

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

Целью исследования является численный прогноз последствий опасных метеорологических явлений и антропогенного воздействия на акваторию Азовского моря и его побережье.

Актуальность работы обусловлена выбором района исследования – бассейна Азовского моря, являющегося основой промышленной и транспортной деятельности, а также объектом потенциальной опасности для населенных пунктов, расположенных вдоль его побережья. В мелководном Азовском море, при реальном быстро меняющемся ветровом воздействии происходят изменения в скорости течений и уровня поверхности, зависящие от того, находилось ли море до начала воздействия в покое, или в нем существовали ранее сформировавшиеся квазистационарные течения. Для оценки возникающих рисков в открытом море и прибрежных районах используются результаты численного моделирования известной гидродинамической модели РОМ. Азовское море относится к водоемам, испытывающим повышенное антропогенное воздействие. Здесь могут быть выбросы загрязняющих веществ с судов, рек, поверхностного стока, осадков. Поэтому возможность выяснить как загрязняющие вещества распространяются в водоеме при различных атмосферных ситуациях, имеет большое значение для прогнозирования экологических рисков. В работе предложен метод использования биооптических индексов, полученных из продуктов дистанционного зондирования, позволяющий выполнять оценку и прогноз распределения солености в Азовском море, используя наряду с традиционными судовыми измерениями и результатами моделирования данные современных спутниковых наблюдений.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает в себя Введение, семь глав, Заключение и библиографический список, который содержит 257 источников. Объем работы на русском языке составляет 298 страниц.

Основные результаты, полученные в диссертации. 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* дается физико-географический обзор изучаемой области, и проводится подробный анализ литературных источников, посвященных динамике вод в Азовском море. Здесь также приведены уравнения движения и турбулентного обмена, используемые в трехмерной нелинейной модели, и условия адаптации модели к региональным особенностям бассейна Азовского моря. Во *втором разделе* приведено подробное описание математических моделей, обеспечивающих задание возможных сценариев атмосферных возмущений и начального содержания загрязняющей примеси в Азовском море. Эти модели позволяют варьировать параметры атмосферных возмущений и загрязнений и используются в качестве начальных и граничных условий при проведении серий численных экспериментов. В *третьем разделе* изложены результаты численного

моделирования с использованием модели POM, адаптированной к Азовскому морю, которые показали зависимость экстремальных значений отклонений уровня, скорости поверхностных и глубинных стационарных течений от направления и скорости постоянного ветра. Сделаны выводы, что учет существующих стационарных течений в море позволяет добиться лучшего соответствия результатов моделирования данным натурных наблюдений при нестационарном атмосферном воздействии. В *четвертом разделе* выполнен анализ результатов моделирования свободных колебаний уровня Азовского моря, возникающих после прекращения действия устойчивого ветра, который позволил установить физические закономерности пространственного распределения колебаний уровня и течений и изменения скорости течений. Численно проверена гипотеза о роли резонансного механизма в возникновении сейш, при прохождении атмосферного фронта. В *пятом разделе* приведен пример конечных продуктов, получаемых при использовании метода определения размеров затопления/осушения, предложенного в диссертационной работе. На основании его использования можно получать предупреждения о прибрежных наводнениях (осушениях), возникающих вследствие устойчивых сгонных (нагонных) ветров, а также под действием прогностического ветра. В этом разделе приведены результаты сопоставления смоделированных отклонений уровня моря на береговых станциях Азовского моря с данными наблюдений на метеорологических станциях во время экстремальных приазовских явлений 23–24 марта 2013 г. и 24–25 сентября 2014 г. Получено подтверждение наблюдаемых особенностей этих штормов у побережья Азовского моря (максимальные значения сгонов и нагонов, скорости течений, протяжённость области затопления). В *шестом разделе* выполнено сравнение времени рассеяния, и максимальной площади, и объёма проникновения примеси (с постоянными и переменными начальными распределениями ее концентрации) при квазистационарном режиме, при наличии циклона и порывах нестационарного ветра. Выводы о характере эволюции и оценка общего содержания оптически активной взвеси в Азовском море в 2013 и 2014 гг. основано на анализе результатов численных экспериментов, выполненных с использованием разработанных подпрограмм усвоения стандартных спутниковых продуктов (MODIS-Aqua/Terra) в трехмерную гидродинамическую модель POM. В *седьмом разделе* выполнен анализ термохалинной структуры Азовского моря по данным океанографических банков *in situ* наблюдений за 1913–2018 гг. Сделаны выводы и многолетних средних значения температуры и солёности, построены климатические тренды, выделены периоды осолонения/опреснения Азовского моря. В данном разделе дано описание метода восстановления солёности на основе полученных сезонных регрессионных моделей, связывающих натурные данные измерений с региональными биооптическими показателями Азовского моря, протестированного для периода 2000–2018 гг. Использование моделей восстановления солёности позволит удешевить определение солёности прямыми способами, восполнить пробелы в гидрохимическом исследовании Азовского моря в прошлые годы и расширить представления о процессах циркуляции водных масс.

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 механики жидкости, 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. В диссертационной работе проведен всесторонний анализ динамических процессов, возникающих в Азовском море, возникающих при стационарных, нестационарных и прогностических метеорологических сценариях. Несмотря на многочисленные исследования Азовского моря, автору удалось расширить существующее знания в этой области. Исследована структура квазистационарных течений на различных горизонтах моря, и показана их нестабильность при нестационарном атмосферном воздействии. Впервые численно исследовано возникновение волн с максимальными амплитудами, генерируемых движением барической депрессии. Выполнен спектральный анализ свободных и вынужденных колебаний уровня моря на береговых станциях Азовского моря. Получены амплитудно-фазовые характеристики свободных колебаний на частотах энергонесущих максимумов с помощью Фурье-анализа для смоделированных временных рядов отклонений уровня моря.

Использование авторских процедур позволяет получить выводы о протяженности областей прибрежных наводнений (осушений), содержании и распространении загрязняющих примесей в Азовском море в зависимости от эволюционных и геометрических параметров областей начального содержания загрязнений и атмосферных возмущений. Эти результаты могут быть использованы для рекомендаций по снижению антропогенной нагрузки и риска наводнений в Азовском море. Автором предложены методы, позволяющие выполнять прогнозирование экологических и климатических рисков, объединяющие результаты моделирования, дистанционные наблюдения и измерения *in situ*. В рамках региональной биооптической модели протестированы регрессионные модели восстановления солености по данным MODIS с пространственным разрешением 1 км за период 2000–2018 гг., результаты которых существенно повышают информативность о распределении солености в Азовском море.

Основные замечания к представляемой работе.

1. В чем физический смысл «условия свободного протекания» (равенство нулю производной нормальной составляющей скорости к жидкой границе) на черноморской оконечности Керченского пролива, описанный в подразделе 1.3 в подписи к рис. 1.3.1?
2. В подразделе 4.2 утверждается, что рассматривается прохождение над морем плоского фронта, тогда почему на рис. 4.2.2 *a* поле атмосферного давления представлено круговыми изолиниями? Как определялись экстремумы амплитуд сейшеобразных колебаний, приведенные в табл. 4.2.1? Также в тексте есть опечатка в ссылке на рисунок 4.2.2.
3. В подразделе 6.4 приведены результаты воспроизведение эволюции оптически активной пассивной взвеси с использованием модели POM. Каким образом интегрируются уравнения переноса-диффузии для коэффициент обратного рассеяния света нелинейной размерности (m^{-1})?
4. В разделе 7 в моделях восстановления солености использована функция линейного тренда (см. подраздел 7.4), почему сделан данный выбор? Почему при расчете коэффициента поглощения света фитопланктоном (подраздел 7.3) коэффициенты яркости моря выбраны для волн 645, 667, 678 нм, тогда как в других источниках они рассчитываются для волн 490, 550, 665 нм?

5. В подразделе 7.3 на стр. 250 неудачное определение «Коэффициент поглощения света цветными обломками...», которое принято в иностранной литературе, на русском языке более понятным было бы определение «Коэффициент поглощения света окрашенными растворенными органическими веществами...».

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 законченную 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,
ведущий научный сотрудник
лаборатории механики сложных жидкостей
Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,
д.ф.-м.н., профессор

В. В. Булатов

05.11.2024

подпись В. В. Булатова
Зам. канцелярией
05 11 2024

