

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Шульги Татьяны Яковлевны на тему: «Моделирование динамики вод и переноса субстанции в Азовском море», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.6.17. Океанология

Актуальность темы диссертационного исследования не вызывает сомнения и связана с необходимостью формирования стратегии, направленной на снижение последствий естественных и техногенных катастроф под влиянием климатических и антропогенных факторов. Особенную актуальность эта задача представляет для Азовского моря. Замкнутость и мелководность моря, ограниченный водообмен с Мировым океаном, а также развитая промышленная инфраструктура на побережье существенно повышают зависимость гидрометеорологического режима Азовского моря, его термохалинной структуры при антропогенном воздействии и региональных проявлениях глобальных климатических изменений. Успешное и безопасное выполнение проектно-исследовательских работ, проводимых в Азовском море, требует знаний о циркуляции вод, особенностях течений и трансформации загрязнений, поступающих в морскую среду. Имеющиеся натурные наблюдения не обеспечивают регулярные прогнозы динамики вод, что приводит к необходимости применения численных моделей в качестве основного инструмента исследований, что обуславливает актуальность темы диссертационного исследования.

Диссертационная работа посвящена численному анализу сгонно-нагонных явлений и течений в Азовском море, возникающих под действием наблюдаемых и гипотетических метеорологических условий. Выполнен анализ физических условий, приводящих к усилению экстремальных природных явлений, являющихся источником потенциальной опасности для населения. Результаты исследования позволяют уточнить современные представления о динамике течений и сгонно-нагонных процессах, характере горизонтальной и вертикальной эволюции оптически активной субстанции и термохалинной структуре Азовского моря.

Структура и содержание диссертационной работы. Структура работы соответствует целям и задачам диссертационного исследования и состоит из Введения, семи глав, Заключения и библиографического списка, содержащего 257 источников. Объем работы на русском языке составляет 298 страниц.

Основные результаты, полученные в диссертации. В ходе исследования автором получены выводы, основанные на численных прогнозах с использованием трехмерной гидродинамической и регрессионных моделях, о последствиях проявления опасных региональные климатических изменений, которые могут усиливать или ослаблять негативные последствия хозяйственной деятельности в Азовском море.

Во **введении** представлены цели и задачи работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Обсуждаются актуальность и новизна исследования, его теоретическая и практическая значимость, а также достоверность полученных результатов. Приводится список публикаций и конференций, где были представлены результаты исследования. В **первом** разделе дано физико-географическое описание Азовского моря, проводится подробный анализ результатов исследований, приведенных в литературных источниках, посвященных изучению динамики вод Азовского моря. Дается описание современной трехмерной гидродинамической модели с криволинейными координатными, используемой для численного прогнозирования, а также приведены уравнения движения,

записанные в приближениях несжимаемости, гидростатики и Буссинеска, уравнения турбулентного обмена, и условия адаптации модели к региональным особенностям Азовского моря. **Второй** раздел посвящен описанию математических моделей, обеспечивающих постановку начальных условий на свободной поверхности, описывающих гипотетические сценарии метеорологических условий и моделей начального содержания субстанций в морской среде для задания начальных условий в гидродинамической модели. Предложенные модели позволяют варьировать геометрические и эволюционные параметры атмосферных возмущений, содержание и время поступления субстанций в морскую среду. В **третьем** разделе сделаны выводы, основанные на результатах численных прогнозов модели РОМ, демонстрирующие зависимость стационарной циркуляции в Азовском море от направления квазистационарного ветра. Сделаны выводы о стабильности стационарных течений в море при нарушении стационарной атмосферной циркуляции. Дана оценка влияния учета условий прохождения жидкости через Керченский пролив при моделировании на течения и отклонения уровня Азовского моря под действием атмосферных возмущений, заданных как теоретическими, так и прогностическими сценариями. В **четвертом** разделе численно исследована гипотеза о роли резонансного механизма в возникновении максимальных амплитуд отклонений уровня моря, вызванных прохождением атмосферного фронта. Выводы основаны на анализе результатов трехмерного моделирования и сравнительном спектральном анализе, позволившем получить амплитудно-фазовые характеристики свободных колебаний уровня после прохождения атмосферного фронта со скоростью свободной длинной волны. В **пятом** разделе представлены результаты численного прогноза размеров затопления/осушения побережья Азовского моря, полученного с использованием подхода, предложенного в диссертационной работе. В этом разделе приведены результаты численного прогноза последствий экстремальных циклонов в марте 2013 г. и сентябре 2014 г., показавшие хорошее согласование с данными прямых наблюдений отклонений уровня моря и протяженности областей затопления. В **шестом** разделе сделаны выводы о характере эволюции и общем содержании оптически активной субстанции в Азовском море в 2013, 2014 гг., основанные на численном анализе с использованием предложенных процедур усвоения коэффициентов яркости моря из стандартных спутниковых продуктов (MODIS-Aqua/Terra) в трехмерную гидродинамическую модель. В **седьмом** разделе сделаны выводы климатических трендов наблюдаемой *in situ* температуры и солености Азовского моря по океанографическим данным за 1913–2018 гг. На основании предложенных сезонных регрессионных моделей, связывающих данные *in situ* измерений с биооптическими показателями, полученных в рамках регионального биооптического алгоритма, восстановлена поверхностная соленость Азовского моря с марта по август 2000–2018 гг. Результаты восстановления солености показали хорошее соответствие с наблюдаемой климатологической изменчивостью солености в центральной части Азовского моря. В **заключении** представлены результаты проведенного исследования, работа заканчивается выводами, которые соответствуют поставленной цели и задачам работы.

Обоснованность научных положений и выводов. Научные положения и выводы, представленные в диссертационном исследовании, обоснованы применением проверенной методологии и современных методов анализа как эмпирических данных, так и результатов гидродинамического моделирования, описывающих рассматриваемые процессы. В работе использовался как сводный анализ обширных океанографических данных за более чем 100 лет, так и детальное рассмотрение отдельных событий. Хорошее соответствие между

результатами численных расчетов и данными наблюдений, также свидетельствует об обоснованности полученных результатов.

Достоверность полученных результатов следует из использования современных и исторических данных контактных и дистанционных наблюдений; математического аппарата, основанного на решении системы примитивных уравнений гидродинамики океана и из сопоставления получаемых решений с известными в литературе, натурными данными и данными прямых измерений.

Научная новизна. Следующие результаты диссертационной работы обладают научной новизной и получены впервые.

В работе предложены новые методы и апробированы математические модели, оформленные в виде программных кодов, дополняющих вычислительный комплекс трехмерной гидродинамической модели позволяющие:

- учитывать возможные метеорологические сценарии граничных условий на свободной поверхности;
- использовать данные дистанционного зондирования для маркирования субстанций при задании начальных условий уравнений переноса и диффузии;
- учитывать различные условия прохождения жидкости через Керченский пролив при моделировании;
- выполнять прогнозы затопления/осушения морского побережья;
- выполнять оперативное усвоение данных дистанционного зондирования на регулярную сетку исследуемого бассейна.

Получены новые данные по результатам численных экспериментов, воспроизводящих исторические штормы, послужившие причиной катастрофических наводнений в дельте Дона и Таганрогском заливе (март 2013 г., сентябрь 2014 г.), верифицированные по данными наблюдений о ходе уровня моря и протяженности областей затопления. Получены результаты численного прогноза экстремальных скоростей течений и отклонений уровня моря на северном створе Керченского пролива, вызванных антициклонами с северных румбов (декабрь 2015 г., февраль 2017 г.).

Впервые численно исследовано влияние резонансного механизма в возникновении волн с максимальными амплитудами, генерируемых перемещающимся барическим фронтом. Предложена простая математическая модель, имитирующая движение барической депрессии, позволяющая выполнять прогоны модели при различных параметрах. Выполнен спектральный анализ свободных и вынужденных колебаний уровня на береговых станциях Азовского моря.

Предложен метод совместного использования результатов численного моделирования и данных дистанционного зондирования, на основе разработанных и протестированных процедур однократного и регулярного усвоения спутниковых данных в трехмерную модель РОМ. Впервые получены оценки содержания оптически активной субстанций в Азовском море за 2013–2014 гг.

Предложен новый метод восстановления солености Азовского моря на основании использования регрессионных моделей, связывающих данные дистанционного зондирования с измерениями *in situ*. Метод апробирован и верифицирован для сезонных регрессий по четырем биооптическим параметрам по климатическим данным экспедиционных наблюдений за 2000–2018 гг. Определен эффективный биооптический параметр с точки зрения наилучшей корреляции с наблюдаемыми климатическими средними.

Вопросы и замечания к представляемой работе. В работе имеются отдельные стилистические погрешности и опечатки. Однако, в целом отмеченные недостатки не снимают научно-практическую ценность проведенного исследования

1. В разделе 2.1.2.3, стр.68 предлагается модель индикатора оптически активных субстанций по значениям коэффициентов яркости моря данных дистанционного зондирования. Возникает вопрос о пригодности представленных индикаторов для обнаружения и непрерывного мониторинга качества воды в других морских бассейнах.
2. Также представленные в разделе 7 регрессионные модели получены только для весеннего и летнего сезонов. В этой связи, возникает вопрос о достоверности данных о внутри межгодовой изменчивости солености, приведенной в табл. 7.1.1 в п. 7.1? Разумнее было бы применение метода периодически коррелированных случайных процессов, что дало бы сразу выход на межгодовую и, возможно, даже климатическую изменчивость.
3. В п. 7.3 читаем: «Коэффициент поглощения света цветными обломками...», имеется в виду на русском языке «Коэффициент поглощения света окрашенными растворенными органическими веществами...»? Рисунок 3.1. в тексте представлен в столь размытом виде, что из него трудно извлечь полезную информацию.

С учетом всего вышесказанного полагаю, что диссертация Шульги Татьяны Яковлевны на тему: «Моделирование динамики вод и переноса субстанции в Азовском море» соответствует научной специальности 1.6.17. Океанология. Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему. В работе получены новые и практически важные результаты, которые могут быть использованы для решения научных и прикладных задач, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Нарушений пунктов 9, 11 Порядка присуждения Санкт-Петербургским государственным университетом соискателем ученой степени доктора наук мною не установлено. Диссертация соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени доктора наук, установленным приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете» и рекомендована к защите в СПбГУ.

Член диссертационного совета

профессор кафедры компьютерного моделирования
и многопроцессорных систем СПбГУ,
доктор технических наук,



А. Б. Дегтярев

26.12.2024