

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Дымовой Ольги Алексеевны

«Численный анализ динамики и энергетики

мезомасштабных особенностей циркуляции Черного моря»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика

Диссертационная работа Дымовой О.А. посвящена численному моделированию мезомасштабных особенностей циркуляции и изучению ее динамических и энергетических характеристик на основе анализа уравнений изменения кинетической и потенциальной энергии Черного моря.

Современные дистанционные и контактные исследования показывают, что вклад мезо- и субмезомасштабных структур в динамику прибрежной циркуляции Черного моря весьма существенен. Их изучение возможно на основе численных гидродинамических моделей, способных реалистично воспроизводить картину прибрежной динамики вод моря. Для этого надлежит использовать высокое пространственное разрешение, что позволит более корректно описать турбулентные процессы и обеспечить адекватный отклик системы на реальное атмосферное воздействие. **Актуальность** темы диссертации обусловлена необходимостью минимизировать ошибки при моделировании полей температуры, солености и скоростей течений для систем прогноза и мониторинга состояния черноморского региона. Известно, что вихри в Черном море обуславливают обмен количеством движения, теплом, солью и любыми трассерами между прибрежной и глубоководной частями моря. Для понимания механизмов их генерации и эволюции требуется анализ физических процессов, приводящих к формированию тех или иных особенностей динамики. Такой подход в работе реализован на основе анализа составляющих бюджета кинетической и потенциальной энергии. Так как подобных исследований циркуляции Черного моря, реконструированной с шагом по пространству порядка 1 км, ранее не проводилось, то результаты диссертационной работы представляют теоретический и практический интерес.

Работа выполнена в соответствии с планами научных исследований Морского гидрофизического института (МГИ) в рамках завершенных и действующих научно-исследовательских проектов. **Новизна** результатов, полученных в диссертации, обусловлена использованием модифицированной соискателем трехмерной нелинейной модели МГИ с высоким пространственным разрешением, что позволило воспроизвести вихревые структуры размерами порядка нескольких километров и выявить физические закономерности формирования мезомасштабных особенностей динамики в прибрежных зонах моря на основе анализа энергетических характеристик циркуляции. К новым результатам исследования относятся также научно обоснованные оценки энергетических потоков, определяющих изменение баланса энергии Черного моря под воздействием реальных атмосферных

полей. **Достоверность** результатов моделирования подтверждается многочисленными натурными данными и используемыми современными методами вычислительной гидродинамики. Сформулированные в работе выводы соответствуют известным результатам других исследователей.

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

Во **Вступлении** обосновывается актуальность темы диссертации, показана ее связь с научными темами МГИ и международными проектами, формулируются 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 **Первом разделе** дан обзор литературы по вопросам моделирования мезомасштабных вихрей в Мировом океане и в Черном море. В рамках нелинейной теории длинных волн исследуется возникновение и развитие вихрей и течений в прямоугольном бассейне с двумя проливами. Задача решается численно с помощью авторской двумерной модели, основу которой составляет явная конечно-разностная схема второго порядка точности по времени и по пространству. В качестве вынуждающей силы на границе пролив – бассейн задается поле скоростей в виде осциллирующего потока. Расчеты проведены для различных геометрических конфигураций бассейна и параметров потоков в проливах. Показано, что в ряде случаев, определяемых конфигурацией бассейна, возникают вихревые структуры. Наиболее интенсивные вихри формируются в бассейне переменной глубины с несимметричным расположением проливов. Для исследования причин возникновения вихрей изучен баланс слагаемых в уравнении вихря. По результатам численных расчетов получены интегральные распределения всех слагаемых в уравнении вихря и установлена связь между соотношением вязкостных и адвективных членов и структурой поля скорости в бассейне. Выявлено, что основной вклад при образовании мезомасштабных вихрей дает адвекция по параллели, при этом адвективное слагаемое качественно соответствует изменению завихренности.

Во **Втором разделе** представлены результаты исследования параметров модели циркуляции Черного моря, которые влияют на качество реконструированных термогидродинамических полей. Целью раздела было подобрать коэффициенты и параметризацию, при которых модель наиболее точно воспроизводит поля течений, уровня, температуры и солености по сравнению с данными спутниковых измерений и гидрологических съемок. На основе трехмерной нелинейной модели МГИ проведено три эксперимента по моделированию гидрофизических полей Черного моря в 2006 г. В качестве краевых полей в модели использованы поля тангенциального напряжения трения ветра, полного потока тепла, испарения и осадков, полученные по данным региональной атмосферной модели “ALADIN”. В

первом эксперименте изучено влияние горизонтального разрешения на способность модели воспроизводить синоптическую и мезомасштабную динамику вод моря. Полученные поля сравнены с аналогичными данными, рассчитанными с грубым пространственным разрешением, и с данными наблюдений. Во втором эксперименте для описания вертикального турбулентного обмена импульсом и вертикальной турбулентной диффузии тепла и соли применена параметризация Меллора-Ямады 2.5. Результаты эксперимента сравнены с расчетом, проведенным с использованием параметризации Пакановски-Филандера. Третий эксперимент проведен с целью оценить влияние величины коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии на точность моделирования полей температуры и солености. По итогам предварительных численных экспериментов были подобраны оптимальные параметры модели для реконструкции термогидродинамических характеристик Черного моря в 2006 г. и на основе анализа результатов выбраны зоны моря с наиболее интенсивной мезомасштабной и субмезомасштабной изменчивостью для проведения дальнейшего анализа энергетических характеристик циркуляции.

В Третьем разделе приведены конечно-разностные аналоги уравнений изменения кинетической и потенциальной энергии, на основе которых проведена модификация программного кода модели МГИ. Дискретные уравнения получены с учетом стока рек и водообмена через проливы. Рассчитаны и проанализированы интегральные и мгновенные энергетические характеристики циркуляции для всего Черного моря. Построены диаграммы направлений и величин потоков энергии и на их основе изучена среднегодовая и сезонная изменчивость компонентов бюджета кинетической и потенциальной энергии. Показано, что 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. Исследованы некоторые механизмы формирования мезомасштабных вихрей в прибрежных районах Черного моря. Выявлено, что возможным механизмом генерации мезо- и субмезомасштабных вихрей у побережья Крыма и Северного Кавказа является бароклинная неустойчивость. Основной фактор, определяющий мезомасштабную динамику у южного и юго-восточного побережья, – это орография берега, влияние которой наиболее сильно проявляется при слабых ветрах.

Заключение содержит основные результаты работы и выводы.

Научная и практическая значимость полученных результатов заключается в том, что модифицированная автором 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 бароклинной неустойчивости Основного черноморского течения и ветрового воздействия в формировании и эволюции мезомасштабных вихрей. Рассчитанные трехмерные поля течений,

температуры, солености и поле уровня могут быть использованы 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.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе. Поставленные в диссертационной работе задачи были решены с помощью нелинейной термогидродинамической модели МГИ, признанной одним из ведущих инструментов исследования динамики Черного моря. В настоящий момент версия модели с разрешением 5 км по горизонтали успешно используется в системе диагноза и прогноза Центра морских прогнозов в Черном море, который входит в международную сеть прогностических центров «*My Ocean 2*». Валидация модифицированной автором версии модели выполнена на основе современных дистанционных и контактных наблюдений. Использованы спутниковые данные о температуре поверхности моря, уровне моря, натурные измерения температуры по данным термопрофилирующих буев с термокосой, а также измерения температуры и солености с помощью высокоточных погружаемых цифровых CTD-зондов.

Основные материалы диссертации отражены в 25 публикациях, из них 10 – в научных журналах и в сборниках научных трудов, 15 – в сборниках тезисов международных научных конференций. 3 публикации включены в международную наукометрическую базу “*SCOPUS*”, 5 работ выполнены без соавторов.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Тем не менее, работа не лишена ряда неточностей:

1. В п. 2.2 второго раздела следовало бы более подробно описать упрощения, принятые при постановке задачи, с указанием их обоснованности.

2. В тексте не описана процедура согласования гидрофизических и атмосферных полей в начальный момент времени, хотя указано, что эти данные взяты из разных источников.

3. При сравнении результатов моделирования с данными контактных наблюдений выявлено хорошее согласование между модельной и измеренной температурой и некие расхождения в данных по солености в слое 50 – 150 м (п. 2.3.3). Однако, в тексте не выдвигается никаких предположений о причинах такого несоответствия.

Соответствие работы выбранной специальности. Несмотря на указанные выше замечания, диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой решение научно важной и практически значимой задачи исследования механизмов формирования мезомасштабных особенностей циркуляции вод в прибрежных зонах Черного моря на основе анализа энергетических характеристик и содержит новые результаты в области физики моря. Таким образом, считаю, что по актуальности темы,

новизне, научной и практической значимости полученных результатов, объему и оформлению работа полностью **соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**, а ее автор Дымова Ольга Алексеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика.

Доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
математического анализа
Таврического национального
университета им. В.И. Вернадского

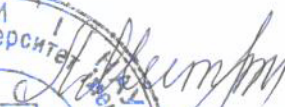


Н.Д. Копачевский

Подпись Копачевского Н.Д.

Заверяю:

Ученый секретарь
Таврического национального
университета им. В.И. Вернадского



Л.М. Митрохина