

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.

Произошедшие в последние десятилетия бурное развитие систем наблюдения за состоянием морей и океанов, повышение вычислительных возможностей компьютерной техники и связанный с ним прогресс в развитии моделирования морской циркуляции открыли новые возможности для развития оперативной океанографии. Складываются необходимые условия для создания и поддержания вычислительных комплексов для описания и прогнозирования морской динамики по типу метеорологических систем, действующих уже много десятилетий. Регулярная информация, получаемая с помощью подобных морских систем, имеет большую востребованность со стороны многих отраслей деятельности, особенно связанных с эксплуатацией и хозяйственным освоением морского шельфа. Поэтому **актуальность** представленной работы, направленной, в первую очередь, на создание оперативной системы диагноза и прогноза динамики морей РФ не вызывает сомнений. Основной **целью**, с которой соискатель успешно справился, является создание численной трехмерной модели гидродинамики моря со свободной поверхностью и применение этой модели для расчета основных гидрофизических характеристик в морях РФ. При этом основные усилия автора были направлены на разработку учета в этой модели динамических факторов формирования морской циркуляции: ветра, атмосферного давления, приливных движений с точным заданием батиметрии и береговой границы.

Моделирование, представленное в диссертационной работе, включает в себя расчет в течение длительных промежутков времени (в течение 60 лет) гидрологических характеристик в Каспийском и Баренцевом морях, по заданным на поверхности моря полям ветра и атмосферного давления, которые взяты из данных метеорологического реанализа NCEP.

Полученные в результате расчета поля скорости течений и уровня моря могут использоваться затем для расчета с помощью вероятностной модели экстремальных характеристик уровня моря и скорости течений, возможных 1 раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Характеристики редкой повторяемости уровня моря и скорости течений имеют большое **практическое значение** и необходимы для проектирования морских сооружений на шельфах морей России.

Вторым важным направлением диссертационной работы служит внедрение в оперативную практику Гидрометцентра (ГМЦ) РФ технологии **краткосрочного прогноза** уровня моря и скорости течений в Каспийском, Баренцевом Балтийском и Азовском морях созданной на основе авторской гидродинамической модели и оперативных полей приповерхностной атмосферной динамики, рассчитываемых в ГМЦ. Таким образом в диссертационной работе решены важные **народно-хозяйственные задачи**, необходимые для проектирования морских сооружений на шельфах морей России, обеспечения безопасности мореплавания и предупреждения населения об опасных штормовых нагонах. Благодаря работе автора в оперативной

практике ГМЦ РФ впервые стала использоваться трехмерная морская гидродинамическая модель для краткосрочного прогноза уровня моря и скорости течений в морях России, достоверность расчетов по которой подтверждается сопоставлением с данными натурных наблюдений за уровнем в морях России.

Диссертация С.К. Попова состоит из введения, пяти глав, в которых изложено основное содержание работы, заключения и списка используемых источников.

Первая глава посвящена описанию гидродинамической численной трехмерной модели расчета уровня моря и скорости течения. Модель основана на примитивной системе уравнений 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 от вертикальных сдвигов скорости и плотности воды. При устойчивой стратификации коэффициент вертикальной вязкости уменьшается.

Для аппроксимации по пространству используется сетка «С» по классификации Лебедева-Аракавы, которая обладает наилучшими дисперсионными свойствами при описании распространения прогрессивных волн.

Используется явная схема по времени (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 4 соседним точкам по полунявной схеме, что повышает устойчивость численной схемы. Для повышения устойчивости вертикальная диффузия рассчитывается по неявной схеме, поэтому используется метод трехточечной прогонки по вертикальной координате.

Уровень моря определяется из решения системы трехмерных уравнений движения и неразрывности без выделения баротропной и бароклинной моды.

В предложенной модели используется более точное описание топографии дна по сравнению с моделями, где рельеф дна задан ступенчато 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. Еще одной отличительной особенностью модели является учет осушения и затопления прибрежных территорий при расчете приливов и штормовых нагонов.

Вторая глава посвящена моделированию уровня моря и скорости течений в Каспийском море. На 3-х мильной сетке 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. На поверхности моря задавались из наблюдений неравномерные по пространству среднемесячные климатические поля разности осадков и испарения, а также были заданы среднемесячные климатические значения стока Волги. Из-за того, что сток Волги не балансируется точно испарением, объем воды в море изменяется и возникает сезонный ход среднего уровня моря.

В этом расчете используются подготовленные по данным наблюдений среднемесячные климатические поля температуры и солёности на 30 стандартных горизонтах. При таком подходе ветер и давление изменяются в соответствии данным атмосферного реанализа, а температура и солёность диагностические и каждый год имеют одинаковый климатический годовой ход. Очевидна необходимость расчета температуры и солёности, которая должна изменяться и рассчитываться в соответствии с заданными граничными условиями на поверхности моря.

Надо отметить, что автор проводил расчеты по полной модели с расчетом температуры и солёности, но только для 2012 года. Сравнение с данными наблюдений на береговых постах Каспийского моря не обнаруживает улучшения качества моделирования, скорее всего это связано с тем, что на поверхности моря задавались среднемесячные климатические поля температуры и солёности, а не реальные, соответствующие 2012 году.

Расчеты уровня и течений Каспийского моря на 3 мильной сетке в течение 60 лет (1948 –2007гг.) проводились при среднем годовом уровне –27 м Балтийской системы высот (БС), при этом моделировался сезонный ход, а межгодовые изменения среднего уровня Каспийского моря отсутствовали.

Для оценки влияния среднего уровня моря на экстремальные характеристики, были проведены расчеты в течение 60 лет для других отметок среднего уровня моря –25,9 м БС и –29,5 м БС и получены экстремумы уровня моря при этих значениях среднегодового уровня Каспийского моря. Установлено, что размах колебаний уровня моря вырос с 3,5 м при СУМ=–25,9 м БС до 4,5 м при СУМ=–29,5 м БС в районе о. Тюлений, что вызвано уменьшением средней глубины моря.

Уровень моря и скорости течений записывались в течение 60 лет, а затем по вероятностной модели были получены экстремальные характеристики уровня моря и скорости течений, возможные 1 раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет

Для моделирования межгодовых изменений уровня Каспийского моря вместо климатического был задан реальный среднемесячный сток Волги в течение 47 лет (1948 –1994 гг.). Модель воспроизводит не только сезонные, но и межгодовые изменения уровня моря. Расхождения с наблюдениями за ходом среднего уровня Каспийского моря автор объясняет тем, что в расчетах использовалось заданное из наблюдений климатическое видимое испарение, не изменяющееся от года к году, а не реальное испарение с поверхности моря.

Завершает главу описание оперативной гидродинамической модели для краткосрочного прогноза уровня и течений в Каспийском море (2-5 суток). В зимний период в оперативной модели Каспийского моря используются еженедельные данные о ледовой обстановке – цифровые поля сплоченности льда, полученные по

картам, составляемым в Гидрометцентре России. Верификация оперативной модели проводилась путем сравнения прогностических расчетов уровня моря с наблюдениями на станции о. Тюлений в Каспийском море. Проведено сравнение с наблюдениями за уровнем моря в пункте о. Тюлений в сентябре 2014 года для 60 прогнозов (30 суток по 2 прогноза в сутки). Средняя по 60 прогнозам абсолютная ошибка составила 7,4 см на 3-мильной и 7,2 см на 1-мильной сетках, коэффициент корреляции 0,899 на 3-мильной и 0,906 на 1-мильной сетке, оправдываемость – 78,9% на 3-мильной и 80,2% на 1-мильной сетке.

Результаты сравнения прогнозов уровня по оперативной модели с наблюдениями показывают незначительное улучшение качества моделирования при увеличении разрешения расчетной сетки с 3 до 1 морской мили.

Третья глава посвящена моделированию колебаний уровня моря и скорости течений в Баренцевом море. 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.

Перед началом расчетов суммарных течений, чтобы убедиться, что модель правильно воспроизводит приливные колебания, были проведены расчеты отдельно каждой из восьми гармоник (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 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. По результатам численного моделирования получено, что за счет смещения положения амфидромических систем в апреле, при наличии льда, амплитуды приливных волн, M_2 и S_2 , например, в пункте р. Индига, увеличиваются по сравнению с сентябрем, когда льда нет.

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.

Учет влияния льда на уровень моря и скорости течений сделан в предположении, что лед неподвижен, поэтому влияние льда сильно завышено. Грубое приближение о неподвижности льда приводит к нереально большому тормозящему воздействию льда на течения, поэтому оценки экстремумов уровня и течений в зимнее время не достоверны. Для получения адекватных оценок необходимо учитывать скорость движения льда и использовать модель динамики льда.

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. Зависимость оправдываемости от времени заблаговременности прогноза носит циклический характер, что вызвано периодической ошибкой расчета приливных колебаний уровня моря. Периодическая приливная компонента уровня моря доминирует над непериодической компонентой, вызванной ветром и неравномерным распределением температуры и солености.

Глава 4 диссертации посвящена моделированию и прогнозу скорости течений и уровня в Балтийском море и Финском заливе. Для этого разработана модификация модели, названная BALT-P, сфокусированная на расчете 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. Расчет верхней части Финского залива проходит на мелкой сетке с разрешением по пространству 90 м для учета работы дамбы. Каждое из восьми ее водопропускных сооружений 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 вторичного 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 этой главы представлены прогнозы уровня моря на 60 часов с учетом работающей дамбы и использованием атмосферных прогнозов по модели HIRLAM. Модель предсказывает наблюдаемый пик наводнения, случившегося 29 октября 2013 года в 12 часов, а заблаговременность предсказания составляет 54 часа.

Последняя, **пятая глава** диссертации посвящена моделированию и прогнозу течений и уровня в Азовском море.

На поверхности моря задавались прогнозы атмосферного воздействия (ветер и давление) с заблаговременностью 48 часов, которые хранятся в архивной базе модели COSMO-RU07 ГМЦ РФ.

Вначале представлены диагностические и прогностические расчеты уровня моря в Таганроге в течение сентября 2014 года и приведены оценки точности прогнозов. Представлено 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.

Проведена верификация прогностической модели путем сравнения наблюдений за уровнем на береговых станциях с прогнозами уровня Азовского моря 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 безледного периода, 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:

Соискателем создана 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 в России созданы и внедрены 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.

Проведены исследования изменений уровня Каспийского моря на различных временных масштабах (сезонные и сгонно-нагонные колебания), полученные на основе численных экспериментов и данных наблюдений. На основе применения вероятностной модели и данных непрерывных расчетов по модели за 60-летний период (1948 – 2007 гг.) рассчитаны экстремальные характеристики уровня моря и скорости течений Каспийского моря.

Проведена 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. На основе этой модели изучена физическая природа возникновения вторичного 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 России.

Научные положения и выводы **достаточно полно** отражены в опубликованных работах и обсуждены на международных и отечественных конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано более 50 работ, 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.

В целом диссертация изложена ясным научным языком. Тем не менее, к ней можно предъявить следующие замечания.

1. Предложенная и реализованная соискателем концепция моделирования морской циркуляции без разделения на баротропную и бароклинную моды, с одной стороны, является более точной по сравнению с классической компоновкой, когда эти моды решаются отдельно с разными временными шагами и которая применяется в подавляющем большинстве известных в Мире

моделей океана. Однако, с другой стороны, такая компоновка требует расчёта всех переменных модели с малым шагом по времени, диктуемым условием Куранта по отношению очень большой скорости распространения быстрых внешних гравитационных волны, что совсем неоправданно для бароклинной моды. Именно поэтому, предложенная автором модель, даже на современных высокопроизводительных компьютерах не может считаться с малыми шагами по пространству для обширных акваторий на требуемые даже оперативной океанографией сроки, на что способна, например, российская модель INMOM. Более того, имея в распоряжении довольно медленную модель, можно было бы ожидать от автора ее распараллеливания на основе технологии MPI для расчета на доступном ему суперкомпьютере ГМЦ РФ. Однако этого сделано не было.

2. К недостатку предложенного автором подхода к моделированию течений следует отнести и то, что напряжение трения ветра рассчитывается только по скорости ветра, без учета разности скорости ветра и приповерхностной скорости воды. Однако, в выполняемых автором расчетах с высоким пространственным разрешением, эта скорость течений может достигать больших значений и учет ее для расчета потока импульса от атмосферы к морю становится просто необходимым.

3. Проведенные исследования влияния горизонтально-неподвижного льда на приливные гармоники в Баренцевом море не выдерживают никакой критики, поскольку именно в этом море, за исключением узких припайных вдольбереговых зон, лед нельзя считать неподвижным ни при каких обстоятельствах. Более того, проводить подобные исследования с моделью, в которую не включена модель динамики-термодинамики льда не является оправданным.

4. В своем исследовании долгопериодных колебаний уровня Каспийского моря соискатель упустил очень важный научный результат. А именно, по результатам выполненной работы можно было бы с хорошей точностью изучить роль испарения в формировании колебаний уровня Каспийского моря, как остаточного члена расхождения наблюдаемого и рассчитанного им уровня моря. Вместо этого автор ограничился простой констатацией расхождений расчетов эволюции среднего уровня Каспийского моря с наблюдениями, вызванных, по его же мнению, не совсем корректным заданием только климатического испарения с зеркала моря. Следует отметить, что в последнее время повысился интерес изучению влияния именно испарения на временной ход уровень Каспийского моря, что подтверждается появлением рядом новых работ.

Выявленные замечания не снижают высокую оценку основных результатов и выводов 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, несомненно заслуживает присуждения ученой

степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент
доктор физико-
математических наук, доцент,
главный научный сотрудник
кафедры физики моря и вод суши
(Физический факультет, Отделение
геофизики МГУ имени М.В.
Ломоносова)

Диан

Дианский Николай Ардальевич
17.09.2019

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова). ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, Главное здание, Физический факультет, г. Москва, 119991.

Тел: +7 (495) 939-31-60

E-mail: nikolay.diansky@gmail.com

Подпись д.ф.-м.н. Николая Ардальевича Дианского заверяю

Декан физического факультета МГУ
/Сысоев Н.Н./

