

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Попова Сергея Константиновича

**«Моделирование и прогноз изменений уровня и скорости течений в морях
России»,**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

по специальности 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы.

Направление научных исследований диссертационной работы Попова Сергея Константиновича лежит в русле задач оперативной океанологии - нового раздела современной океанологии. Цель работы автор определяет, как «Разработка трехмерной численной гидродинамической модели со свободной поверхностью для расчета приливов и штормовых нагонов в морях России. Применение модели к расчету уровня и трехмерных полей скоростей течений по заданным на поверхности моря полям ветра и атмосферного давления с учетом приливов, стратификации вод, сплоченности льда.»

Основные усилия автора были направлены на создание трехмерной численной гидродинамической модели, в которой адекватно учитывается воздействие полей ветра и атмосферного давления на поверхности моря, при этом основное внимание автора сосредоточено на верификации модели по данным наблюдений за уровнем моря на береговых станциях морей России. В морях приливного типа, к которым принадлежит Баренцево море, приливы играют главную роль в колебаниях уровня моря. Приливной блок модели Баренцева моря был тщательно верифицирован автором, проведено сравнение расчетов по модели с наблюдениями за главными приливными гармониками на 60 уровневых береговых постах Баренцева моря.

Практическое применение модели состояло во внедрении в оперативную практику Гидрометцентра России на основе численной гидродинамической модели технологии краткосрочного прогноза уровня моря и скорости течений в Каспийском, Баренцевом Балтийском и Азовском морях. Прогнозы уровня моря необходимы для обеспечения безопасности мореплавания и предупреждения населения об опасных штормовых нагонах, что является актуальной и важной народно-хозяйственной задачей.

Кроме краткосрочных прогнозов, по модели проведены долгосрочные (десяtkи лет) ретроспективные расчеты гидрологических характеристик в Каспийском и Баренцевом

морях, по заданным на поверхности моря полям ветра и атмосферного давления, которые взяты из данных метеорологического реанализа.

Полученные в результате долгосрочных расчетов значения скорости течений и уровня моря использовались в дальнейшем для получения вероятностных оценок экстремальных характеристик уровня моря и скорости течений, возможных 1 раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Такие характеристики относятся к характеристикам редкой повторяемости и имеют большое практическое значение для проектирования и строительства нефтегазодобывающих платформ и других сооружений в морях России.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 167 наименований и содержит 300 страниц. Диссертация включает 4 свидетельства о регистрации программ и 4 акта внедрения результатов интеллектуальной деятельности, 32 таблицы и 150 рисунков. Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется основная цель и задачи диссертации, положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Гидродинамическая численная трехмерная модель расчета уровня моря и скорости течения.

Модель основана на полной системе уравнений геофизической гидротермодинамики со свободной поверхностью в декартовой системе координат в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды. Используется параметризация коэффициента вертикальной вязкости, в которой интенсивность турбулентного перемешивания зависит как от скорости течения, ее вертикальных сдвигов, так и от стратификации. При устойчивой стратификации коэффициент вертикальной вязкости уменьшается.

Для аппроксимации по пространству используется сетка «С» по классификации Аракавы, по времени используется явная схема (за исключением вертикальной вязкости и параметра Кориолиса), в которой узлы расчетной сетки модели для компонент скорости смещены относительно узлов уровня на половину временного шага. Такая сетка, известная под названием сетки Ричардсона, оптимальна для расчета инерционно-гравитационных волн, к которым принадлежат приливы и штормовые нагоны.

Параметр Кориолиса рассчитывается как среднее по четырем соседним точкам, две из которых берутся с неявного шага по времени, что повышает устойчивость численной схемы. Вертикальная диффузия рассчитывается по неявной схеме методом трехточечной прогонки по вертикальной координате.

Уровень моря определяется из решения системы трехмерных уравнений движения и неразрывности без выделения баротропной и бароклинной моды. Недостатком использования явной схемы по времени является ограничение на шаг по времени, диктуемое критерием устойчивости Куранта и возникающее из-за явной аппроксимации внешних гравитационных волн. По критерию устойчивости Куранта, шаг по времени, необходимый для устойчивости численной схемы, уменьшается пропорционально уменьшению шага сетки по горизонтали, что при малых шагах сетки приводит к неоправданному физической постановкой задачи увеличению времени расчета.

Преимуществом модели является точное описание рельефа дна по сравнению с моделями, где рельеф дна задан с точностью до глубин расчетных горизонтов. Переменная толщина придонной ячейки зависит от точного значения глубины места и изменяется по пространству.

Модель позволяет проводить расчеты в условиях изменяемой массы моря и учитывают сток рек и испарение с поверхности моря, что продемонстрировано на примере Каспийского моря во второй главе. Большое внимание уделяется расчету уровня моря в мелководных частях морей, где при расчете штормовых нагонов используется процедура осушения и затопления мелководных прибрежных территорий.

Глава 2. Моделирование уровня моря и циркуляции воды в Каспийском море.

Основное содержание второй главы посвящено моделированию сезонных и межгодовых изменений уровня Каспийского моря. Был проведен ретроспективный расчет уровня моря и скорости течений в течение 60 лет (1948 – 2007гг.) по заданным на поверхности моря полям ветра и атмосферного давления, взятым из данных атмосферного реанализа NCEP. На поверхности моря задавались из наблюдений неравномерные по пространству среднемесячные климатические поля видимого испарения, учитывался климатический среднемесячный сток рек, впадающих в Каспийское море. Из-за того, что сток рек не балансируется видимым испарением, объем воды в море изменяется и возникает сезонный ход среднего уровня моря. Расчет проводился с учетом среднемесячных климатических полей температуры и солености, полученных по данным наблюдений методом диагноза и адаптации. При таком подходе был получен климатический сезонный ход среднего уровня Каспийского моря, одинаковый каждый год в течение 60 лет расчета.

Расчеты проводились при среднем годовом уровне – 27 м Балтийской системы высот (БС), для оценки влияния среднего уровня моря были проведены аналогичные

расчеты для других отметок среднего уровня моря $-25,9$ м БС и $-29,5$ м БС. На основе этих расчетов вероятностным методом были получены экстремальные характеристики уровня моря и скорости течений, возможные 1 раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет

Межгодовые изменения уровня Каспийского моря были получены путем задания реального среднемесячного стока Волги в течение 47 лет (1948 – 1994), при этом на поверхности моря использовались среднемесячные климатические поля видимого испарения.

Заключительный раздел главы посвящен технологии краткосрочного прогноза уровня и течений в Каспийском море, применяемой в оперативной практике Гидрометцентра России. Модель прошла необходимую верификацию по данным наблюдений за уровнем моря на уровневых постах Каспийского моря. В зимний период в оперативной модели Каспийского моря используются еженедельные поля сплоченности льда, полученные по картам, составляемым в Гидрометцентре России.

Глава 3. Моделирование уровня моря и скорости течений в Баренцевом море.

Приливной блок модели верифицирован для каждой из восьми гармоник прилива (на жидкой границе задавалась одна гармоника) и построены котидальные карты и карты эллипсов приливных течений для восьми главных волн прилива M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , Q_1 , P_1 для сентября и апреля.

Рассмотрено влияние горизонтально неподвижного льда на приливные характеристики уровня моря и скорости течений. Построены карты разности амплитуд и фаз волн M_2 и S_2 в апреле и сентябре. В Белом море амплитуда колебаний этих волн в апреле подо льдом меньше, чем в сентябре, когда льда нет. Нетривиальным результатом является наличие в апреле подо льдом районов, где амплитуда волн выше, чем в отсутствие льда.

Верификация модели проводилась путем сравнения результатов расчетов с данными гармонического анализа наблюдений на 60 береговых постах Баренцева и Белого морей в отсутствие льда. Наибольшее совпадение данных наблюдений и модельных расчетов получено для волны M_2 – доминирующей приливной волны в данном регионе.

Непрерывные расчеты суммарных течений и уровня моря проводились в течение 20 лет (1968-1987 гг.), в результате которых были получены, как среднемесячные, так и экстремальные значения уровня моря и скорости течений. Для расчета суммарных течений и уровня моря на жидких границах Баренцева моря задаются колебания уровня моря в виде суммы приливной и непериодической составляющих уровня моря. Приливая

составляющая задавалась в виде суммы 8 гармоник прилива. Непериодическая составляющая уровня моря – в виде суммы двух компонентов: нестационарного (синоптического), рассчитываемого по закону обратного барометра, и квазистационарного, формируемого системой плотностных течений, полученных по среднемесячным климатическим полям температуры и солёности.

В заключительном разделе рассматривается краткосрочный прогноз уровня моря и скорости течений в Баренцевом и Белом морях. Для верификации модели использованы данные наблюдений за уровнем моря, проведенные в юго-западной части Баренцева моря в летне-осенний период 2006 года. Сравнение прогностических расчетов с наблюдениями в 6 точках, расположенных в открытой части акватории Баренцева моря, показало, что качество прогностических расчетов достаточно высокое, средний коэффициент корреляции 0,95. Средняя оправдываемость прогнозов лежит в пределах 82-100% при допустимой ошибке <30 см, что соответствует нормативным требованиям.

Глава 4. Моделирование и прогноз скорости течений и уровня в Балтийском море и Финском заливе.

Разработана модификация модели, названная BALT-P, предназначенная для расчета колебаний уровня моря с высоким разрешением в Невской губе Финского залива.

Расчет для всего Балтийского моря осуществляется на расчетной сетке с разрешением 2 морские мили по горизонтальным координатам. Расчет верхней части Финского залива проходит на мелкой сетке с разрешением по пространству 90 м. Каждое из восьми водопропускных сооружений дамбы закрывается в заданное время не мгновенно, а в течение промежутка времени, открытие ворот также происходит постепенно.

Проанализирован расчет уровня моря в трех исторических наводнениях, которые произошли до ввода в строй в 2011 г. комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга. Наводнение, произошедшее в 2001 году, моделировалось с использованием моделей BALT-P и INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model), а наводнения, произошедшие в 2002 и 2003 годах – с использованием модели BALT-P. Сравнения расчетов уровня моря с наблюдениями показало, что обе модели практически с одинаковой степенью точности воспроизводят как значение экстремального нагона, так и повторные колебания уровня моря в пункте Горный Институт. Если не ставится задача расчета термодинамики моря, то для воспроизведения экстремальных колебаний уровня Балтийского моря вполне уместным является использование модели BALT-P, которая

требует существенно меньшей входной информации.

Для выяснения причины появления второго максимума были проведены расчеты по модели BALT-P с отключением действия ветра и градиентов атмосферного давления после достижения первого максимума уровня моря в наводнении в пункте Горный Институт. Отключение внешнего воздействия при начальных условиях, когда уровень имеет сильный уклон с запада на восток, приводит к появлению свободных колебаний уровня Балтийского моря. Возбуждается фундаментальная одноузловая сейша Балтийского моря с вершиной в Санкт-Петербурге, имеющая период 27-29 часов. Показано, что в наводнениях 2002 и 2003 г. ветер препятствовал развитию собственного колебания, а в наводнении 15-17 ноября 2001 г. ветровое воздействие привело к усилению собственного колебания и увеличению второго максимума уровня моря.

В заключительном разделе представлены прогнозы уровня моря на 60 часов с учетом работающей дамбы и использованием атмосферных прогнозов по модели HIRLAM.

Глава 5. Моделирование и прогноз течений и уровня в Азовском море.

Диагностические и прогностические расчеты уровня моря выполнены с использованием атмосферных данных из модели COSMO-RU07 Гидрометцентра России, приведены оценки точности прогнозов и описание катастрофического наводнения в Таганроге 24 сентября 2014 года, когда уровень моря поднялся на 251 см по наблюдениям и 249 см в прогнозе по модели.

Верификация прогностических расчетов по модели проведена путем сравнения наблюдений за уровнем на береговых станциях с прогнозами уровня Азовского моря, выполненных два раза в сутки с заблаговременностью 48 часов в течение 9 месяцев 2017 года. Анализ результатов показывает, что на станции Таганрог в летние месяцы оправдываемость прогнозов уровня моря выше или приблизительно равна средней оправдываемости за период расчетов, а на остальных станциях – ниже. Изменчивость уровня моря на станции Таганрог летом выше, чем на других станциях. Модель хорошо воспроизводит значительную изменчивость уровня моря и работает тем лучше, чем выше изменчивость уровня моря. В сентябре качество прогноза на всех станциях максимальное из девяти месяцев, поскольку в сентябре максимальная за весь период расчетов изменчивость уровня моря, которая вызвана воздействием ветра и хорошо воспроизводится моделью.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты представленной работы. К **наиболее значимым результатам** диссертации относятся:

Модель гидродинамики моря, позволяющая проводить расчеты с изменяемой массой моря, учитывающая осушение и затопление прибрежных территорий. Модель включает конечно-разностную аппроксимацию исходной системы уравнений, вычислительную реализацию в виде программного кода и комплекс программ для обработки результатов численного моделирования.

Впервые созданные и внедренные в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России» технологии краткосрочного прогноза изменений уровня моря и скорости течений для Каспийского, Баренцева, Белого, Балтийского и Азовского морей на основе гидродинамической модели.

Результаты исследования изменений уровня Каспийского моря на различных временных масштабах (сезонные и сгонно-нагонные колебания), полученные на основе численных экспериментов и данных наблюдений. Экстремальные характеристики уровня моря и скорости течений Каспийского моря, впервые полученные с учетом сплоченности льда, на основе применения вероятностной модели и данных непрерывных расчетов по модели за 60-летний период (1948 – 2007 гг.).

Модификация модели гидродинамики моря для расчета Балтийского моря (BALT-P) с разрешением по горизонтали 2 морские мили для Балтийского моря и 90 м для верхней части Финского залива, позволяющая рассчитывать уровень моря и прогнозировать катастрофические нагоны во время наводнений в Санкт-Петербурге с учетом постепенного закрытия и открытия ворот дамбы.

Исследование механизма возникновения второго максимума уровня моря, который часто наблюдается во время наводнений в Санкт-Петербурге. Анализ результатов численных расчетов показал, что этот максимум вызывается возбуждением в результате ветрового воздействия одноузловой сейши Балтийского моря, вершина которой находится в Финском заливе. В большинстве случаев второй максимум уровня моря меньше первого и ветер препятствует росту собственных колебаний, но иногда воздействие ветра приводит к раскачке собственных колебаний и увеличению второго максимума уровня моря.

В своей работе автор выполнил крупное комплексное, законченное научное исследование, основные компоненты которого перечислены выше. Результаты работы имеют важное научно-практическое значение и используются в учреждениях Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Научные положения и выводы достаточно полно отражены в опубликованных работах и обсуждены на международных и отечественных конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано 53 работы, включая 19 статей в рецензируемых научных журналах, из списка, рекомендованного ВАК. По своему содержанию, полученным результатам и характеру выводов диссертация полностью отвечает специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

К представленной работе имеются следующие замечания.

1. Система уравнений модели выписана в локальной декартовой системе координат, что ограничивает применение модели расчетом небольших морей с горизонтальными масштабами до 1000 км. Для устранения погрешностей, связанных с использованием локальной декартовой системы координат, необходимо перейти на использование сферической системы координат.

2. Как краткосрочные прогнозы, так и ретроспективные расчеты по модели на десятки лет проведены с заданием полей температуры и солёности в диагностическом виде. Эти поля получены на основе данных наблюдений с применением метода краткосрочной адаптации, который фильтрует шумы в данных наблюдений. Такие расчеты проводились ранее для получения скорости течений, соответствующих заданным из наблюдений полям температуры и солёности. В настоящее время вычислительные ресурсы позволяют проводить расчеты по полной модели гидротермодинамики, включающей расчет полей температуры и солёности, при этом на поверхности моря рассчитываются потоки тепла. Расчет температуры и солёности позволит получить сезонный ход полей температуры и солёности, характерный для каждого конкретного года, что улучшит качество воспроизведения сезонного хода уровня моря.

3. В зимний период времени учитывается влияние льда на поверхности моря при диагностических и прогностических расчетах циркуляции воды. При этом лед считается неподвижным в горизонтальном направлении и оказывает только тормозящее воздействие на подледную скорость течения воды. В реальности лед движется и необходимо рассчитывать скорость движения льда, для чего необходимо использовать модель динамики льда.

Указанные замечания не изменяют основные результаты и выводы диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную работу, имеющую высокую актуальность и практическую значимость, ее основные результаты

опубликованы в цитируемых изданиях, автореферат хорошо отражает содержание диссертации. Представленная диссертационная работа полностью соответствует требованиям пункта 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а ее автор Попов Сергей Константинович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН.

Ибраев Рашит Ахметзиевич

18.09.2019

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук (ИВМ РАН), 119333, Москва, ул. Губкина, д.8, ИВМ РАН

Тел. +7 916 192 2735

E-mail: ibrayev@mail.ru

Подпись Рашита Ахметзиевича Ибраева заверяю

Ученый секретарь ИВМ РАН,

д.ф.-м.н., профессор



Шутяев В.П.