



14 November 2024

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 диссертационной работы Шульги Т.Я. связана с востребованностью регулярной информации о состоянии вод морских бассейнов, являющихся основой промышленной и транспортной деятельности, а также источником потенциальной опасности для населения прибрежных районов. Существенные изменения, происходящие в Азовском море, обусловленные возросшей антропогенной нагрузкой и изменениями климата являются причиной возникновения опасных явлений, требующих своевременного принятия решений, опирающихся на научные выводы по результатам анализа численных прогнозов и наблюдений. Научный и практический интерес исследования обоснован использованием математических моделей для получения качественного представления о физических явлениях и анализа теоретических гипотез, связанных с учетом различных физических закономерностей в реальных морских бассейнах без проведения дорогостоящих натурных измерений. Новые экспериментальные и технические возможности, правильная интерпретация данных современных наблюдений, получаемых при зондировании морской поверхности из космоса, определяют актуальность совершенствования и дополнения моделей динамики морской среды новыми математическими процедурами, позволяющими расширить возможности оперативного океанологического и экологического мониторинга.

Получение надежных, своевременных выводов, направленных на снижение рисков при опасных гидродинамических и атмосферных условиях, а также рисков, связанных с использованием прибрежной среды и других факторов деятельностью человека, определяющих состояние экосистемы Азовского моря являются целью представленной работы.

Диссертация изложена на 298 страницах машинописного текста, состоит из введения, семи глав, заключения, выводов, списка литературы, включающего 257 источников. Работа иллюстрирована 43 таблицами и 68 рисунками.

Во введении дано обоснование актуальности исследования, сформулированы цель и задачи исследования, освещены его научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, вынесенные на защиту, представлена информация об апробации работы, объеме и структуре диссертации. В первом разделе дан подробный анализ имеющейся океанографической информации, посвященной современным и историческим исследованиям опасных явлений в Азовском море по результатам наблюдений и моделирования. Дано описание уравнений трехмерной нелинейной сигма координатной модели Princeton Ocean Model, выбранной в качестве одного из инструментов исследований и адаптации модели к региональным особенностям бассейна Азовского моря. Во втором разделе представлено математическое описание моделей атмосферных возмущений, используемых для задания граничных условий в трехмерной гидродинамической модели, указаны геометрические и эволюционные параметры, позволяющие задавать метеорологические сценарии в численных экспериментах. Здесь также приведено аналитическое описание моделей содержания субстанций в морской воде, используемых в качестве начальных условий при решении уравнений переноса и диффузии. В третьем разделе представлены численные оценки влияния учета водообмена через Керченский пролив при моделировании на течения и отклонения уровня Азовского моря под действием атмосферных возмущений, заданных как теоретическими, так и прогностическими сценариями. Получены выводы о стабильности стационарных течений при нестационарных метеорологических условиях, исследовано влияние интенсивности и направлений действующего ветра на экстремумы сгонов, нагонов, скорости течений на различных горизонтах моря. В четвертом разделе дан анализ результатов моделирования свободных колебаний уровня Азовского моря, возникающих после прекращения действия устойчивого сгонно-нагонного ветра, а также при прохождении атмосферного фронта по направлению Генчешек – Ейск с резонансными параметрами. Сравнительный спектральный анализ результатов экспериментов позволил выделить частоты энергонесущих максимумов и получить амплитудно-фазовые характеристики свободных колебаний. Пятый раздел посвящен численному исследованию нестационарной циркуляции вод Азовского моря, обусловленной перемещением гипотетических и прогностических циклонов/антициклонов. Результаты численных прогнозов последствий опасных явлений, связанных с прохождением циклонов/антициклонов сопоставлены с данными прямых наблюдений за отклонениями уровня на береговых станциях. Результаты моделирования экстремальных явлений 2013 и 2014 гг. подтвердили наблюдаемые особенности этих штормов у побережья Азовского моря на основании сравнения максимальных сгонов и нагонов, протяженности областей затопления. В шестом разделе дан анализ экологического состояния вод Азовского моря на основе анализа содержания и масштабов эволюции субстанций в морской воде. Прогноз наибольшего и общего содержания оптически активной субстанции в Азовском море в 2013 и 2014 гг., получен с использованием разработанных и протестированных процедур усвоения коэффициентов яркости стандартных продуктов MODIS-Aqua/Terra моря в трехмерную гидродинамическую модель. В заключительном седьмом разделе приведены результаты анализа климатических данных прямых измерений температуры и солености Азовского моря за период с 1913 по 2018 гг. Сезонная и пространственная обеспеченность дистанционно зондируемой информации позволила получить региональные модели для восстановления поверхностной солености на основе статистически значимых связей с данными натуральных измерений. Результаты восстановления солености с марта по август 2000–2018 гг. сопоставлены с наблюдаемыми климатическими средними. Показано хорошее согласование смоделированной солености с наблюдаемой климатологической изменчивостью в центральной части Азовского моря. В заключение представлены результаты проведенного исследования, работа заканчивается выводами, которые соответствуют поставленной цели и задачам работы.

Степень достоверности и обоснованности полученных результатов и выводов подтверждается статистически значимыми объемами, репрезентативностью и обеспеченностью используемых данных, полученных из океанографических банков данных, атмосферной модели, продуктов дистанционного зондирования, соответствующих цели, задачам и методологии диссертационной работы. Полученные в ходе исследования результаты проанализированы с применением адекватных статистических методик, с использованием математических моделей, реализующих решение системы примитивных уравнений гидродинамики океана и современного программного обеспечения. Достоверность выводов работы подтверждается публикациями в рецензируемых журналах и их апробацией на научных конференциях.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в совершенствовании системы прогнозирования последствий экстремальных явлений на основе анализа результатов численных прогнозов и данных наблюдений. Научный и практический интерес представляет исследование циркуляции в замкнутых мелководных бассейнах, обладающих специфическими особенностями, заключающимися в повышенной чувствительности вод к изменению атмосферных и антропогенных условий. Предложенная методика проведения численных экспериментов с использованием моделей атмосферных возмущений, позволяющих варьировать их геометрические и эволюционные параметры делает возможным прогнозирование условий нарушения устойчивости стационарных течений, и атрибутирование факторов, обуславливающих экстремальную динамику вод в мелководном замкнутом бассейне Азовского моря.

Областью применения результатов исследования является научное сообщество, оперативные и экологические службы региона. Результаты исследования расширяют представление о гидродинамических и термохалинных процессах в Азовском море и могут использоваться в качестве прогноза текущей и будущей эволюции морской экосистемы, а также для рекомендаций по снижению антропогенной нагрузки и риска наводнений. Практическое значение имеет разработанный совместно с соавтором «Термохалинный электронный Атлас Азовского моря», в котором объединены смоделированные и зарегистрированные данные о температуре, солености и основных биооптических показателях морской воды.

Научная новизна диссертационной работы заключается в научно обоснованных выводах необходимых для выбора стратегий по смягчению последствий изменения климата и определению мер по снижению рисков при опасных метеорологических явлениях в бассейне Азовского моря, а также рисков, связанных с использованием прибрежной среды и других антропогенных факторов. Новые процедуры, дополнившие гидродинамическую модель позволили получить численный прогноз скорости течений на различных горизонтах моря, отклонений уровня моря, масштабов затопления/осушения и эволюции субстанций, возникающих при экстремальных стационарных, нестационарных и прогностических метеорологических сценариях. Впервые численно исследовано возникновение волн с максимальными амплитудами, генерируемых движением барической депрессии с резонансными параметрами. Выполнен спектральный анализ и получены амплитудно-фазовые характеристики свободных колебаний на частотах энергонесущих максимумов для смоделированных отклонений уровня моря. В диссертационной работе предложены новые методы, позволяющие прогнозировать экологические и климатические риски в бассейне Азовского моря, основанные на анализе гетерогенных данных, объединяющих результаты моделирования, дистанционные наблюдения и прямые измерения *in situ*. Очевидным достоинством работы является разработанные автором регрессионные модели, связывающие региональные биооптические показатели с наблюдаемой климатической соленостью, результаты использования которых существенно повышают информативность о термохалинной структуре Азовского моря.

Замечания и вопросы по диссертационной работе. Принципиальных замечаний по диссертации нет. В работе имеются отдельные стилистические погрешности и опечатки. Однако, в целом отмеченные недостатки не снимают научно-практическую ценность проведенного исследования. Мои комментарии ниже, скорее, предложения на будущее, на дальнейшее развитие моделей, методов и наблюдений диссертации, чем критика изложенных материалов.

1. Я родился и вырос на Азовском море, в Мариуполе. В городе на два десятка километров вдоль берега расположен завод «Азовсталь», который, как в Мариуполе считалось, сбрасывал отходы производства в море. Насколько большим было его влияние на экологию? Если это было существенным, то каких изменений можно ожидать, и как скоро, теперь, когда производство на «Азовстали» прекратилось с марта 2022-го года и, скорее всего, уже не возобновится?
2. Если Вы намерены продолжать исследование Азовского моря в будущем, то как Вам представляется возможность сотрудничества с Приазовским университетом в Мариуполе? Насколько мне известно, университет, который был полностью разрушен в ходе боёв марта-апреля 2022-го года, восстановился и возобновил свою деятельность.
3. Последние 10+ лет в моделировании океана активно развиваются подходы, которые используют связь мелкомасштабных процессов в океане, таких как волны или турбулентность, с крупномасштабными процессами в атмосферном погранслое и верхнем слое океана напрямую, а не через параметризации. В море, например, волны создают дополнительные течения и турбулентность, которые влияют на перемешивание, перенос донных осадков и взвешенной субстанции, потоки тепла, обмен газом, биогеохимию, nutrient transport и biomass production и т.д. Есть ли планы включить такой coupling в Ваши модели на следующем этапе и какие Вы ожидаете от этого эффекты?
4. Каковы аргументы того, что разработанные методы и модели Вашего исследования могут быть использованы в других морских бассейнах? Например, Азовское море по размерам только немногим больше Port Phillip Bay, где находится Мельбурн. В Австралии ведётся активное моделирование PPV, и здесь есть разные измерения для validation and calibration таких моделей. Можно ли применить Вашу модель и Ваш подход для Port Phillip Bay? Хотя PPV связан с Южным океаном только через узкий пролив, не шире Керченского, но главное отличие от Азовского моря будет в том, что за проливом находится настоящий океан. Приливные течения в проливе достигают 3 м/с, меняют направление два раза в сутки и существенно влияют на циркуляцию в заливе. Заходит через пролив и зыбь, так как волны в Южном океане – самые большие в мире, и штормит круглый год, в отличие от Северной Атлантики, Северного Тихого океана или Чёрного и Азовского морей.
5. По результатам исследования сделан вывод о характере сейшевых колебаний, возникающих после прохождения барического фронта. Можно ли задавать с помощью аналитической модели разделение акватории моря на области повышенного и пониженного давления?
6. Азовское море относится к одному из наиболее изученных бассейнов. В чём отличие результатов, полученных в данном исследовании от результатов других исследований, выполненных с использованием трехмерных гидродинамических моделей?

С учетом всего вышесказанного полагаю, что диссертация Шульги Татьяны Яковлевны на тему: «Моделирование динамики вод и переноса субстанции в Азовском море» соответствует специальности 1.6.17. Океанология. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные результаты, использование 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



Alexander Babanin

Professor, Ocean Engineering

Adjunct Professor, Swinburne University of Technology

Director, Centre for Disaster Management and Public Safety (CDMPS)