobyl accident was simulated.

For the first time the operational system for forecasting of oil spills in the Black Sea BlackSeaTrackWeb (BSTW) is established on the basis of the Baltic system SeaTrackWeb and operational circulation model MHI. The goal of the system BSTW is software measures to improve the environmental security of the Black Sea and to search and rescue on water. The system is accessible via the Internet, provides instant access to the latest marine forecasts and operates around the clock. It takes into account almost all the physical processes that determine the evolution of the oil slick. The system provides the ability to calculate the trajectories of oil particles and various floating objects transported by currents and supports backtracking. The satisfactory performance of the system BSTW referred to real situations was demonstrated.

A numerical study of the influence of freshening effect of river runoff during the spring flood on the formation of the stratification and circulation of water in the north-western part of the Black Sea was carried out. The dynamics and structure of the desalination zone, as well as the formation and evolution of the anticyclonic eddy near the mouth of the Danube due to river runoff are described in detail. The features of the vertical circulation of water near the mouths of rivers are cleared.

Reconstruction of climatic seasonal variation of hydrophysical fields of the Black Sea on the basis of version of the σ -coordinate model of Princeton University (POM), which has been adapted to the physical and geographical conditions of the Black Sea, with the assimilation of climatic temperature and salinity fields and correct interpolation of mean monthly climate atmospheric forcing was done.

For the first time the Black Sea reanalysis over the 20-year period from 1971 to 1993 has been carried out. The results of calculations have allowed to describe a real seasonal and interannual variability of the thermohaline and dynamic characteristics of the Black Sea during this period and to identify the various trends in their long-term evolution. The processes of formation of the Cold Intermediate Layer and the mechanisms responsible for these processes, in the alternation of periods of atmosphere forcing: mild winter 1980 - 1981, normal winter 1987 - 1988 and cold of winter 1992 – 1993, are considered in detail on the basis of the reanalysis results.

The influence of the optical properties of water on the dynamics and stratification of the upper layers of the Black Sea based on the version of σ -coordinate model and correct parameterization of the absorption and scattering of light by the main optically active components in the Black Sea was studied. The quantitative evaluation of the contribution of the optical state of the sea in hydrodynamic regime in the 15-year period of the late twentieth

century, during which the optical properties of the Black Sea have undergone significant changes, was calculated.

Scenario simulations of technogenic pollution spreading as a result of an accident in the Laspy Bay were carried out. The dependence of the range of accidental pollution in the waters of the sea at the southern coast according to wind direction was studied.

The diagnostic calculations of circulation in the Balaklava Bay and extending of pollution from sources located on the shores of the bay was carried out on the basis of hydrological surveys and σ -coordinate model. Due to the high spatial resolution the three-dimensional picture of the currents in the Bay and the peculiarities of the spread of contamination from each coastal source are represented.

At the first time the operational system of coastal forecasts of the Black Sea on the basis of a set of local σ -coordinate models was designed and developed. The system components are installed in the Black Sea riparian countries. The result of the operation of the system is a one-day diagnosis and three-day forecast of three-dimensional fields of temperature, salinity and currents in the relevant coastal area of the sea.

The training system on modeling of water circulation in the Black Sea and its coastal areas has been developed. Feature of the system is to use a version of the σ -coordinate general circulation model of the Black Sea in different modes and methods of constructing local σ -coordinate models in the arbitrary region using the technology of nested grids.

Keywords: numerical simulation, operational oceanography, marine forecast system, the processes of advection and diffusion of contaminants, reanalysis.