

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.

Диссертационная работа Попова Сергея Константиновича относится к области математического моделирования и его применения к оперативной океанологии. Целью работы является создание, и разработка численной трехмерной гидродинамической модели со свободной поверхностью, и ее применение к расчету уровня моря и скоростей течений в морях России. В модели задаются поля ветра и атмосферного давления на поверхности моря, учитывается стратификации вод и сплоченность льда.

Созданная автором трехмерная численная гидродинамической модель была верифицирована по данным наблюдений за уровнем моря на уровневых постах морей России. Кроме расчетов штормовых нагонов, модель применялась для совместных расчетов приливов и штормовых нагонов в морях приливного типа, к которым принадлежит Баренцево море. Автор отдельно рассчитал 8 главных приливных гармоник в Баренцевом и Белом морях и построил их котидальные карты для сентября и апреля. Проведено сравнение расчетов гармонических постоянных прилива с наблюдениями за главными приливными гармониками на 60 уровневых береговых постах Баренцева моря.

Итогом работы стало внедрение в оперативную практику Гидрометцентра России технологии краткосрочного прогноза уровня моря и скорости течений в Каспийском, Баренцевом, Балтийском и Азовском морях, что является актуальной народно-хозяйственной задачей.

Кроме этого, в диссертации рассмотрены важные вопросы, связанные с получением статистическими методами экстремальных характеристик уровня моря и скорости течений, возможных 1 раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет в Каспийском и Баренцевом морях, имеющих важное практическое значения для проектирования и строительства морских сооружений. Для получения этих характеристик было проведено ансамблевое моделирование, значения в выборке 60 максимальных значений (максимальных годовых значений) аппроксимируется в области малых вероятностей функцией двойного экспоненциального распределения. Определяются параметры этого распределения и его согласие с наблюдениями по критерию χ^2 .

Автором создана специализированная модель Балтийского моря, предназначенная для прогноза уровня моря в течение Невских наводнений и использующая сетку повышенного разрешения до 90м по горизонтали в районе Санкт-Петербурга. Модель используется в системе предупреждения угрозы наводнений в Санкт-Петербурге и позволяет учитывать постепенное закрытие и открытие восьми водопропускных ворот дамбы.

Исследован механизм возникновения второго максимума наводнения в Санкт-Петербурге. Впервые показано, что этот максимум вызывается возбуждением в результате штормового ветрового воздействия одноузловой сейши Балтийского моря, вершина которой находится в Финском заливе. В основном ветер препятствует росту собственного колебания, но в отдельных случаях, воздействие ветра и давления приводит к усилению собственного колебания и возрастанию второго максимума уровня, как это произошло в наводнении 15-17 ноября 2001 г. в Санкт-Петербурге.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 167 наименований и содержит 300 страниц, включая 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.

В первой главе описывается основная математическая модель, используемая в дальнейшем на протяжении всей работы. Модель основана на полной системе уравнений геофизической гидротермодинамики со свободной поверхностью в декартовой системе координат в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды. При этом реально уравнения переноса тепла и солей не используются, а температура и соленость задана на основе данных наблюдений. Уравнения температуры и солености используются только для уменьшения «шумов» и сглаживания заданных из наблюдений полей температуры и солености методом гидродинамической адаптации. Описанию этой процедуры, реализованной автором, посвящен отдельный раздел.

Для аппроксимации по пространству используется сетка «С», а по времени используется явная схема (за исключением вертикальной вязкости и параметра Кориолиса). 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. Классическим недостатком использования явной схемы по времени является ограничение на шаг по времени, из-за чего модель невозможно применять при расчетах на длительное время. Особенностью данной модели является более 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.

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.

В третьей главе моделируется динамика Баренцева моря. Поскольку особенностью данного моря является наличие сильного прилива, то 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 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. Приливная 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 солености.

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.

В четвертой главе рассматривается модификация модели, названная автором 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.

Выяснена причина появления второго максимума в наводнении в пункте Горный Институт. Для этого 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.

В пятой главе проведены диагностические и прогностические расчеты уровня Азовского моря с использованием атмосферных данных из модели COSMO-RU07 Гидрометцентра России. В этой же главе 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 следующие:

1. Создание и разработка самой модели гидродинамики моря, которая позволяет проводить расчеты с изменяемой массой моря и учитывать осушение и затопление прибрежных территорий, ее конечно-разностная аппроксимация, вычислительная реализация в виде программного кода на языке Фортран-95 с использованием методов параллельного программирования в системе общей памяти.

2. 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.

3. Результаты расчетов изменений уровня Каспийского моря на различных временных масштабах (сезонные и сгонно-нагонные колебания). Анализ экстремальных характеристик уровня моря и скоростей течений Каспийского моря, полученных с учетом сплоченности льда, на основе применения ансамблевых расчетов и вероятностной модели.

4. 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.

К представленной работе имеются следующие замечания.

1. В модели используется явная схема по времени, поскольку явная схема является устойчивой только при малых шагах по времени, то расчет на длительный период является вычислительно-затратным, требующем больших вычислительных ресурсов. Применение модели к расчетам океанской циркуляции, а также климатическим расчетам становится практически не реальным.

2. Автор использует подготовленные по данным наблюдений в Каспийском море среднемесячные климатические поля температуры и солёности на 30 стандартных горизонтах. При расчете Каспийского моря в течение 60 лет на поверхности моря заданы изменения скорости ветра и давления, при этом сезонный ход температуры и солёности не изменяется от года к году. Задание неизменного климатического сезонного хода температуры и солёности в течение 60 лет расчета является некоторым приближением, при этом не приводится оценок точности этого приближения. Этот недостаток можно устранить, используя полную систему уравнений с расчетом температуры и солёности и заданием граничных условий для температуры и солёности на поверхности моря.

3. В модели отсутствует какая-либо идеология, связанная с коррекцией модельных расчетов данными наблюдений (так называемое, усвоения данных). На современном этапе отсутствие усвоения данных является недостатком работы, поскольку современные модели используют методы усвоения данных. Однако усвоение данных можно включить в модель автора и использовать в дальнейшем.

4. В работе проводятся многочисленные сравнения модельных расчетов с данными наблюдений, что несомненно является достоинством работы. Однако, проведенные статистические оценки в некоторых случаях выглядят неубедительно. Например, на стр. 127 помещена таблица 2.2, где содержатся характеристики уровня для Каспийского моря в п. Тюлений и приводится сравнение наблюдаемого уровня с модельным. Как следует из таблицы, и в модельном, и в наблюдаемом уровнях содержатся периодические гармоники, из-за чего соответствующие значения в выборках нельзя считать независимыми, и, следовательно, приведенные коэффициенты корреляции не показательны. Поэтому эти сравнения имеют больше качественный характер.

5. Есть замечание и по оценкам экстремумов уровня, сделанных в ходе так называемого ансамблевого эксперимента (глава 2, стр 137-139). По выборке, содержащей 60 ежегодных значений максимумов уровня, строятся статистики поведения больших значений этого уровня (в диссертации определены как события редкой повторяемости). Эти события аппроксимируются двойным экспоненциальным распределением, что оправдано, так как из теории вероятностей известно, что распределение двойной экспоненты является предельным для так называемых крайних членов вариационного ряда. Однако, метод определения параметров этого распределения в диссертации описан крайне сумбурно, с неопределенными терминами, как например «оценки по методу хи квадрат». Непонятно, что имеется в виду- оценки параметров распределения и последующей проверке согласия на двойную экспоненту по статистике хи квадрат- или оценки параметров самого распределения хи квадрат. Автор этот вопрос не уточняет, из-за чего становится неясной сама процедура тестирования.

6. В Баренцевом море проведены расчеты основных гармонических постоянных прилива в сентябре, когда льда практически нет и в апреле, когда количество льда максимально. Автор сравнивает характеристики приливных волн, полученных в сентябре и апреле и оценивает влияние льда на приливные гармоники. Лед учитывается путем задания трения воды о лед, сам лед при этом считается неподвижным в горизонтальном направлении. Весь лед при такой постановке оказывает только тормозящее действие на воду и считается неподвижным как припай. В Баренцевом и Белом морях существует, как

припай, так и движущийся лед, поэтому оценки автора не достоверны. Для адекватного наблюдениям моделирования влияния льда на приливные гармоники необходимо использовать модель динамики льда.

Несмотря на вышеприведенные замечания, в целом работа выглядит вполне достойно. 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. 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, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН).

Беляев

Беляев Константин Павлович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН), 117997, Москва, Нахимовский проспект, дом 36, ИО РАН

Тел.

E-mail:

Подпись Константина Павловича Беляева заверяю

Ученый секретарь ИО РАН



16.09.2016