



«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор Южного
федерального университета,
доктор химических наук, с.н.с.

А.В. Метелица

«14» октября 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» (ЮФУ) о научно-практической значимости диссертации Шульги Татьяны Яковлевны на тему «Моделирование динамики вод и переноса субстанции в Азовском море», представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.6.17. Океанология

Актуальность темы диссертационной работы

На современном этапе развития России важная роль отводится формированию государственной стратегии, направленной на снижение последствий естественных и техногенных катастроф. Она должна опираться на научно обоснованные методы прогнозирования и своевременное оповещение населения, что определяет потребность в проведении фундаментальных и прикладных научных исследований, разработку и усовершенствование методов мониторинга и предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций. Востребованность практической информации и данных, необходимых для выбора стратегий по смягчению последствий изменения климата, определению мер по снижению уязвимости Азовского моря и его прибрежных районов при экстремальных метеорологических условиях обуславливает актуальность темы диссертационной работы.

Актуальным является выбранный для исследования бассейн Азовского моря, расположенный в густонаселенном районе и являющийся основой промышленной и транспортной деятельности прибрежных районов, а также источником потенциальной опасности для населения. Прогноз последствий опасных явлений, влияющих на безопасность и эффективность эксплуатации морского транспорта и прибрежной инфраструктуры является актуальным не только при воспроизведении наблюдаемых региональных экстремальных явлений, но и для атрибутирования теоретических сценариев потенциальной опасности, которые заданы аналитически с помощью математических моделей.

Имеющийся объем натурных наблюдений не обеспечивает получение надежных данных о гидродинамических процессах, возникающих в море при различных синоптических условиях, что в итоге приводит к необходимости применения численных моделей как основного инструмента исследований, обуславливающей актуальность темы диссертации. Новые экспериментальные и технические возможности, наличие данных современных наблюдений определяют актуальность использованных в диссертационном исследовании гетерогенных данных, включающих данные дистанционного зондирования,

судовые наблюдения и результаты численного моделирования, обеспечивающие регулярную информацию о состоянии вод морского бассейна при возросшей антропогенной нагрузке. Это аспект актуальности обуславливает совершенствование и дополнение моделей динамики морской среды, новыми математическими процедурами, представленными в работе, позволяющими расширить возможности оперативного океанологического и экологического мониторинга морского бассейна.

Научная новизна исследования, полученных результатов, выводов и практических рекомендаций, сформулированных в диссертации

В диссертационной работе сделаны выводы о последствиях экстремальных погодных явлений в Азовском море на основе результатов трехмерного гидродинамического моделирования, дополненного новыми математическими процедурами, обеспечивающими доступ и возможность визуализации смоделированных данных (экстремальных штормовых нагонов и сгонов, поверхностных и глубинных течений, масштабов эволюции субстанции на различных горизонтах моря, протяженности областей затоплений и осушений побережья Азовского моря) на пространственных картах с географической привязкой. Численно воспроизведены исторические штормы в Азовском море, результаты сравнения модельных значений отклонений уровня моря с данными мареографов, и сопоставления наблюдаемых и прогнозируемых масштабов затоплений и осушений свидетельствуют об эффективности численных прогнозов и выводов, полученных в работе.

Автором впервые на фоне участвовавших наблюдаемых природных катастрофических явлений Азово-Черноморского региона представлены результаты исследования гипотезы о роли резонансного механизма при возникновении волн с максимальными амплитудами, генерируемыми перемещающимся барическим фронтом. Выполнен спектральный анализ и получены амплитудно-фазовые характеристики свободных колебаний на выделенных частотах энергонесущих максимумов, дающие численный прогноз основных параметров опасных колебаний.

Несомненной научной новизной диссертации являются комплексный анализ общего и наибольшего содержания оптически активной субстанции в Азовском море, в условиях растущей антропогенной нагрузки, на основе использования процедур усвоения коэффициентов яркости моря в трехмерную гидродинамическую модель. Установлено, что совместное использование данных дистанционного зондирования, судовых наблюдений и результаты численного моделирования, в рамках разработанных процедур интеграции данных, позволяет получить новые непрерывные наборы данных о состоянии вод морского бассейна и обеспечить краткосрочные и долгосрочные прогнозы, информирующие о последствиях опасных явлений и содержании субстанций в морской воде, представляющие обоснованные рекомендации для экологических служб региона.

Автором разработаны и впервые получены научно обоснованы сезонные регрессионные модели, позволяющие восстановить поверхностную соленость в Азовском море по данным натурных и дистанционных наблюдений, обуславливающие экономически обоснованный метод по сравнению с ее определением прямыми способами. Получены новые наборы данных и пространственные карты температуры, солености и основных биооптических показателей морской воды, повышающие полноту оценки биооптического и термохалинного состояния вод Азовского моря.

Значимость полученных результатов

Результаты диссертационного исследования Шульги Т.Я. являются основой для получения непрерывной информации, обуславливающей выбор стратегий по снижению рисков, обусловленных возросшей антропогенной нагрузкой на регион и естественными колебаниями климата, и представляют обоснованные рекомендации для своевременного реагирования оперативных и экологических служб региона при экстремальных природных явлениях.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в совершенствовании системы прогнозирования последствий экстремальных погодных явлений (скорости течений на различных горизонтах моря, амплитуды уровня моря, протяженность границ затопления/осушения) на основе использования результатов трехмерного гидродинамического моделирования для теоретических сценариев опасности, позволяющих атрибутировать влияние отдельных метеорологических параметров на скорости течений и отклонения уровня моря. Изложенный в диссертации подход к исследованию динамических процессов в Азовском море, позволяющий варьировать геометрические и эволюционные параметры возмущений позволяет выявить закономерности при формировании трехмерной структуры течений, определить условия нарушения устойчивости стационарных течений. Предложенная методика проведения численных экспериментов позволяет прогнозировать параметры внешних возмущений, обуславливающие экстремальную динамику вод мелководного замкнутого бассейна 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 и ее взаимодействии с окружающей средой в условиях современных климатических изменений.

Практическое значение имеет разработанный совместно с соавтором «Термохалинным электронном Атласе Азовского моря», в котором объединены смоделированные и зарегистрированные данные о температуре, солености и основных биооптических показателях морской воды.

Результаты исследования доложены на российских и международных научных конференциях, достоверность полученных выводов подтверждается публикациями в рецензируемых журналах.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, практических рекомендаций, сформулированных диссертации

Степень достоверности и обоснованности полученных результатов и выводов подтверждается достаточными объемами и репрезентативностью используемых данных, полученных из океанографических банков данных, атмосферной модели, продуктов дистанционного зондирования, соответствующих цели, задачам и методологии диссертационной работы; математического аппарата, основанного на решении системы примитивных уравнений гидродинамики океана, а также из сопоставления получаемых решений с известными в литературе и с данными прямых измерений.

Выводы аргументированы и соответствуют реализованным направлениям научного исследования. Полученные в ходе исследования данные проанализированы диссертантом с применением адекватных статистических методик и использованием современного

программного обеспечения.

Содержание диссертационной работы и ее оформление

Работа грамотно и структурированно 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, четко сформулированы цель и задачи исследования, освещены его научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, вынесенные на защиту, представлены полные сведения о реализации и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В **разделе 1** представлен анализ океанографической информации, позволяющий получить представление о современных и исторических исследованиях опасных явлений в бассейне Азовского моря по результатам наблюдений и моделирования. Дано описание уравнений трехмерной нелинейной сигма координатной модели Princeton Ocean Model (POM), выбранной в качестве инструмента исследований, граничных и начальных условий, используемых батиметрических сеток и адаптации модели к региональным особенностям бассейна Азовского моря.

В **разделе 2** представлены методика и дано математическое описание теоретических моделей, имитирующих преобладающие и опасные атмосферные условия, используемые в качестве граничных условий в трехмерной гидродинамической модели. Здесь также приведено описание математических моделей, задающих начальное содержание субстанций в морской воде, используемых в качестве начальных условий при решении уравнений переноса и диффузии. Все предложенные модели оформлены в виде математических процедур, введены и использованы в численных экспериментах трехмерной гидродинамической модели.

В **разделе 3** приведены результаты численного анализа о влиянии учета водообмена через Керченский пролив при моделировании на течения и сгонно-нагонные процессы в Азовском море при квазистационарном ветре, циклонах и антициклонах. Получены выводы о стабильности стационарных течений при стационарных и нестационарных метеорологических ситуациях, исследовано влияние интенсивности и направлений действующего ветра на экстремумы сгонов, нагонов, скорости течений на различных горизонтах моря. Показано, что нестационарные атмосферные возмущения нарушают характер фоновой стационарной циркуляции, расположение областей сгонов и нагонов, и как следствие, опасных районов затоплений и осушений.

В **разделе 4** приводится анализ результатов моделирования свободных колебаний уровня Азовского моря, возникающих после прекращения действия устойчивого ветра, позволяющий установить физические закономерности пространственного распределения колебаний уровня и скорости течений. Численно проверена гипотеза о роли резонансного механизма в возникновении сейш, при прохождении атмосферного фронта по результатам сопоставления двух численных прогнозов: при постоянном атмосферном давлении, и при перемещении барического фронта по направлению Геничск-Ейск со скоростью, равной скорости свободной длиной волны. Сравнительный спектральный анализ результатов экспериментов позволил выделить частоты энергонесущих максимумов и получить амплитудно-фазовые характеристики свободных колебаний. Продемонстрировано, что узловые линии в стоячих волнах стягиваются в узловые точки, и свободные колебания уровня модифицируются в прогрессивно-стоячие волны с выраженными

амфидромическими системами и пучностями, что подтверждается их изображением на картах с географической привязкой для выделенных мод свободных колебаний.

Раздел 5 посвящен численному исследованию нестационарной циркуляции вод Азовского моря, обусловленной перемещением вихревых атмосферных образований. Приведены результаты численных экспериментов, позволяющие установить влияние параметров модельных вихревых образований на скорости течений и достижение экстремумов сгонно-нагонных колебаний при учете и без учета свободного прохождения волн на жидкой границе. Получены оценки влияния фоновых стационарных течений на изменение интенсивности скорости нестационарных течений. На основе предложенной методики выполнен прогноз границ областей затопления и осушения, возникающих при устойчивых сгонно-нагонных ветрах, а также в зависимости от интенсивности прогностического ветра.

Даны численные прогнозы последствий опасных региональных явлений, связанных с прохождением циклонов и антициклонов, на основании смоделированных данных об экстремальных нагонах и сгонах, являющихся причиной наблюдаемых наводнений прибрежных районов Азовского моря. Анализируются результаты прогноза, выполненного для двух случаев в декабре 2015 г. и феврале 2017 г. при перемещении антициклонов с северных румбов вызывающих распространение анемобарической волны, приводящей к увеличению скорости течения в Керченском проливе до 85 см/с и повышение уровня на его северном входе до 52 см. Дан прогноз последствий опасных приазовских явлений (“черноморка” или “оборотная низовка”), связанных с перемещением циклонов с запада, по траектории наибольших разгонов в Азовском море, имевших место в марте 2015 г. и сентябре 2014 г. 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 **разделе 6** дан анализ экологического состояния вод Азовского моря на основе анализа содержания и масштабов эволюции субстанций в морской воде. Выводы о влиянии преобладающих и опасных метеорологических ситуаций на эволюцию субстанций получены на основе анализа результатов трехмерного моделирования при использовании моделей начального содержания субстанций, и граничных условий, воспроизводящих: квазистационарный ветер, нестационарные порывы в поле стационарного ветра, модельные и наблюдаемые циклоны и антициклоны. 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 моря в модель РОМ.

В заключительном **разделе 7** приведены результаты анализа термohалинной структуры Азовского моря, выполненного по океанографическим данным ЮНЦ РАН за период с 1913 по 2018 гг. С использованием предложенного метода восстановления солености по дистанционно зондируемой информации и натурным данным, получены непрерывные наборы смоделированной солености за период 2000–2018 гг. Результаты восстановления солености сопоставлены с климатическими трендами. Установлено, что средние значения отклонений среднемесячных значений восстановленной солености с марта по август относительно наблюдаемых не превышают 1,11%, и результаты восстановления хорошо согласуются с наблюдаемой климатологической изменчивостью в

центральной части Азовского моря. Предложенный метод позволяет удешевить работы по оценке солености прямыми способами, восполнить пробелы в гидрохимическом исследовании Азовского моря в прошлые годы.

Заключение содержит итоги проведенного исследования, работа заканчивается выводами, которые соответствуют поставленной цели и задачам работы, логично вытекают из полученных результатов исследования.

Оформление работы соответствует требованиям ВАК.

По теме диссертационного исследования опубликовано 47 печатных работ, из них 21 статья в журналах, включенных в список ВАК РФ; 12 работ входящих в мировые индексы цитирования Scopus и/или Web of Science, 12 статей в рецензируемых периодических научных журналах и сборниках трудов международных конференций, 1 монография в соавторстве, 1 свидетельство о регистрации базы данных.

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 снижают научно-практическую ценность проведенного исследования.

В качестве дискуссии хотелось бы узнать мнение диссертанта по следующим вопросам:

1. Автором проанализированы сейшевые и сгонно-нагонные колебания, возникающие в Азовском море при разных метеорологических условиях. Можно ли разделить эти явления? Каковы аргументы того, что разработанные методы и модели Вашего исследования могут быть использованы в других морских бассейнах?
2. По результатам исследования сделан вывод, о характере сейшевых колебаний, возникающих после прохождения барического фронта, можно ли задавать с помощью аналитические модели разделение акватории моря на области повышенного и пониженного давления?
3. Какие источники данных прямых наблюдений были использованы для сопоставления с модельными расчетами отклонений уровня моря на береговых станциях?
4. Автором выделены периоды осолонения и опреснения Азовского моря. Можно ли используя предложенный метод восстановления солености по дистанционно зондируемой информации и натурным данным дать прогноз изменения термохалинных условий моря?

Указанные замечания не опровергают основные результаты и выводы диссертационной работы, не вызывают сомнений в достоверности полученных соискателем результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Шульги Татьяны Яковлевны на тему: «Моделирование динамики вод и переноса субстанции в Азовском море», представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.6.17. Океанология является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании проведенных автором исследований решена актуальная научная задача исследования влияния гидродинамических и атмосферных условий, приводящих к

возникновению и усилению опасных явлений, определяющих состояние экосистемы Азовского моря, имеющая существенное значение и практически важные результаты, которые могут быть использованы для решения научных и прикладных задач.

По своей актуальности, новизне, объему выполненных исследований, глубине анализа полученных данных и их доказательности, научной и практической ценности выводов и практических рекомендаций, диссертация полностью соответствует требованиям установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель **Шульга Татьяна Яковлевна** заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.6.17. Океанология. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не установлены.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры океанологии Института наук о Земле Южного федерального университета.

Присутствовало на заседании кафедры океанологии 8 чел.

Результаты голосования: «за» – 8 чел., «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел.

(протокол № 2 от 02 октября 2024 г.).

И.о. заведующего кафедрой океанологии
Института наук о Земле
Южного федерального университета,
к.геогр.н., доцент



Иошпа Александр Рувимович