

ОТЗЫВ

**председателя 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 необходимостью получения информации об опасных явлениях в Азовском море и его побережье, направленной на своевременное предупреждение, смягчение последствий экологических и климатических рисков на основе современных научных знаний. Важность прогнозов состояния исследуемого бассейна определяется выводами, характеризующими влияние, как крупномасштабной атмосферной циркуляции, так и местных экстремальных явлений. Актуальность данной работы обусловлена выбором одного из важнейших направлений исследований динамических процессов в природных бассейнах, основанного на численном моделировании, дополняющем данные натурных и дистанционных наблюдений. Кроме того, использование математических моделей делает возможным анализ теоретических гипотез, связанных с учетом различных физических условий и/или изменений структуры расчетной области бассейна, способствующих получению научных выводов необходимых для прогнозирования и планирования. Еще один из аспектов актуальности этого исследования обусловлен необходимостью использования и интерпретации данных современных наблюдений, получаемых при дистанционном зондировании морской поверхности из космоса, необходимых в свою очередь для контроля экологического и термохалинного состояния бассейна.

Основной целью диссертационной работы Шульги Т.Я. является получение выводов о влиянии опасных гидродинамических и атмосферных условий, приводящих к возникновению и усилению природных явлений, определяющих состояние экосистемы Азовского моря, на основе анализа результатов теоретических, численных и эмпирических исследований. Для решения поставленных задач использованы трехмерные гидродинамические и регрессионные численные модели. Результаты исследования уточняют современные представления о динамике ветровых течений, сгонно-нагонных процессах, эволюции субстанций в мелководных морских бассейнах на примере Азовского моря.

Диссертация состоит из введения, 7 разделов, заключения и списка литературы.

Результаты диссертационного исследования представлены на 298 странице и включают в себя 68 рисунка и 43 таблицы. Список литературы включает в себя 257 наименований.

Во *введении* представлены цель и задачи диссертации; сформулированы положения, выносимые на защиту; описаны актуальность, новизна, теоретическая и практическая значимость, а также достоверность данного исследования; приведён список публикаций и конференций, на которых была проведена апробация результатов.

В *разделе 1* выполнен анализ имеющейся океанографической информации, позволяющий получить представление о современных и исторических исследованиях природных и техногенных явлений в бассейне Азовского моря по результатам наблюдений и моделирования. Дано описание уравнений трехмерной нелинейной модели, граничных и начальных условий, используемых батиметрических сеток и адаптации модели к региональным особенностям бассейна Азовского моря.

В *разделе 2* описаны аналитические модели, имитирующие преобладающие и опасные метеорологические ситуации, используемые в качестве граничных условий в трехмерной гидродинамической модели, численно воспроизводящей циркуляцию вод в Азовском море. Здесь также приведено описание математических моделей, задающих начальное содержание субстанций в морской воде, используемые в качестве начальных условий при решении уравнений переноса и диффузии. Все предложенные модели граничных и начальных условий, оформлены в виде математических процедур, введены и использованы в трехмерной гидродинамической модели при выполнении численных экспериментов.

В *разделе 3* приведены результаты численного анализа о влиянии водообмена через Керченский пролив на течения и сгонно-нагонные процессы в Азовском море при стационарных и антициклонических атмосферных возмущениях. 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 на основе анализа результатов численного моделирования с использованием адаптированной к Азовскому морю трехмерной гидродинамической модели.

В *разделе 4* приводится 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. Для смоделированных временных рядов отклонений уровня морской поверхности выполнен спектральный анализ и получены амплитудно-фазовые характеристики свободных колебаний на частотах энергонесущих максимумов с помощью Фурье-анализа.

Раздел 5 посвящен численному исследованию циркуляции вод Азовского моря, обусловленной перемещением вихревых атмосферных образований. Приведены результаты численных экспериментов, позволяющие установить влияние параметров вихревых атмосферных образований на воспроизводимые скорости течений и величины сгонно-нагонных колебаний уровня моря при задании различных граничных условиях на жидкой границе. Получены оценки влияния фоновых стационарных течений в море на динамические процессы, возникающие при прохождении нестационарных атмосферных возмущений. На основе предложенной методики выполнен прогноз границ областей затопления/осушения, возникающих при устойчивых сгонно-нагонных ветрах, а также в зависимости от интенсивности прогностического ветра. Приведенные результаты численного моделирования экстремальных приазовских явлений 23–24 марта 2013 г. и 24–25 сентября 2014 г. подтвердили наблюдаемые проявления этих штормов на побережье Азовского моря (максимальные значения сгонов и нагонов, протяженность областей затопления).

В **разделе 6** представлены результаты численного прогноза эволюции загрязняющих субстанций в Азовском море. Выводы о влиянии преобладающих и опасных метеорологических ситуаций на эволюцию субстанций получены на основе анализа результатов трехмерного моделирования при задании элементарных начальных маркеров, и граничных условиях, воспроизводящих: квазистационарный ветер, нестационарные порывы в поле стационарного ветра, модельные и прогностические циклоны. Прогнозирование эволюции и оценки общего содержания оптически активной взвеси в Азовском море основано на анализе результатов численных экспериментов, выполненных с использованием разработанных подпрограмм усвоения стандартных спутниковых продуктов в трехмерную модель. Обсуждаются результаты тестирования процедуры усвоения для 6 временных групп, на основе корреляционного анализа спутниковых и смоделированных данных. Численный прогноз содержания оптически активной взвеси в Азовском море в 2013 и 2014 гг. проведен с использованием метеорологических данных атмосферной модели SKIRON.

В заключительном **разделе 7** описан предложенный метод восстановления солености Азовского моря с использованием регрессионных моделей составленных по климатическим *in situ* и спутниковым данным. Для сопоставления средних значений

восстановленной солености с климатическими трендами приведены результаты анализа термохалинной структуры Азовского моря, выполненного по океанографическим данным ЮНЦ РАН за 105 лет с 1913 по 2018 гг. Сделаны выводы о многолетних средних температуры и солености, построены климатические тренды, выделены периоды осолонения/опреснения Азовского моря. Установлено, что средние значения восстановленной солености, полученные при использовании предложенных регрессионных моделей, находятся в пределах 95% доверительных интервалов долгосрочных и краткосрочных трендов солености по *in situ* наблюдениям. Новый метод позволяет удешевить работы по оценке солености прямыми способами, восполнить пробелы в гидрохимическом исследовании Азовского моря в прошлые годы.

В *заключении* содержатся основные выводы диссертационного исследования, обобщены и сформулированы общие выводы и результаты, сгруппированные по разделам.

Обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертационном исследовании, обусловлена применением физически и математически корректной постановкой решаемых задач, применением трехмерной численной модели, апробированной в условиях Азовского моря и показавшей достаточно хорошее соответствие с данными наблюдений при расчете штормовых нагонов. В работе использовался статистический анализ океанографических данных за более чем 100 летний период наблюдений, так и детальное рассмотрение отдельных событий. Этот подход позволил получить общие закономерности, основанные на эмпирических данных и результатах моделирования, описывающих изучаемые явления. Хорошее согласие между результатами численных расчетов и данными наблюдений, выполненных с использованием статистического и иных методов анализа, также свидетельствует об обоснованности полученных результатов.

Достоверность представленных результатов определяется репрезентативностью используемых данных, главным образом информацией из океанографических банков данных, атмосферной модели и реанализа, дистанционного зондирования, которые дают возможность исследования океанологических полей в широком диапазоне пространственно-временных масштабов изменчивости. Достоверность выводов работы также подтверждается публикациями в рецензируемых журналах и их апробацией на научных конференциях.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении фундаментальных

знаний о динамических процессах в Азовском море, учитывающем геометрические и эволюционные вариации параметров метеорологических ситуаций, позволяющем выявить закономерности формирования трехмерной структуры течений, определить условия нарушения устойчивости стационарных течений. Показано, что вихревые атмосферные возмущения способствуют распространению субстанции в приповерхностном слое моря, уменьшающемуся с глубиной. Принципиальным моментом является наличие постоянно изменяющейся системы неоднородностей воды, которая объясняет такие физические нетривиальные эффекты, как высокая скорость распространения субстанций в морской среде. Сравнение результатов использования двух регрессионных моделей восстановления солености показало, что лучшее соответствие с наблюдениями *in situ* показывает использование модели, основанной на прямом усреднении коэффициентов статистически значимых регрессий, по сравнению с использованием регрессии между генеральными совокупностями за весь период наблюдений. Предложенные аналитические модели, задающие граничные и начальные условия, способы маркирования содержания оптически активной взвеси при помощи коэффициентов яркости моря предоставляют возможность их использования для анализа критических параметров внешних возмущений и прогнозирования последствий их воздействия на динамику вод морских бассейнов.

Практическая значимость обусловлена результатами модельных прогнозов (об экстремальных скоростях течений на различных горизонтах моря, экстремальных амплитудах уровня моря, протяженности границ затопления/осушения), которые могут быть использованы в качестве рекомендаций по снижению возможных рисков для районов, расположенных на побережье Азовского моря. Использование предложенной процедуры усвоения стандартных спутниковых продуктов в трехмерной модели позволяет смоделировать содержание оптически активной взвеси в месте пропусков спутниковых изображений, что повышает полноту оценки биооптического состояния вод Азовского моря. Статистически значимые корреляционные зависимости между наблюдаемой *in situ* солёностью и региональным биооптическим показателем позволили построить регрессионные модели, чтобы в дальнейшем использовать только спутниковые продукты для определения солености вод Азовского моря. Эта предложенная в диссертации методика восстановления солености позволит удешевить работы по определению солености прямыми способами, восполнить пробелы в гидрохимическом исследовании Азовского моря в прошлые годы, и таким образом расширить представление о термохалинных процессах в море, от которых зависит развитие

биологических ресурсов и прибрежной инфраструктуры. Представленные процедуры, используемые для расчета экстремальных характеристик трехмерных течений, величин сгонов и нагонов, протяженности областей затопления/осушения, модели атмосферных возмущений, модели начального содержания субстанций, масштабов распространения субстанций могут применяться для построения электронных таблиц данных, пространственных карт, а также при решении обратных задач. Результаты выполненного исследования являются доступными для научного сообщества и могут быть использованы для принятия решений и действий, способствующих устойчивой, безопасной промышленной и транспортной деятельности в Азовском море и его прибрежных районах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в выводах о влиянии преобладающих и опасных явлений в Азово-Черноморском регионе на экстремальные скорости течений на различных горизонтах моря, экстремальные амплитуды уровня моря, протяженности областей затопления/осушения, полученных на результатах трехмерного гидродинамического моделирования. Созданы и апробированы математические модели, оформленные в виде новых программных кодов, дополняющих вычислительный комплекс трехмерной нелинейной сигма-координатной гидродинамической модели, позволяющие:

- учитывать возможные метеорологические сценарии в граничных условиях;
- задавать начальное содержание субстанций при интегрировании уравнений переноса и диффузии;
- выполнять пространственно-временной анализ площади, объема полей субстанций и времени полного очищения морской воды;
- выполнять прогнозы рисков затопления/осушения морского побережья;
- выполнять оперативное усвоение данных дистанционного зондирования на регулярную модельную сетку Азовского моря.

Впервые численно проверено влияние резонансного механизма на возникновение волн с максимальными амплитудами, генерируемых атмосферным фронтом с использованием предложенной математической модели, имитирующей движение барической депрессии, позволяющей выполнять прогоны модели при различных ее параметрах. 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. Изучены механизмы эволюции полей субстанций в зависимости от их начального содержания и параметров действующих атмосферных образований. Усовершенствован численный прогноз

эволюции оптически активной взвеси за счет использования процедур усвоения стандартных спутниковых продуктов. Алгоритм усвоения, апробированный на данных измерений оптического сканера MODIS, позволил впервые получить оценки содержания оптически активной субстанции в Азовском море в 2013 и 2014 гг. Предложены регрессионные модели восстановления солености Азовского моря, связывающие значения биооптических параметров, полученных по стандартным спутниковым продуктам с измерениями *in situ*. Метод апробирован и верифицирован по климатическим *in situ* данным и измерениям оптического сканера MODIS за 2000–2018 гг. Получены новые наборы данных о температуре и солености, биооптическим показателям с использованием методов дистанционного зондирования и моделирования, объединенные в «Термохалинном электронном атласе Азовского моря».

Замечания к представленной работе.

1. Почему при таком широком спектре оперативных глобальных, региональных и мезомасштабных (атмосферных) моделей погоды выбор пал на поля ветра из модели SKIRON.
2. Почему наиболее значимые подъемы или падение уровня по фактическим данным почти всегда больше, чем рассчитанные по модели значения, благодаря этому остается неясным является следствием случайного выбора данного примера или это особенность модели, а возможно ее реализации?
3. При незначительных размерах моря, каким является Азовское море, представляется важным вопрос о том, как быстро динамические процессы выходят на установившийся режим при тех или иных ветровых условиях.
4. Во введении не указывается, каким пунктам паспорта специальности 1.6.17. Океанология (физико-математические науки) соответствует диссертация.
5. В разделе 7 приведены эмпирические уравнения определяющие значения биооптических показателей, в которых используется разница между $R_{rs}(667) - R_{rs}(678)$, которая может варьироваться от флуоресценции, вызванной солнцем. Важно ли это? Или в текущей версии регионального алгоритма сигналом флуоресценции, вызванной Солнцем, вы пренебрегаете?
6. Зачем для корреляции с соленостью оптические измерения переводить в биооптические? Вы пытались напрямую сопоставить отражательную способность, полученную дистанционным зондированием, с соленостью.
7. На рисунке 7.1.2 очень мелкий шрифт, не читаемо.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертацию Шульги Татьяны Яковлевны на тему «Моделирование динамики вод и переноса субстанции в Азовском море» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. В работе получены новые и практически важные результаты, которые могут быть использованы для решения научных и прикладных задач.

Диссертация **Шульги Татьяны Яковлевны** на тему: «**Моделирование динамики вод и переноса субстанции в Азовском море**» соответствует основным 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.

Председатель диссертационного совета,
доктор географических наук,
профессор кафедры океанологии
Санкт-Петербургского государственного университета



Белоненко Т.В.

28.10.2024