

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Дымова Ольга Алексеевна

УДК 551.465.4

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ
МЕЗОМАСШТАБНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ**

04.00.22 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь – 2014

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте НАН Украины.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
Дёмышев Сергей Германович,
Морской гидрофизический институт НАН Украины,
ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

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

доктор физико-математических наук, профессор,
Копачевский Николай Дмитриевич,
Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского,
заведующий кафедрой.

Защита состоится «29» декабря 2014 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Специализированного ученого совета Д 50.158.02 в Морском гидрофизическом институте НАН Украины по адресу: 299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2, малый конференц-зал.

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

Автореферат разослан « » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
Специализированного ученого совета Д 50.158.02
кандидат физико-математических наук

А.И. Кубряков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Активная хозяйственная деятельность в прибрежных и открытых зонах Мирового океана стимулирует рост научных исследований, направленных на решение задач рационального природопользования. Освоение ресурсов шельфа, промышленное рыболовство, навигация, развитие рекреационного потенциала прибрежных территорий – вот только немногие отрасли, одним из решающих факторов влияния на которые является гидросфера. Диагноз и прогноз течений и волн, температурных аномалий, транспорта биогенов и загрязняющих веществ невозможен без точных гидрофизических данных. Поэтому численное моделирование гидродинамических процессов, происходящих в Мировом океане и отдельных его частях, представляет прикладной и научный интерес.

Существующие на данный момент глобальные модели имеют достаточно высокое разрешение для воспроизведения мезомасштабных особенностей циркуляции океана. Однако такие расчеты требуют больших вычислительных мощностей, что не всегда является целесообразным при изучении гидрофизических процессов в морях, бухтах и заливах. Поэтому особое значение имеют региональные модели, позволяющие не просто диагностировать водную динамику на малых пространственных масштабах, но и исследовать причины и механизмы формирования тех или иных особенностей морской среды, обусловленные географическим положением района. В литературе представлено большое количество публикаций, относящихся к вопросам регионального моделирования. Исследования динамики водной среды выполнены практически для всех акваторий Мирового океана, при этом горизонтальное разрешение моделей изменяется от нескольких десятков метров до 5 – 10 км.

Из анализа натурных измерений и спутниковой информации известно, что вклад мезо- и субмезомасштабных структур (вихревые образования, струйные течения, фронтальные зоны и др.) в динамику прибрежной циркуляции Черного моря существенен. Их изучение возможно на основе численных гидродинамических моделей, использующих высокое пространственное разрешение, детальное представление рельефа дна, учитывающих влияние стока рек, обмен через открытые границы и т.д. Для Черного моря построен и адаптирован ряд моделей, позволяющих реконструировать и исследовать крупно- и мелкомасштабные особенности. По размеру изучаемой области эти модели можно разделить на два класса: те, которые рассчитывают циркуляцию во всем море, и те, в которых моделируется динамика конкретного района. В первом варианте горизонтальное разрешение моделей составляет в среднем 5 км, что не всегда является достаточным для реконструкции мезо- и субмезомасштабных структур. Во втором случае высокое разрешение достигается за счет использования технологии вложенных сеток, но здесь возникает проблема задания условий на жидкой границе. Поэтому, несмотря на многолетний опыт построения численных моделей динамики Черного моря, остается открытым вопрос минимизации ошибок диагноза и прогноза гидрофизических характеристик циркуляции вод.

Возможность получать реалистичные гидрофизические поля определяется способностью математической модели качественно воспроизводить картину динамики вод моря, где важную роль играют мезомасштабные структуры. В настоящее время для реконструкции циркуляции Черного моря широко применяют численную нели-

нейную термодинамическую модель МГИ с шагом по пространству 5 км. Увеличение горизонтального разрешения модели МГИ позволит более корректно описать турбулентные процессы и обеспечить адекватный отклик морской системы на реальное атмосферное воздействие. Вихри в Черном море обуславливают обмен количеством движения, теплом, солью и любыми трассерами (биогены, примеси, радионуклиды и др.) между прибрежной и глубоководной частями моря. Для понимания причин их генерации и эволюции необходим анализ динамических и энергетических характеристик циркуляции. Для Черного моря такое исследование было проведено на сетке с горизонтальным разрешением 5 км, где циркуляция формировалась под воздействием климатических краевых полей. Поэтому теоретический и практический интерес представляет работа по анализу энергетики циркуляции, полученной с высоким разрешением и учетом реального атмосферного форсинга, что и обуславливает актуальность диссертационной работы.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с планами научных исследований Морского гидрофизического института НАН Украины в рамках следующих завершенных и действующих научно-исследовательских проектов:

тема НАН Украины «Исследование изменений климата в системе океан – атмосфера – литосфера на глобальных и региональных масштабах» (шифр «Океан-климат»), ГР № 0101U001023 (2000 – 2005 гг.), исполнитель,

тема НАН Украины «Современное состояние шельфовой зоны Черного моря и рекомендации по использованию минеральных и рекреационных ресурсов» (шифр «Ресурсы шельфа»), ГР № 0102U001482 (2001 – 2006 гг.), исполнитель,

тема НАН Украины «Фундаментальные и прикладные физико-климатические исследования морской среды и климатической системы океан-атмосфера» (шифр «Климат»), ГР № 0106U001406 (2006 – 2010 гг.), исполнитель,

тема НАН Украины «Создание и развитие на основе современных технологий междисциплинарной океанографической системы мониторинга и прогноза состояния Черного моря» (шифр «Оперативная океанография»), ГР № 0106U001407 (2006 – 2010 гг.), исполнитель,

тема НАН Украины «Междисциплинарные фундаментальные исследования прибрежных и шельфовых зон Азово-Черноморского бассейна» (шифр «Эко-шельф»), ГР № 0106U001409 (2006 – 2010 гг.), исполнитель,

тема НАН Украины «Мониторинг Азово-Черноморского бассейна и природных катастроф» (шифр «Мониторинговые системы»), ГР № 0107U001160 (2006 – 2011 гг.), исполнитель,

тема НАН Украины «Управление прибрежным ресурсным потенциалом морских акваторий Украины» (шифр «Управление»), ГР № 0107U001161 (2007 – 2011 гг.), исполнитель,

тема НАН Украины «Фундаментальные исследования физических процессов, определяющих состояние морской среды» (шифр «Физика моря»), ГР № 0109U003178 (2009 – 2010 гг.), исполнитель,

тема НАН Украины «Оперативный морской прогноз» (шифр «Морской прогноз»), ГР № 0111U001419 (2011 – 2013 гг.), исполнитель,

тема НАН Украины «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, которые определяют функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и грид-технологий» (шифр «Фундаментальная океанология»), ГР № 0111U001440 (2011 – 2015 гг.), исполнитель,

совместный проект НАН Украины и РФФИ «Исследование особенностей формирования и изменчивости циркуляции вод Черного моря на основе мультимодельного подхода» (шифр «Мультимодельное моделирование»), ГР № 0112U004272 (2012 – 2013 гг.), ученый секретарь,

тема НАН Украины «Черное море как имитационная модель океана» (шифр «Черное море»), ГР № 0112U001884 (2011 – 2015 гг.), исполнитель,

тема НАН Украины «Научное обоснование наращивания запасов полезных ископаемых и природных ресурсов в прибрежной зоне Азово-Черноморского бассейна» (шифр «Ресурс»), ГР № 0112U001781 (2012 – 2016 гг.), исполнитель.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы формулируется следующим образом: анализ мезомасштабной изменчивости циркуляции Черного моря методами математического моделирования.

В ходе выполнения работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. оценить влияние геометрических параметров идеализированного бассейна и потоков в проливах на формирование и эволюцию мезомасштабных вихрей и течений;
2. получить дискретные уравнения бюджета кинетической и потенциальной энергии Черного моря с учетом рек и проливов;
3. рассчитать динамические и энергетические характеристики мезомасштабных вихрей в прибрежных областях Черного моря для 2006 года на основе численного эксперимента с учетом реального атмосферного воздействия;
4. проанализировать среднегодовую и сезонную изменчивость интегральных компонентов бюджета кинетической и потенциальной энергии Черного моря;
5. исследовать возможные механизмы формирования мезомасштабных особенностей прибрежной циркуляции на основе анализа ее энергетических характеристик.

Объект исследования – мезомасштабные особенности циркуляции Черного моря.

Предмет исследования – термохалинные, динамические, энергетические характеристики циркуляции Черного моря.

Метод исследования – численное моделирование.

Научная новизна полученных результатов.

1. Получило дальнейшее развитие исследование влияния конфигурации бассейна и параметров потоков в проливах на характеристики мезомасштабных вихрей. Для этого в рамках нелинейной теории длинных волн построена численная двумерная модель динамики жидкости в прямоугольном бассейне с двумя проливами, с помощью которой рассчитывались поля скорости. Показано, что при учете нелинейных членов в уравнениях движения в бассейне переменной глубины воспроизводятся мезомасштабные вихри при смене направления осциллирующего потока в проливах.

2. Детально описаны мезомасштабные особенности циркуляции в прибрежных областях Черного моря для 2006 г. С этой целью термогидродинамическая модель МГИ была модифицирована для проведения расчетов с горизонтальным разрешением 1,6 км, с использованием параметризации турбулентности Меллора-Ямады 2.5 и реалистичных атмосферных полей.
3. Улучшена методика анализа энергетических характеристик циркуляции Черного моря за счет учета стока рек и водообмена через проливы в уравнениях бюджета кинетической и потенциальной энергии. Программный код модели циркуляции МГИ дополнен блоком расчета уравнений изменения кинетической и потенциальной энергии.
4. Впервые рассчитаны интегральные и мгновенные энергетические характеристики циркуляции всего Черного моря с разрешением 1,6 км по горизонтали и с учетом реального атмосферного воздействия. Количественно оценены среднегодовые и сезонные вклады в энергию, обусловленные действием ветра, работой силы плавучести, вертикальными турбулентными процессами. Показано, что эти физические факторы формируют основные энергетические потоки, определяющие изменение баланса энергии Черного моря.
5. Впервые на основе анализа мгновенных компонентов бюджета кинетической и потенциальной энергии, полученных с высоким горизонтальным разрешением и учетом реального атмосферного воздействия, определены преобладающие физические механизмы формирования мезомасштабных и субмезомасштабных особенностей циркуляции в северо-восточной части моря, у берегов Крыма, у южного и юго-восточного побережья Черного моря.

Практическое значение полученных результатов.

Усовершенствованная гидродинамическая модель МГИ может быть использована в системах морского и экологического мониторинга для реконструкции мезомасштабных и субмезомасштабных особенностей циркуляции на всей акватории Черного моря и определения роли процессов баротропной и/или бароклинной неустойчивости Основного черноморского течения и ветрового воздействия в формировании и эволюции мезомасштабных вихрей.

Разработанный для Черного моря с учетом стока рек и водообмена через проливы программный комплекс расчета составляющих бюджета кинетической и потенциальной энергии может быть применен для других полузамкнутых бассейнов.

Реконструированные трехмерные поля течений, температуры, солености и поле уровня могут быть использованы в качестве граничных условий при моделировании динамики вод с применением технологии вложенных сеток; а также при решении таких практических задач, как контроль переноса загрязняющих веществ, защита гидротехнических сооружений, оценка гидродинамических свойств морской среды в районах нефте- и газодобычи на шельфе Черного моря.

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя состоял в написании программного кода двумерной нелинейной гидродинамической модели; модификации численной модели МГИ для проведения расчетов динамических и энергетических характеристик с высоким горизонтальным разрешением, учетом реального атмосферного воздействия и учетом стока рек и водообмена через проливы; в получении, обработке и интерпретации результатов расчетов. Физическая постановка за-

дач, обсуждение научных результатов и формулировка выводов проводилась совместно с научным руководителем С.Г. Демьшевым. Научные результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы совместно с Л.В. Черкесовым, С.Г. Демьшевым, С.В. Довгой, Н.В. Марковой. Соискатель выражает глубокую благодарность всем соавторам за сотрудничество.

В статьях, опубликованных с соавторами, конкретный вклад соискателя заключается в следующем:

в [1, 2, 4, 5, 11 – 17, 19, 21] – участие в постановке задач, реализация программного кода двумерной модели динамики жидкости в бассейне с двумя проливами, проведение численных экспериментов по моделированию мезомасштабных вихрей и струйных течений в бассейне с двумя проливами, обработка и интерпретация результатов, формулировка выводов, подготовка статей;

в [7, 23] – участие в постановке задач, модификация программного кода модели МГИ для проведения расчетов с высоким горизонтальным разрешением и учетом реального атмосферного воздействия, подготовка начальных и краевых полей для использования в модели (поля касательных напряжений ветра, потоки тепла, осадков и испарения, температура поверхности моря), проведение численных экспериментов по реконструкции полей термогидродинамических характеристик в 2006 г., анализ результатов, сопоставление с данными наблюдений и результатами расчетов на сетке 5 км, формулировка выводов, подготовка статей;

в [8, 9] – участие в постановке задач, включение в модель МГИ с высоким горизонтальным разрешением и учетом реального атмосферного воздействия блока расчета коэффициентов вертикального турбулентного обмена импульсом и вертикальной турбулентной диффузии тепла и соли на основе теории Меллора-Ямады 2.5, проведение численных экспериментов, анализ и сопоставление результатов с данными наблюдений и результатами расчетов с использованием параметризации Пакановски-Филандера, формулировка выводов, подготовка статей;

в [3, 10, 25] – участие в постановке задач, модификация конечно-разностных аналогов уравнений изменения кинетической и потенциальной энергии в связи с заданием граничных условий на открытых участках границы бассейна и использованием бигармонического оператора в уравнении изменения потенциальной энергии, включение в модель МГИ блока расчета энергетических характеристик, проведение расчетов динамических и энергетических характеристик циркуляции, анализ и интерпретация результатов, формулировка выводов, подготовка статей.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы были представлены на следующих семинарах и научных конференциях: Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2005» (Севастополь, 4–6 мая, 2005); Международный научно-технический семинар «Системы контроля окружающей среды – 2005» (Севастополь, 19–23 сентября, 2005); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2006» (Севастополь, 3–5 мая, 2006); Международная научная конференция «Фундаментальные исследования важнейших проблем естественных наук на основе интеграционных процессов в образовании и науке» (Севастополь, 19–24 августа, 2006); Международный научно-технический семинар «Системы контроля окружающей среды – 2006» (Севастополь, 18–22 сентября, 2006); Международная на-

учная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2007» (Севастополь, 3–5 мая, 2007); Международная конференция молодых ученых «Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины» (Севастополь – Кацивели, 12–14 июня, 2007); V Международная научная конференция студентов и аспирантов «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований» (Днепропетровск, 24–25 апреля, 2008); Международная конференция «Динамика прибрежной зоны бесприливных морей» (Балтийск, Калининградская область, 30 июня–4 июля, 2008); Международный научно-технический семинар «Системы контроля окружающей среды – 2008» (Севастополь, 18–22 сентября, 2008); Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам водных экосистем «Понт Эвксинский VI» (Севастополь, 21–24 сентября, 2009); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2010» (Севастополь, 21–23 апреля, 2010); VII Международная научная конференция студентов и аспирантов «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований» (Днепропетровск, 11–14 мая, 2010); Международная научная конференция «Функционирование и эволюция экосистем Азово-Черноморского бассейна в условиях глобального изменения климата» (Севастополь – Кацивели, 6–11 сентября, 2010); Международный научно-технический семинар «Системы контроля окружающей среды – 2011» (Севастополь, 12–16 сентября, 2011); Международная научная конференция «Гидродинамическое моделирование динамики Черного моря» и российско-украинский семинар «Компьютерное моделирование вод морей и Мирового океана: достижения и проблемы» (Севастополь, 19–24 сентября, 2011); Международная научная конференция «Южные моря как имитационная модель океана» (Севастополь, 17–21 сентября, 2012); Международный научно-технический семинар «Системы контроля окружающей среды – 2012» (Севастополь, 24–28 сентября, 2012); Международная научная конференция «Интегрированная система мониторинга Черного и Азовского морей» (Севастополь, 24–27 сентября, 2013); Международная научная конференция «Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России» (п. Кацивели, 15–18 сентября, 2014).

Публикации. Материалы, вошедшие в диссертацию, отражены в 25 публикациях, в том числе статьи в периодических научных журналах – 6 [1 – 5, 9], статьи в сборниках научных трудов – 7 [6 – 8, 10, 12, 15, 24], материалы международных научных конференций – 12 [11, 13, 14, 16 – 23, 25]. Требованиям МОН Украины к научным специализированным изданиям по физико-математическим наукам отвечают 10 публикаций [1 – 10]. 3 публикации [1 – 3] включены в международную наукометрическую базу “*SCOPUS*”. Работы [6, 18, 20, 22, 24] выполнены без соавторов.

Структура работы. Работа состоит из вступления, трех разделов, выводов, списка использованной литературы. Она содержит 132 страницы машинописного текста, 49 рисунков и 2 таблицы. Список использованных источников включает 150 работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Вступлении** обосновывается актуальность темы диссертации, показана ее связь с научными темами МГИ НАН Украины и международными проектами, фор-

мулируются цель и задачи работы, изложены методы исследования и научная новизна полученных результатов, описаны их практическое значение и апробация, приведены количество публикаций и структура работы.

В **Разделе 1** приводится обзор литературы по вопросам моделирования мезомасштабных вихрей в Мировом океане и в Черном море. Представлены результаты исследования возникновения и развития течений и вихрей под воздействием потоков импульса через незамкнутые участки границы в идеализированных бассейнах. С использованием двумерной модели проведены численные эксперименты, на основе которых изучается влияние параметров потоков в проливах и геометрических характеристик бассейна на структуру поля скорости. Показано, что периодическое формирование вихрей в бассейне с двумя проливами происходит при смене направления осциллирующего потока в проливе. Наиболее интенсивные вихри возникают в бассейне переменной глубины с несимметричными проливами. Для исследования причин возникновения вихрей в проточном бассейне переменной глубины изучен баланс слагаемых в уравнении вихря. Выявлено, что основной вклад при образовании мезомасштабных вихрей дает адвекция по параллели, при этом адвективное слагаемое качественно соответствует изменению завихренности.

В **Разделе 2** представлены результаты численных экспериментов по оценке влияния параметров модели циркуляции Черного моря на качество реконструированных термогидродинамических полей.

На основе трехмерной нелинейной модели МГИ проведено три эксперимента по моделированию гидрофизических полей Черного моря в 2006 г. Во всех экспериментах в качестве краевых полей использованы поля тангенциального напряжения ветра, полного потока тепла, испарения и осадков, полученные по данным региональной атмосферной модели "ALADIN". В модели каждые сутки усваивалась температура поверхности моря, полученная по данным спутника *NOAA*. В первом расчете поля, полученные с разрешением 1,6 км по горизонтали, сравнены с аналогичными данными, рассчитанными на сетке 5 км, и с данными наблюдений. Для параметризации вертикальных турбулентных процессов в обоих расчетах использовалась параметризация Пакановски-Филандера. Выявлен ряд отличий в структуре циркуляции: модель с высоким разрешением более корректно описывает отклик уровневой поверхности на экстремальные атмосферные воздействия по сравнению с расчетами на грубой сетке. Так, в начале января 2006 г. под действием мощного штормового ветра у западного побережья Черного моря сформировался пограничный слой. Максимальное повышение уровня наблюдалось 06.01.06 и составило 32 см, скорости течений на поверхности достигали 90 см/с. В то же время в расчете с разрешением 5 км подъем уровня составил 38 см, а скорости течений достигали 130 см/с. Сравнение с данными альтиметрии показало, что результаты, полученные на сетке 1,6 км, соответствуют альтиметрии, а величины динамических характеристик, рассчитанных на грубой сетке, завышены. В поле скорости получены мезомасштабные вихри и течения, отсутствовавшие в расчетах на грубой сетке, но соответствующие спутниковым наблюдениям.

Во втором эксперименте для описания вертикального турбулентного обмена импульсом и вертикальной турбулентной диффузии тепла и соли используется параметризация Меллора-Ямады 2.5. Результаты эксперимента сравнены с расчетом,

проведенным с использованием параметризации Пакановски-Филандера, и с данными натуральных измерений. Непосредственный учет напряжений трения ветра в теории Меллора-Ямады обеспечивает корректное описание скоростей течений в верхних слоях при экстремальном ветровом воздействии. На рис. 1 приведено поле скорости, сформировавшееся при сильном северо-восточном ветре со скоростями до 17 м/с. Видно, что в эксперименте 1 струя ОЧТ в юго-западной части моря распадается, а в эксперименте 2 сохраняется. Величины скоростей течений во втором эксперименте в среднем на 10% ниже, чем в первом.

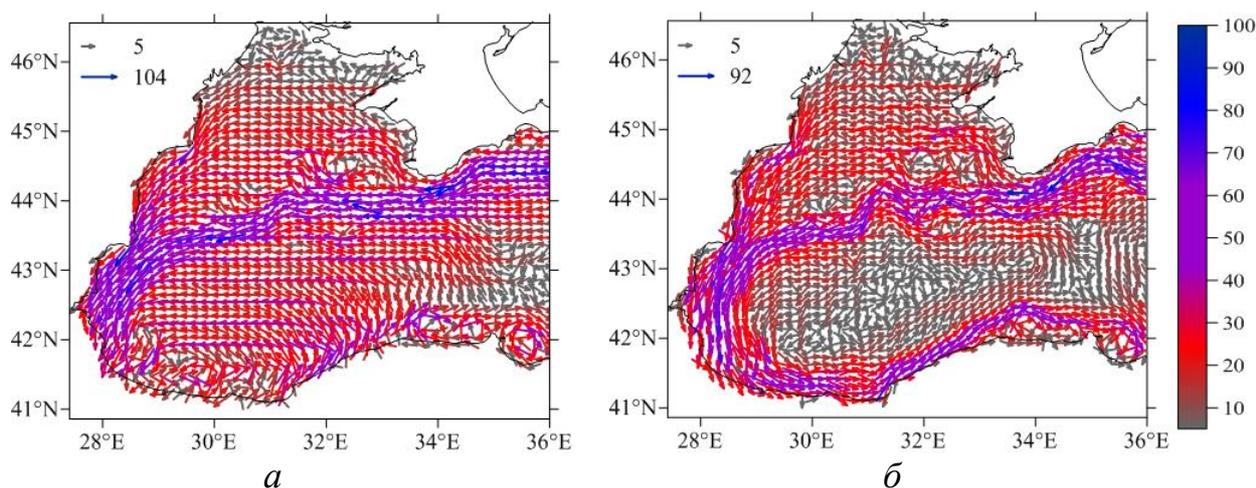


Рис. 1. Поле скорости (см/с) 26.01.06, полученное в экспериментах 1 (а) и 2 (б) на горизонте 2,5 м

В третьем численном эксперименте была уменьшен коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии в уравнениях переноса тепла и соли. Для валидации полей температуры и солёности использованы данные натуральных измерений, полученные в ходе морской экспедиции ИО РАН им. П.П. Ширшова (рейс STD101, 23.06.06 – 26.06.06) в районе Геленджика. Сравнение профилей T и S , полученных по результатам третьего эксперимента, с данными эксперимента 2 и результатами контактных измерений показало, что при уменьшении коэффициента горизонтальной диффузии в поле температуры воспроизводится особенность в слое скачка плотности, характерная для летних месяцев и наблюдаемая в данных измерений, что видно из рис. 2а, б. Профили температуры практически совпадают для экспериментов 2 и 3, но в слое 30 – 60 м данные третьего эксперимента (рис. 2а, синяя кривая) лучше отражают известное из натуральных данных изменение температуры по глубине, когда наблюдается ядро аномально холодных вод в слое ХПС, сформировавшееся в результате зимнего выхолаживания. Профили солёности, полученные в эксперименте 3 (рис. 2б, синяя кривая), ближе к данным наблюдений (рис. 2б, черная кривая), однако, в обоих экспериментах наблюдается завышение значений в среднем на 0,5 ‰ в слое 50 – 150 м.

Таким образом, по итогам предварительных численных экспериментов были выбраны следующие параметры модели для расчета и дальнейшего анализа динамических и энергетических характеристик циркуляции в 2006 г.: сетка $1,6 \times 1,6$ км; по вертикали рассматривалось 27 z-горизонтов; шаг по времени – 1,5 мин. На поверх-

ности моря задавались ветер, осадки, испарение, полный поток тепла по данным модели «ALADIN», температура поверхности моря – по данным спутника NOAA. Начальные поля соответствовали 28 декабря 2005 г. Коэффициенты турбулентности по вертикали рассчитывались по теории Меллора-Ямады 2.5. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости $\nu^H=10^{16}$ см⁴/сек, коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии $k^H=5 \cdot 10^{14}$ см⁴/сек. Время интегрирования – с 1 января по 31 декабря 2006 г.

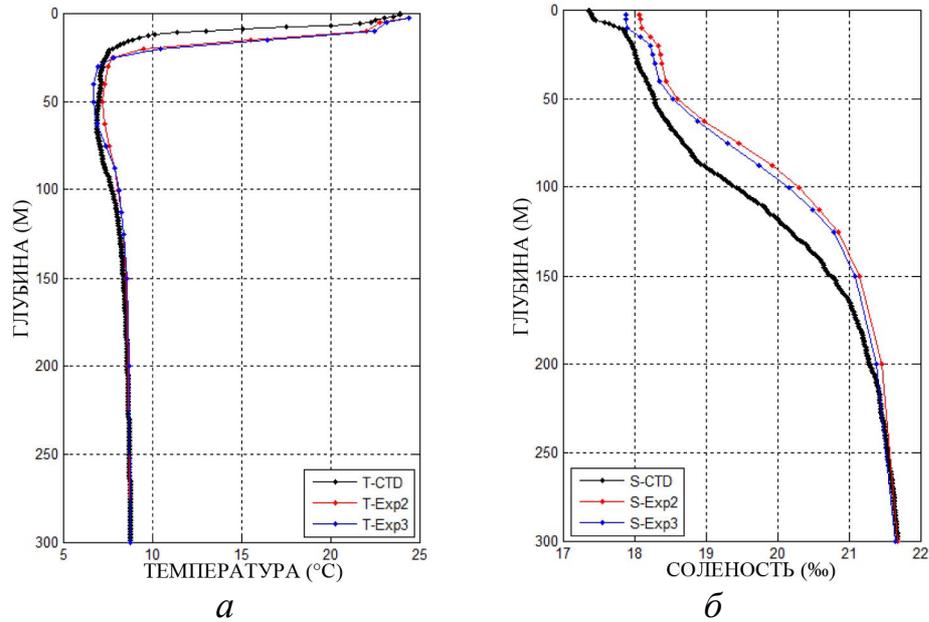


Рис. 2. Профили температуры (а) и солёности (б), полученные в эксперименте 2 (красная кривая), эксперименте 3 (синяя кривая) и по данным измерений (черная кривая)

В результате расчета получены поле уровня, трехмерные поля скорости, температуры и солёности на каждые сутки периода интегрирования. Анализ карт горизонтальных скоростей показал наличие мезомасштабной и субмезомасштабной изменчивости вод моря. Под мезомасштабами мы понимаем вихревые структуры размерами 30 – 100 км и временем жизни порядка месяца; субмезомасштабы – вихри с размерами порядка 10 км и временем жизни несколько суток. Рассмотрим отдельные районы черноморского бассейна. Поля скорости на верхнем расчетном горизонте, характерные для этих областей, представлены на рис. 3. Наиболее интенсивное образование мезомасштабных вихрей происходит около Кавказского (рис. 3а) и Анатолийского (рис. 3б) побережий. Видно, что круговороты, формирующиеся в этих районах, имеют антициклонический знак завихренности (рис. 3а, б); они возникают квазипериодически и перемещаются по направлению движения ОЧТ. Время жизни этих антициклонов составляет 25 – 40 дней, в среднем скорость течений здесь равна 30 – 35 см/с, а по периферии вихрей в зоне взаимодействия с ОЧТ скорости возрастают до 50 см/с. Возле побережья Кавказа вихри наблюдаются до глубин около 100 м, возле Турции – структура вихрей прослеживается до глубин 300 м. Перемещаясь на восток, мезомасштабные вихри, возникающие у побережья Турции, оказывают влияние на Батумский антициклон. К концу лета – началу осени взаимодей-

ствие сдвигающимися с запада вихрями приводит к тому, что Батумский антициклон уменьшается в размерах, а справа от него формируется множество вихрей различного размера и знака завихренности (рис. 3в). Субмезомасштабные образования располагаются у берега и наблюдаются до 100 м, мезомасштабные вихри – до 300 м.

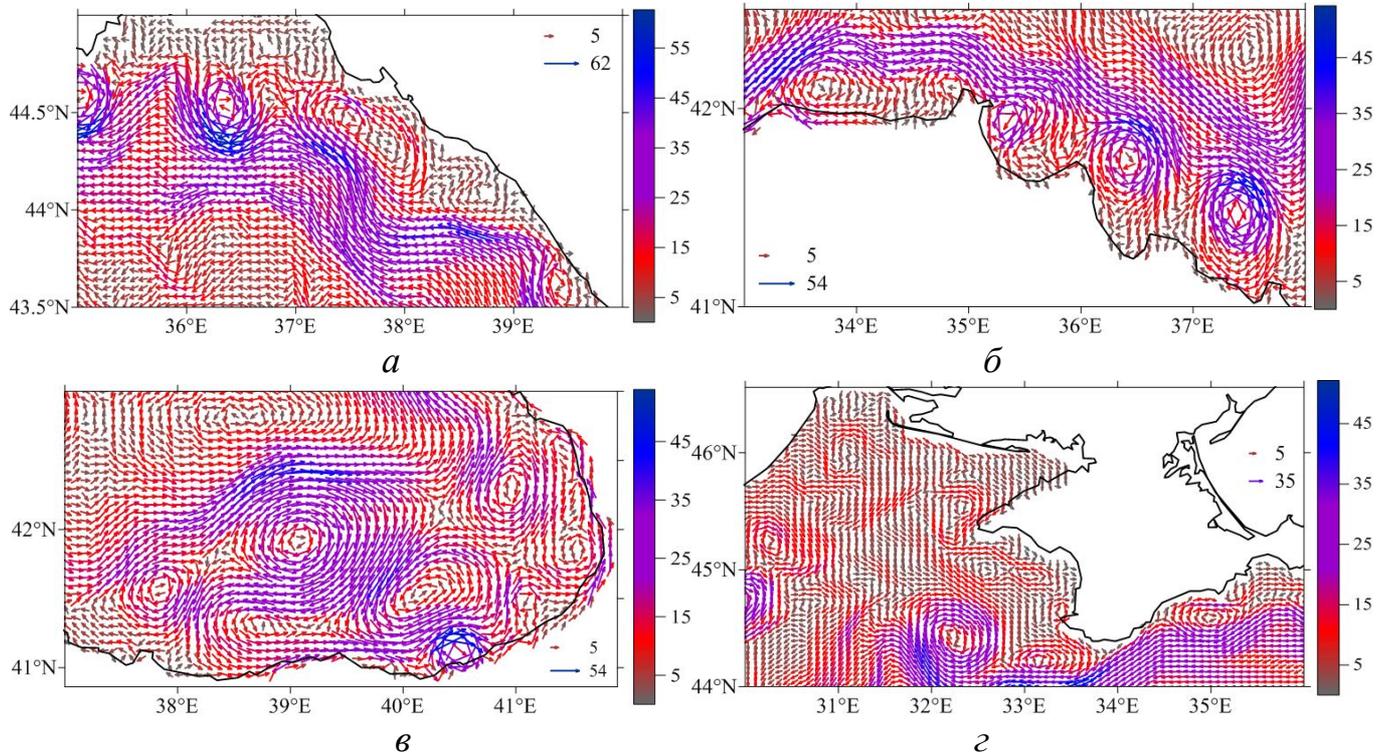


Рис. 3. Поле скорости (см/с) на горизонте 2,5 м возле побережья Кавказа 11.04.06 (а), возле побережья Турции 14.08.06 (б), в юго-восточной части моря 18.09.06 (в) и на СЗШ 07.08.06 (г)

Анализ результатов представленного эксперимента показал, что в поле скорости воспроизводятся вихревые образования с пространственными масштабами до десяти километров и временными – до нескольких суток. В основном эти субмезомасштабные вихри располагаются на северо-западном шельфе и около берегов Крыма (рис. 3г). Скорости в них составляют 5 – 7 см/с, время жизни не превышает 7 суток. На СЗШ структура вихрей прослеживается до глубин 25 м. У южного и юго-восточного побережья Крыма мезомасштабные и субмезомасштабные вихри со скоростями 10 – 15 см/с наблюдаются до глубин 80 м. Повышение скоростей по сравнению с подобными образованиями на СЗШ обусловлено влиянием струи ОЧТ.

В Разделе 3 проведен анализ энергетических характеристик циркуляции, рассчитанных на основе конечно-разностных аналогов уравнений изменения кинетической (КЭ) и потенциальной энергии (ПЭ) с учетом рек и проливов. Символьная запись уравнения бюджета кинетической энергии имеет вид:

$$E_t + Adv(P + E) = \Pi \leftrightarrow E + F_{Bfr}^r(E) - Diss_{Ver}(E) - Diss_{Hor}(E) - D_{Fic}(E),$$

где $Adv(P)$ – работа сил давления, $Adv(E)$ – адвекция кинетической энергии, $\Pi \leftrightarrow E$ – работа силы плавучести, $F_{Bfr}^r(E)$ – приток от ветра и потеря за счет трения о

дно, $Diss_{Ver}(E)$ – вертикальное внутренне трение, $Diss_{Hor}(E)$ – горизонтальное внутренне трение, $D_{Fic}(E)$ – трение о боковые стенки. Сток рек и водообмен через проливы непосредственно учитывается во втором слагаемом в левой части и в последнем слагаемом правой части уравнения. Изменение потенциальной энергии определяется следующим уравнением:

$$P_i + Adv(\Pi) = -\Pi \leftrightarrow E - Diff_{Hor}(\Pi) + Diff_{Ver}^{Fluxes}(\Pi) - Diff_{Ver}^{Kv}(\Pi) + Diff_{Ver}^{Bot-Sur}(\Pi) - Diff_{Ver}^{Add}(\Pi),$$

где $Adv(\Pi)$ – адвекция потенциальной энергии, $Diff_{Hor}(\Pi)$ – горизонтальная турбулентная диффузия, $Diff_{Ver}^{Fluxes}(\Pi)$ – изменение ПЭ за счет потоков плавучести и вертикальной внутренней диффузии, $Diff_{Ver}^{Bot-Sur}(\Pi)$ – изменение ПЭ за счет разницы между придонной и поверхностной плотностью, $Diff_{Ver}^{Kv}(\Pi)$ – изменение ПЭ за счет неоднородности коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по глубине, $Diff_{Ver}^{Add}(\Pi)$ – добавка за счет нелинейной зависимости плотности от температуры и солености. Реки и проливы учтены в адвективном слагаемом и в слагаемом, описывающем горизонтальную турбулентную диффузию.

Рассмотрим результаты расчета проинтегрированных по объему и осредненных за год слагаемых в уравнениях бюджета кинетической и потенциальной энергии. Схематически направления энергетических потоков в системе представлены на рис. 4. Полная энергия системы складывается из КЭ и ПЭ, обмен между которыми происходит за счет доступной потенциальной энергии и определяется работой силы плавучести. Положительное значение $\Pi \leftrightarrow E$ означает переход из ПЭ в КЭ. Потоки плавучести, определяющие стратификацию вод, и ветер – это основные источники увеличения механической энергии Черного моря. Из рис. 4 видно, что в среднем за 2006 г. максимальный вклад в КЭ идет за счет действия ветра $\tau \rightarrow E$. Приток от ветра компенсируется внутренним вертикальным трением $Diss_{Ver}(E)$. Адвективные слагаемые малы, однако они не обращаются в ноль, т.к. мы задаем потоки на незамкнутых участках границы. Горизонтальное трение $Diss_{Hor}(E)$ уменьшает кинетическую энергию, и величина этого слагаемого за год превышает приток за счет работы силы плавучести на 46%. На примере 2006 г. видно, что изменение ПЭ определяется вертикальной диффузией и работой силы плавучести. Полная вертикальная диффузия в системе определяется балансом между слагаемыми $Diff_{Ver}^{Bot-Sur}(\Pi)$ и $Diff_{Ver}^{Kv}(\Pi)$.

Из рис. 4 видно, что величина $Diff_{Ver}(\Pi)$ в среднем за год положительна. Потоки плавучести на поверхности моря, определяемые $Diff_{Ver}^{Fluxes}(\Pi)$ в среднем за год отрицательны. Это значит, что энергия переходит из моря в атмосферу. Горизонтальная диффузия уменьшает ПЭ, однако, эта величина на порядок меньше вертикальной диффузии. Анализ осредненных посезонно вкладов показал, что в холодные месяцы года максимальный вклад в кинетическую энергию обеспечивается притоком от ветра. Весной и летом ослабление ветров приводит к тому, что преобладающим в балансе КЭ становится вклад работы силы плавучести. Интенсивный прогрев верхних слоев моря приводит к увеличению кривизны изопикнических поверхностей и, следовательно, увеличению доступной потенциальной энергии. В результате чего развиваются процессы бароклинной неустойчивости.

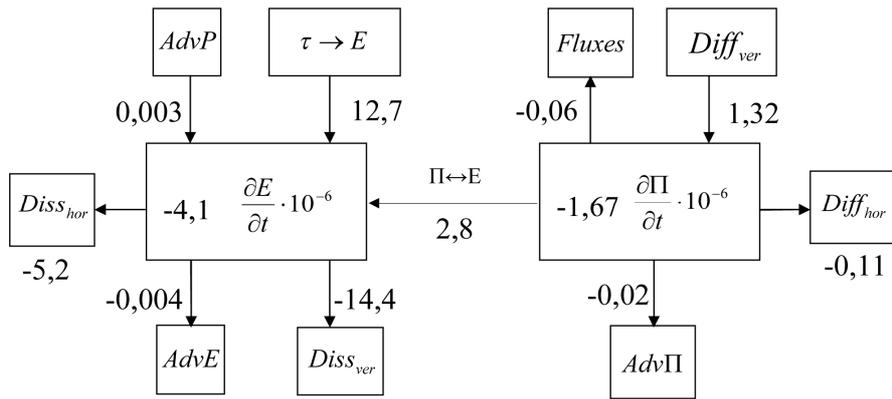


Рис. 4. Проинтегрированные по объему осредненные за год энергетические потоки (10^{-6} эрг/см³ с)

Анализ пространственных распределений слагаемых в уравнениях изменения КЭ и ПЭ показал, что у побережья Крыма и северного Кавказа наблюдается соответствие зон генерации субмезомасштабных вихрей с зонами увеличения работы силы плавучести. На рис. 5а представлено поле скорости 13.08.06 на верхнем расчетном горизонте. Видно, что в поле скорости локализованы несколько субмезомасштабных структур: вихри с масштабами от 8 до 17 км к западу от Крыма, небольшой вихрь диаметром около 12 км южнее Керченского пролива, орбитальные скорости здесь меняются от 5 до 15 см/с. Вихри западнее Крыма наблюдались 10 сут., вихрь около Керченского пролива 4 сут. Все вихри имели антициклонический знак завихренности. Соответствующее 13.08.06 пространственное распределение работы силы плавучести показано на рис. 5б. Сравнение обеих карт показало, что области максимальных значений работы силы плавучести пространственно совпадают с расположением субмезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежных зонах. Из рис. 5б видно, что у крымского побережья рядом с областями максимальных значений $\Pi \leftrightarrow E$ расположены зоны минимальных значений величины $\Pi \leftrightarrow E$. Т.к. работа силы плавучести определяется плотностью жидкости, то такое пространственное распределение свидетельствует о больших горизонтальных градиентах плотности, что является критерием развития бароклинной неустойчивости. В результате доступная потенциальная энергия возрастает. Таким образом, в весенне-летний сезон 2006 г. возможным механизмом формирования субмезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежных зонах северной части Черного моря являлась бароклинная неустойчивость.

У юго-восточного побережья Крыма наблюдается относительно мощный антициклонический вихрь (рис. 5а). Мы относим его уже к мезомасштабным вихрям, т.к. его размеры достигали 33 км, а скорости в нем составили 25 – 30 см/с. Увеличение размера и скорости по сравнению с субмезомасштабными вихрями связано с влиянием основного черноморского потока. Обширная область отрицательных значений работы силы плавучести (рис. 5б) в зоне локализации вихря свидетельствует о том, что скорости вихря подпитываются струей ОЧТ. Таким образом, можно предположить, что развитие мезомасштабной циркуляции здесь обусловлено баротропно-бароклинной неустойчивостью.

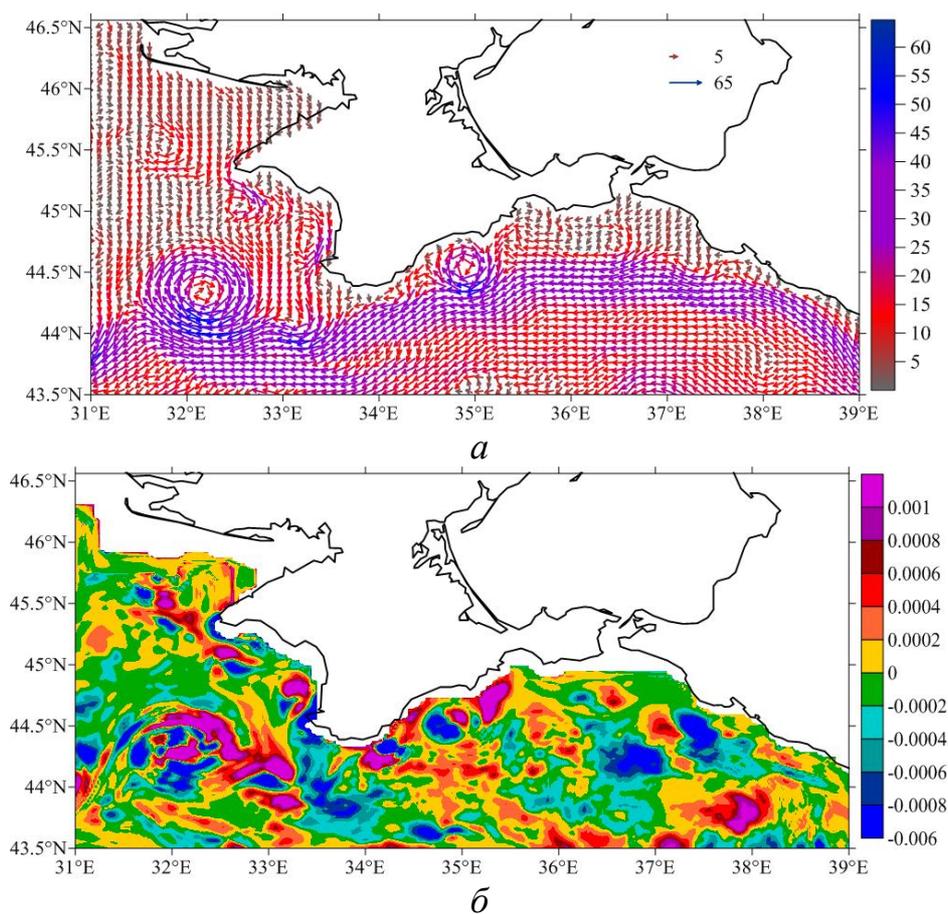


Рис. 5. Поле скорости (см/с) на горизонте 2,5 м (а) и поле $\Pi \leftrightarrow E$ (эрг/с) на горизонте 20 м (б) 13.08.06

У южных берегов Черного моря квазипериодическое образование мезомасштабных вихрей наблюдается в течение всего года. Определяющими факторами здесь являются сила ветра и конфигурация береговой черты. В холодные месяцы года Основное черноморское течение имеет вид узкой прижатой к берегу струи. При ослаблении действия ветра между ОЧТ и береговой линией формируются антициклонические вихри. Исследование этого механизма в лабораторных условиях выполнено под руководством А.Г. Зацепина (Зацепин и др., 2010). Выводы, сделанные авторами, подтверждаются и нашими численными экспериментами. Пример сопоставления карт течений с пространственным распределением слагаемого, характеризующего вклад в КЭ от ветра, представлен на рис. 6. Скорость приводного ветра 18.03.06 в среднем составляла 1,5 – 2 м/с. Видно, что слагаемое $\tau \leftrightarrow E$ увеличивает кинетическую энергию ОЧТ и между областями максимальных значений $\tau \leftrightarrow E$ и берегом возникают области отрицательных значений (рис. 6б). Расположение этих областей четко совпадает с локализацией мезомасштабных вихрей в поле скорости (рис. 6а). Отрицательная величина слагаемого $\tau \leftrightarrow E$ физически означает, что ветер и течения на поверхности направлены в противоположные стороны. Происходит торможение потока и при набегании на неровности береговой линии в шельфовых зонах формируются антициклонические вихри (Елкин, Зацепин, 2013). Глубина шельфа у Анатолийского побережья в среднем составляет 100 м. Следовательно, при слабом ветре орография берега оказывает существенное влияние на ОЧТ и за мыса-

ми в относительно мелководных районах Анатолийского побережья формируются мезомасштабные вихри. При усилении ветра размеры компенсационных зон уменьшаются, скорости струи возрастают и мезомасштабные вихри в прибрежной зоне не развиваются. Таким образом, ослабление ветрового воздействия в сочетании с влиянием орографии береговой черты могут являться основными механизмами формирования мезомасштабных особенностей циркуляции в южной и юго-восточной части Черного моря.

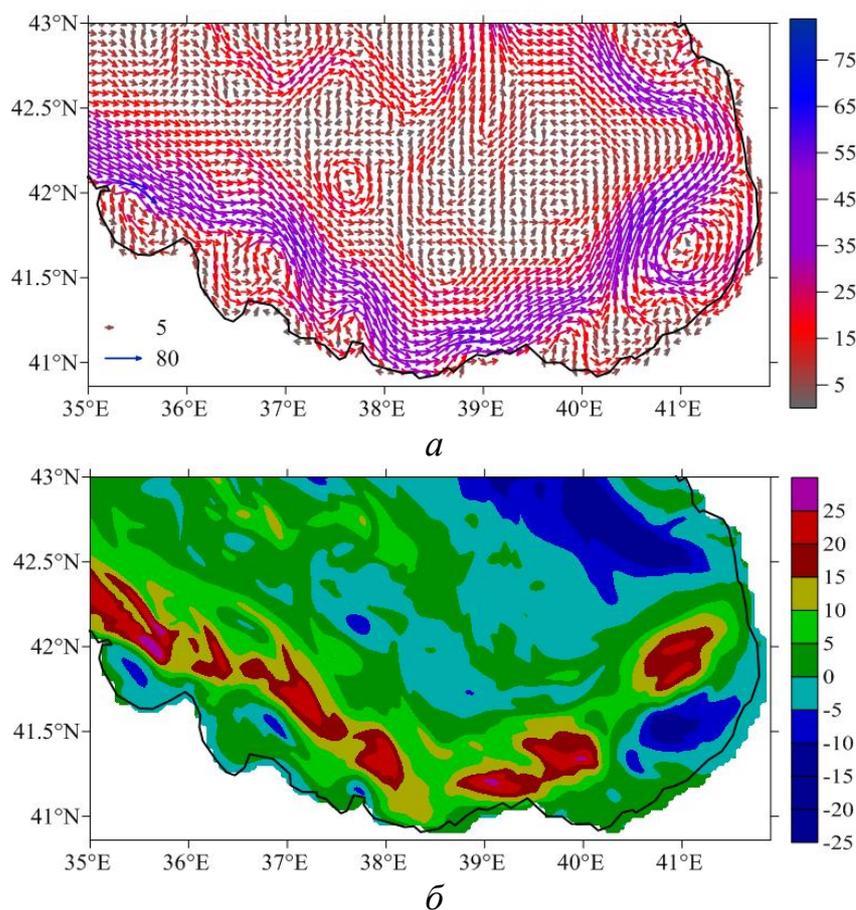


Рис. 6. Поле скорости (см/с) на горизонте 2,5 м (а) и поле $\tau \leftrightarrow E$ (эрг/с) на поверхности (б) 18.03.06

ВЫВОДЫ

Основные научные и практические результаты диссертации могут быть сформулированы следующим образом:

1. Проанализировано влияние параметров потоков в проливах и геометрических характеристик бассейна на генерацию и эволюцию мезомасштабных вихрей. Выявлено, что вихри периодически формируются под воздействием осциллирующего потока в проливах при смене направления потока. Наиболее интенсивные вихри возникают в бассейне переменной глубины с несимметричными проливами. Основной вклад при образовании мезомасштабных вихрей в идеализированном бассейне с узкими проливами дают адвекция по параллели и вязкость, при этом временная изменчивость адвективного слагаемого качественно соответствует изменению завихренности.

2. Оценена чувствительность результатов моделирования к параметрам модели МГИ и способам аппроксимации турбулентных процессов. Показано, что при пространственном разрешении $1,6 \times 1,6$ км воспроизводятся вихревые структуры размерами до нескольких десятков километров, наличие которых подтверждено данными наблюдений. Продемонстрировано, что с использованием теории турбулентности Меллора – Ямады 2.5 корректно моделируются структура поля скорости и модельная температура в верхнем 40-метровом слое и слое скачка плотности. При уменьшении коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии в расчетных данных по температуре в слое 30 – 60 м в летний период воспроизводится ядро вод пониженной температуры в слое ХПС, наблюдавшееся в натуральных съемках.

3. Подобраны оптимальные параметры модели МГИ для реконструкции термогидродинамических характеристик Черного моря в 2006 г. с высоким горизонтальным разрешением. По результатам моделирования уточнено расположение прибрежных зон моря, в которых квазипериодически формируются мезомасштабные вихри: это южное и юго-восточное побережье Крыма, побережье северного Кавказа, северо-западный шельф, восточный угол моря (побережье Грузии), южная и юго-восточная прибрежные зоны (побережье Турции).

4. Получены дискретные уравнения изменения кинетической и потенциальной энергии с учетом рек и проливов, на их основе проведена модификация модели МГИ для расчета динамических и энергетических характеристик циркуляции. Рассчитаны интегральные балансы и мгновенные вклады слагаемых в уравнениях изменения кинетической и потенциальной энергии. Построены диаграммы энергетических потоков осредненных за год и посезонно.

5. Анализ среднегодовой изменчивости энергетических потоков показал, что уменьшение кинетической энергии вследствие горизонтального и вертикального внутреннего трения превышает рост за счет вкладов от ветра и работы силы плавучести. В холодные месяцы года максимальный вклад в кинетическую энергию обеспечивается притоком от ветра. Весной и летом ослабление ветров приводит к тому, что преобладающим становится вклад работы силы плавучести. В среднем за год работа силы плавучести уменьшает потенциальную энергию. В теплые месяцы года интенсивный прогрев верхних слоев моря приводит к увеличению кривизны изопикнических поверхностей, в результате чего интенсифицируются процессы бароклинной неустойчивости. В теплый сезон работа силы плавучести максимальна в верхнем квазиоднородном слое, а в осенне-зимний сезон – на горизонтах, где сосредоточены воды холодного промежуточного слоя.

6. Анализ пространственного распределения работы силы плавучести показал, что весной и летом в северо-восточной части моря и у берегов Крыма усиливаются процессы бароклинной неустойчивости и в поле течений формируются субмезомасштабные структуры. У южного и юго-восточного побережья Черного моря формирование мезомасштабных вихрей происходит при слабых ветрах, когда уменьшается вклад в кинетическую энергию от ветра и существенным становится влияние орографических особенностей береговой черты.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ,
содержащихся в изданиях, включенных в перечень МОН Украины:
«физико-математические науки»

1. Demyshev S.G. Numerical simulation of currents in a basin of variable depth with two straits / S.G. Demyshev, **О.А. Дымова**, L.V. Cherkesov // Physical Oceanography. – 2007. – Vol. 17, № 4. – P. 191 – 199. (Работа является переводом: Демышев С.Г. Численное моделирование течений в бассейне переменной глубины с двумя проливами / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова**, Л.В. Черкесов // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 4. – С. 3 – 12.).
2. Demyshev S.G. Influence of straits and bottom topography on the structure of barotropic currents in a flow-through basin / S.G. Demyshev, **О.А. Дымова** // Physical Oceanography. – 2010. – Vol. 20, № 2. – P. 90 – 98. (Работа является переводом: Демышев С.Г. Влияние расположения проливов и рельефа дна на структуру баротропных течений в проточном бассейне / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова** // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 2. – С. 17 – 25.).
3. Demyshev S.G. Numerical analysis of the mesoscale features of circulation in the Black Sea coastal zone / S.G. Demyshev, **О.А. Дымова** // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2013. – Vol. 49, № 6. – P. 603 – 610. (Работа является переводом: Демышев С.Г. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова** // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49, № 6. – С. 655 – 663.).
4. Исследование приливных волн и течений в бассейне с двумя проливами / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова**, Н.В. Маркова, Л.В. Черкесов // Доповіді Національної Академії наук України. – 2005. – № 11. – С. 101 – 105.
5. Демышев С.Г. Численное моделирование приливных волн и течений в бассейне с двумя проливами / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова**, Н.В. Маркова // Морской гидрофизический журнал. – 2006. – № 2. – С. 66 – 76.
6. **Дымова О.А.** Исследование возможных условий образования вихрей в проточном бассейне / **О.А. Дымова** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Выпуск 19. – С. 87 – 92.
7. Демышев С.Г. Результаты прогностического расчета гидрофизических полей Черного моря с высоким пространственным разрешением / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – Выпуск 22. – С. 22 – 30.
8. Демышев С.Г. Моделирование циркуляции Черного моря с высоким пространственным разрешением / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – Выпуск 25, Т. 2 – С. 114 – 135.
9. Демышев С.Г. Моделирование гидрофизических полей Черного моря в январе-сентябре 2006 года с высоким пространственным разрешением с использованием параметризации Меллора-Ямады / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова** // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 5. – С. 59 – 69.

10. Демышев С.Г. Энергетический анализ мезомасштабной изменчивости циркуляции вод Черного моря по результатам расчета гидрофизических полей в период январь – сентябрь 2006 г. / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – Выпуск 26, Т. 2 – С. 40 – 49.

СПИСОК РАБОТ В ДРУГИХ ИЗДАНИЯХ И ТЕЗИСОВ В СБОРНИКАХ
МАТЕРИАЛОВ НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

11. Исследование развития волн и течений в бассейне с двумя проливами / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова**, Н.В. Маркова, Л.В. Черкесов // Ломоносов – 2005: межд. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 4–6 мая 2005 г.: материалы конф. – Севастополь, 2005. – С. 20 – 21.

12. Расчет течений в Черном и Мраморном морях с учетом рек и проливов на основе трехмерной нелинейной модели / С.Г. Демышев, С.В. Довгая, **О.А. Дымова**, Н.В. Маркова // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – С. 183 – 185.

13. Демышев С.Г. Исследование структуры течений в бассейне с двумя проливами / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова**, Л.В. Черкесов // Ломоносов – 2006: межд. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 3 – 5 мая 2006 г.: материалы конф. – Севастополь, 2006. – С. 22 – 23.

14. Демышев С.Г. Численное моделирование течений в бассейне переменной глубины с двумя проливами / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова**, Л.В. Черкесов // Фундаментальные исследования важнейших проблем естественных наук на основе интеграционных процессов в образовании и науке: межд. науч. конф., 19–24 августа 2006 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2006. – С. 76.

15. Демышев С.Г. Влияние нелинейности при моделировании течений однородной жидкости в проточном бассейне / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова** // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – С. 201 – 203.

16. Демышев С.Г. Исследование влияния конфигурации бассейна на структуру течений в проточном бассейне / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова**, Л.В. Черкесов // Ломоносов – 2007: межд. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 3 – 5 мая 2007 г.: материалы конф. – Севастополь, 2007. – С. 9 – 10.

17. Демышев С.Г. Исследование влияния конфигурации бассейна на структуру течений в проточном бассейне / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова**, Л.В. Черкесов // Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины: межд. конф. молодых ученых, 12–14 июня 2007 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2007. – С. 8 – 9.

18. **Дымова О.А.** Исследование возникновения вихрей в проточном бассейне / **О.А. Дымова** // География, геоэкология, геология: опыт научных исследований: V межд. науч. конф. студентов и аспирантов, 24–25 апреля 2008 г.: материалы конф. – Днепропетровск, 2008. – С. 21 – 24.

19. Демышев С.Г. Возникновение вихрей в проточном бассейне / С.Г. Демышев, **О.А. Дымова** // Динамика прибрежной зоны бесприливных морей: межд. конф., 30 июня–4 июля 2008 г.: материалы конф. – Балтийск, 2008. – С. 186 – 190.

20. **Дымова О.А.** Исследование возможных механизмов образования вихрей в проточном бассейне / **О.А. Дымова** // Литодинамика донной контактной зоны океанов: межд. конф., посвященная 100-летию со дня рождения профессора В.В. Лонгинова, 14–17 сентября 2009 г.: материалы конф. – Москва, 2009. – С. 17 – 19.
21. Демьшев С.Г. Влияние рельефа дна на образование вихрей в проточном бассейне / С.Г. Демьшев, **О.А. Дымова** // Понт Эвксинский: VI межд. науч.-практ. конф. молодых ученых по проблемам водных экосистем, 21–24 сентября 2009 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2009. – С. 40.
22. **Дымова О.А.** Адаптация гидродинамической модели с высоким пространственным разрешением для расчета гидрофизических полей Черного моря / **О.А. Дымова** // Ломоносов – 2010: межд. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 21 – 23 апреля 2010 г.: материалы конф. – Севастополь, 2010. – С. 86 – 87.
23. **Дымова О.А.** Прогностический расчет гидрофизических полей Черного моря для периода январь – сентябрь 2006 года / **О.А. Дымова**, Н.В. Маркова // География, геоэкология, геология: опыт научных исследований: VII межд. науч. конф. студентов и аспирантов, 11–14 мая 2010 г: материалы конф. – Днепропетровск, 2010. – С. 24 – 26.
24. **Дымова О.А.** Восстановление вертикальных скоростей течений в модели циркуляции Черного моря с высоким горизонтальным разрешением / **О.А. Дымова** // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – С. 120 – 124.
25. Демьшев С.Г. Реконструкция мезомасштабной и субмезомасштабной динамики вод и анализ энергетических характеристик у побережья Крыма / С.Г. Демьшев, **О.А. Дымова** // Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России: межд. науч. конф., 15–18 сентября 2014 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2014. – С. 188 – 190.

АННОТАЦИЯ

Дымова О.А. Численный анализ динамики и энергетики мезомасштабных особенностей циркуляции Черного моря. – На правах рукописи.

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

Диссертация посвящена исследованию мезомасштабных особенностей циркуляции Черного моря на основе численной модели динамики МГИ и конечно-разностных аналогов уравнений изменения кинетической и потенциальной энергии. Расчеты выполнены с высоким горизонтальным разрешением и учетом реального атмосферного воздействия, что позволило с достаточной степенью точности воспроизвести изменчивость циркуляции вод с масштабами порядка 10 км. Особое внимание в работе уделено распределению энергетических потоков в прибрежных районах Черного моря, а также изучению механизмов формирования и эволюции мезомасштабных вихрей.

Представлен обзор результатов натурных, численных и лабораторных исследований мезомасштабных вихрей в реальных и идеализированных бассейнах. Освеще-

ны основные механизмы генерации вихревых структур. С учетом имеющихся литературных данных рассмотрены возможные механизмы формирования и эволюции мезомасштабной изменчивости вод Черного моря.

С использованием авторской двумерной нелинейной модели движения жидкости проведены численные эксперименты, на основе которых определено влияние геометрической конфигурации бассейна и параметров потоков через незамкнутые участки границы на структуру поля скорости в идеализированном прямоугольном бассейне с двумя проливами. Показано, что в бассейне воспроизводятся мезомасштабные вихри при нелинейной постановке задачи. Наиболее интенсивные вихри возникают под воздействием осциллирующего потока в бассейне с переменным профилем дна и несимметричным расположением проливов. Вихри формируются при смене направления потока в проливах, струйные течения устанавливаются при максимальной величине модуля скорости в проливах. Анализ баланса слагаемых в уравнении абсолютного вихря скорости показал, что временная изменчивость адвективного слагаемого качественно соответствует изменению завихренности.

Выполнен анализ качества реконструированных термогидродинамических полей Черного моря, полученных при различных параметрах модели циркуляции МГИ. Численные эксперименты проведены с использованием реального атмосферного воздействия. Результаты сравнены с данными наблюдений, что позволило обосновать выбор параметров и аппроксимаций, при которых модель наиболее корректно воспроизводит поля течений, уровня, температуры и солености. Уточнено расположение зон моря, в которых наблюдается наиболее интенсивная мезомасштабная и субмезомасштабная изменчивость, что позволило выбрать районы для проведения анализа динамических и энергетических характеристик циркуляции.

Модифицирована модель динамики МГИ для вычисления компонентов баланса кинетической и потенциальной энергии с учетом стока рек и водообмена через проливы. Рассчитаны и проанализированы интегральные и мгновенные динамические и энергетические характеристики циркуляции вод Черного моря в 2006 г. Изучена среднегодовая и сезонная изменчивость компонентов бюджета кинетической и потенциальной энергии. Исследованы механизмы формирования мезомасштабных вихрей в прибрежных районах Черного моря. Показано, что возможным механизмом генерации мезо- и субмезомасштабных вихрей у побережья Крыма и Северного Кавказа является бароклинная неустойчивость. Основным фактор, определяющий мезомасштабную динамику у южного и юго-восточного побережья, – это орография берега, влияние которой наиболее сильно проявляется при слабых ветрах.

Ключевые слова: численное моделирование, Черное море, мезомасштабная и субмезомасштабная изменчивость, кинетическая энергия, потенциальная энергия, бароклинная неустойчивость, орография берега.

АНОТАЦІЯ

Димова О.О. Чисельний аналіз динаміки та енергетики мезомасштабних особливостей циркуляції Чорного моря. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика. – Морський гідрофізичний інститут НАН України, Севастополь, 2014.

Дисертація присвячена дослідженню мезомасштабних особливостей циркуляції Чорного моря на основі чисельної моделі динаміки та кінцево-різницевих аналогів рівнянь зміни кінетичної і потенційної енергії. Розрахунки виконані з високим просторовим розділенням і урахуванням реального атмосферного впливу, що дозволило з достатнім ступенем точності відтворити особливості циркуляції вод з масштабами порядку 10 км. Особливу увагу в роботі приділено розподілу енергетичних потоків в прибережних районах Чорного моря і вивченню механізмів формування та еволюції мезомасштабних вихорів. Проведена модифікація моделі динаміки МПІ для обчислення компонентів бюджету кінетичної і потенційної енергії з урахуванням стоку річок та водообміну через протоки. Розраховані й проаналізовані інтегральні та миттєві динамічні та енергетичні характеристики циркуляції вод Чорного моря в 2006 р. Вивчена середньорічна і сезонна мінливість компонентів бюджету кінетичної і потенційної енергії. Досліджені такі механізми формування мезомасштабних вихорів в прибережних районах Чорного моря як бароклінна нестійкість, вітровий вплив, орографія берега.

Ключові слова: чисельне моделювання, Чорне море, мезомасштабна і субмезомасштабна мінливість, кінетична енергія, потенційна енергія, бароклінна нестійкість, орографія берега.

SUMMARY

Dymova O.A. Numerical Analysis of the Dynamics and Energetics of the Black Sea Mesoscale Variability. – As manuscript.

The Thesis to claim the academic degree of candidate of physical-mathematical sciences on the specialty 04.00.22 – Geophysics. – Marine Hydrophysical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sevastopol, 2014.

The Thesis is focused on research of the Black Sea mesoscale circulation features by a numerical model of the dynamics and finite-difference analogs of kinetic and potential energy changes equations. Calculations was carried out with high spatial resolution and taking into account the real forcing. With a high degree of accuracy it was allowed to reproduce the circulation features with scale about 10 km. Special attention is paid to the distribution of energy flows in the coastal areas of the Black Sea and study of generation and evolution mechanisms of mesoscale eddies. The modification of MHI dynamic model was made to calculate the components of the kinetic and potential energy budget with taking into account water exchange through the rivers and straights. The integrated and instantaneous dynamic and energetic characteristics of the Black Sea circulation in 2006 were calculated and analyzed. We studied annual and seasonal variability of components of the kinetic and potential energy budget. Such mechanisms of mesoscale eddies formation in the coastal areas of the Black Sea as baroclinic instability, wind effect, shore orography were investigated.

Keywords: numerical modeling, the Black Sea, mesoscale variability, submesoscale variability, kinetic energy, potential energy, baroclinic instability, shore orography.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Дымовой Ольги Алексеевны

Подписано к печати 15.10.2014 г.

Формат бумаги $60 \times 84 \frac{1}{16}$

Объем 0.9 авт.л.

Заказ

Тираж 100 экз.

Напечатано в НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика»
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
Свидетельство о государственной регистрации
серия ДК № 914 от 16.02.2002