

УТВЕРЖДАЮ:
ВРИО директора Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института вычислительной
математики и математической геофизики
Сибирского отделения Российской академии наук,
д.ф.-м.н., профессор РАН

М.А. Марченко



ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения Российской академии наук
на диссертационную работу

Попова Сергея Константиновича

«Моделирование и прогноз изменения 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 выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении "Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации" (ФГБУ "Гидрометцентр России").

В связи с начатыми и планируемыми промышленными разработками природных ресурсов морей, в частности их шельфовой зоны, создание и усовершенствование системы оценки и прогноза состояния морской среды является одной из первоочередной задач. Особую важность эта задача приобретает в современных условиях меняющегося климата, когда возрастает вероятность развития экстремальных погодных явлений.

Диссертация посвящена разработке гидродинамической модели со свободной поверхностью для расчета характеристик приливов и штормовых нагонов, трехмерной картины течений в морях России, учитывающей влияние поля ветра и атмосферного давления, стратификацию вод и сплоченность льда. **Актуальность работы** связана с необходимостью гидрометеорологического обеспечения морских отраслей экономики страны и систем предупреждения населения об опасных природных явлениях, в том числе:

- создания новых технологий и методов определения характеристик редкой повторяемости основных элементов гидрометеорологического режима;
- создания базы специализированной гидрометеорологической информации для ее использования при проектировании и строительстве морских сооружений, в процессе гидротехнического строительства, при разведке и добыче минеральных ресурсов;
- расчета переноса нефтепродуктов в случае аварийных разливов нефти, распространения загрязняющих веществ между различными частями моря, распространения взвеси при проведении дноуглубительных работ.

В исследовательских целях гидродинамическое моделирование широко применяется при изучении циркуляции на континентальном шельфе, в эстуариях, заливах, озерах.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 167 наименований. Объем диссертации - 300 страниц, включая 4 свидетельства о регистрации программ и 4 акта внедрения результатов интеллектуальной деятельности, 32 таблицы и 150 рисунков.

В первой главе диссертации представлена численная гидродинамическая модель для расчета трехмерной картины течений, характеристик приливов и штормовых нагонов в морях и заливах. Исходная система трехмерных математических уравнений формулируется в декартовой системе координат с использованием приближений Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости. Граничные условия на поверхности Основные моменты численной реализации следующие:

Пространственная дискретизация основных переменных основывается на схеме С в терминологии Аракавы, а аппроксимация по времени производится по схеме Ричардсона, которая является оптимальной для расчета инерционно-гравитационных волн. Отличительной особенностью модели является включения алгоритма осушения и затопления прибрежных территорий.

Вторая глава диссертации посвящена вопросам моделирования с помощью разработанной гидродинамической модели процессов в Каспийском море. В первой части главы представлены результаты первых этапов интегрирования модели Каспийского моря, связанных с процедурами диагноза и адаптации.

Во второй части представлены результаты моделирование сезонного хода уровня и течений, при этом учитывались процессы осушения и затопления прибрежных территорий. Проводится подробный анализ сезонной изменчивости уровня и поверхностных течений. Отмечается доминирующее влияние поля ветра. Показано хорошее соответствие расчетных значений с имеющимися данными натурных наблюдений. Далее в третьей части изучается межгодовая изменчивость этих характеристик.

Наибольший интерес представляет четвертая часть этой главы, где представлены результаты по экстремальным характеристикам уровня моря, включая периоды затопления и осушения во время ветровых нагонов и сгонов. Как показано в работе, использование фиксированных вертикальных границ приводит к переоценке возможного повышения или понижения уровня особенно вдоль границ с пологим рельефом прибрежных территорий. И в этом отношении учет процессов осушения и затопления прибрежных территорий дает неоспоримое преимущество и является одним из главных достоинств разработанной модели.

В результате расчетов по вероятностной модели были получены экстремальные характеристики уровня моря, возможные 1 раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет, при этом учитывалась возможность пониженного -29,5 м и повышенного -25,9 м среднего уровня моря, получены значения экстремальных характеристик скорости течения по 24 румбам направления скорости и по величине модуля скорости.

В пятой части представлено сравнение расчетов и наблюдений за уровнем моря на береговых станциях Каспийского моря в течение 2012 года, а в шестой продемонстрирована принципиальная возможность использования оперативной гидродинамической модели Каспийского моря для оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ.

Седьмая часть главы демонстрирует еще одно неоспоримое достоинство разработанной модели, а именно, возможность ее применения для оперативного диагноза и прогноза уровня и скорости течений Каспийского моря на период от 2 до 7 суток.

В третьей главе диссертации приводятся результаты моделирования уровня моря и скорости течений в Баренцевом море. В первой части главы описывается технология расчета суммарных характеристик уровня моря и скорости течений с учетом влияния льда. При этом использовались официальные данные о подекадном (климатическом) положении кромки льда. Приливная и непериодическая составляющие колебания уровня моря задаются на жидких границах.

Во второй части приводятся результаты расчетов приливных характеристик уровня моря и скорости течений, построены котидальные карты и карты эллипсов приливных течений для каждой из восьми главных волн прилива M2, S2, N2, K2, K1, O1, Q1, P1 для сентября и апреля. Результаты подтверждают правильный полусуточный характер приливов в Баренцевом море: амплитуды волн K1 и O1 малы по сравнению с амплитудами волн M2 и S2. Отмечается, что наличие неподвижного льда сильно влияет на амплитуду колебаний уровня моря для полусуточных гармоник и в меньшей на суточные гармоник.

В третьей части главы рассмотрено влияние неподвижного льда на приливные характеристики уровня моря и скорости течений, построены карты разности амплитуд и фаз волны M2 в апреле и сентябре. По результатам численного моделирования получено, что за счет смещения положения амфидромических систем в зимнее время, при наличии льда, амплитуды приливных волн, M2 и S2 увеличиваются по сравнению с безледным периодом.

В четвертой части выполнено сравнение модельных расчетов с натурными наблюдениями за уровнем моря. Верификация модели проводилась путем сравнения результатов расчетов с данными гармонического анализа наблюдений на 60 береговых постах Баренцева и Белого морей. Наибольшее совпадение данных наблюдений и модельных расчетов получено для волны M2 – доминирующей приливной волны в данном регионе. Установлено хорошее совпадение с наблюдениями высоты и фазы волны S2 в западной части Баренцева моря, в Бассейне Белого моря и в трех заливах – Кандалакшском, Онежском и Двинском.

Пятая часть посвящена расчету экстремальных характеристик уровня моря и скорости течений. Рассчитываются суммарные течения, вызванные приливной волной на жидких границах моря, ветром и атмосферным давлением на его поверхности, неравномерным распределением температуры и солености.

В шестой части получены среднемесячные характеристики уровня моря и скорости течений, которые позволяют уточнить экстремальные оценки уровня моря в различных пунктах строительства морских сооружений.

В седьмой части рассматривается оперативная технология расчета уровня моря и скоростей течений, реализованная и функционирующая в Гидрометцентре. Показано, что средняя оправдываемость прогнозов в соответствии с предложенной технологией лежит в пределах 82-100% при допустимой ошибке <30 см, что вполне соответствует нормативным требованиям.

В четвертой главе обсуждается моделирование и прогноз скорости течений и уровня в Балтийском море и Финском заливе.

В первой части главы рассмотрены исторические сведения о наводнениях и о предшествующих прогностических моделях.

Во второй части указано, каким модификациям подверглась основная гидродинамическая модель при создании версии BALT-P, сфокусированной на расчете

колебаний уровня моря с высоким разрешением в Невской губе Финского залива. Расчет ведется для всего Балтийского моря с разрешением 2 морские мили по горизонтальным координатам, а для верхней части Финского залива, включая комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга, с разрешением 90 м, при этом каждое из восьми водопропускных сооружений дамбы закрывается и открывается в заданное время не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени.

Третья часть посвящена расчетам уровня моря в трех исторических наводнениях по модели BALT-P: наводнении 2001 г., 2002 г. и 2003 г. Результаты сравнения расчетов уровня моря с наблюдениями показали, что используемая модель хорошо воспроизводит как величину, так и время наступления максимального уровня моря. Исследованы свободные колебания уровня Балтийского моря, и их роль в формировании второй волны подъема уровня.

В четвертой части представлено моделирование наводнений с учетом работающей дамбы. В пятой части продемонстрированы возможности модели BALT-P совместно атмосферным модулем HIRLAM в построении прогнозов уровня моря на 60 часов.

Пятая глава представляет результаты моделирования и прогноза течений и уровня в Азовском море.

В первой части главы представлены параметры трехмерной гидродинамической модели. Во второй части рассмотрен диагностический расчет наводнения в Таганроге в сентябре 2014 г., а в третьей – диагностический расчет уровня Азовского моря в 2015-2016 гг. В четвертой части представлены прогнозы уровня моря в Таганроге в течение сентября 2014 года и приведены оценки точности прогнозов. Время наступления максимума уровня в наводнении было предсказано по модели во всех четырех прогнозах. В пятой части приведено описание катастрофического наводнения в Таганроге 24 сентября 2014 года. Показано, что во время наступления максимума уровня моря, скорости течения в Таганрогском заливе только у берегов направлены в сторону ветра, а в середине залива – против ветра..

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, что объясняется высокими значениями допустимой ошибки расчета, вызванной изменчивостью уровня моря, которая на станции Таганрог выше, чем на других станциях. Модель хорошо воспроизводит значительную изменчивость уровня моря и работает тем лучше, чем выше изменчивость уровня моря.

В заключении сформулированы 11 пунктов, представляющих выводы диссертационной работы.

Форма изложения материала, публикации, апробация

Диссертация Попова Сергея Константиновича выполнена с соблюдением основных рекомендаций, установленных ВАК при Минобрнауки России. Разработанные в диссертации подходы и полученные результаты представлены на международных и российских конференциях. Результаты работы достаточно полно отражены в публикациях. Приведен список из 19 публикаций автора в изданиях из списка ВАК и 4 четыре свидетельства о государственной регистрации программ и четыре акта внедрения разработанных версий модели Каспийского, Белого, Баренцева и Азовского морей в опера, 17 статей в журналах и сборниках, 34 публикации в материалах и трудах

конференций. Автореферат диссертации соответствует основным положениям, изложенным в диссертации.

Обоснованность и достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, следует из построения численной модели на основе использования физических законов сохранения, использования устойчивых численных алгоритмов, сравнения результатов моделирования с данными наблюдений и результатами расчетов по другим моделям.

Новизна представленных результатов:

Все теоретические результаты на момент публикации являются новыми на основе разработанной трехмерной гидродинамической модели впервые в России внедрены в оперативную практику технологии краткосрочного прогноза изменений уровня и течений для Каспийского, Баренцева, Белого и Азовского морей.

Расчетный комплекс для Балтийского моря, состоящий из двух моделей с разрешением 2 морские мили и 90 м, впервые позволяющий рассчитывать уровень моря во время наводнений в Санкт-Петербурге с учетом постепенного закрытия и открытия ворот дамбы.

Теоретическая значимость полученных результатов заключается а) в разработке численной гидродинамической модели моря предназначенной для расчета уровня моря и системы течений с учетом технологии осушения и затопления территорий. Численная модель реализована в виде программного комплекса, использующего преимущества вычислений на параллельных компьютерах; б) в использование метода объединения гидродинамического и вероятностного моделирования для расчета экстремальных гидрометеорологических характеристик; с) выявление физических механизмов формирования второго пика наводнения в Петербурге.

Практическая значимость полученных результатов

разработанная трехмерная численная модель гидродинамики моря является основой для внедрения в оперативную практику Гидрометцентра России технологии краткосрочного прогноза изменения уровня и течений, и успешно используется для обеспечения гидрометеорологических прогнозов в российских морях: Каспийском, Баренцевом, Белом и Азовском в целях безопасности мореплавания и оповещения населения о возможных штормовых нагонах.

Полученные с помощью сочетания гидродинамического и вероятностного моделирования оценки экстремальных гидрометеорологических характеристик Каспийского моря необходимы при проектировании сооружений на шельфе моря.

Рекомендации по использованию результатов диссертации:

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в научных институтах при разработке численных моделей штормовых нагонов в морях и заливах, в организациях Роскомгидромета, в организациях, осуществляющих экологический мониторинг при составлении экспертных заключений, при планировании промышленных разработок и строительства сооружений в шельфовых и прибрежных районах,

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы по следующим пунктам:

Область исследования - раздел 5 “строение и физика океана”; 8- взаимодействие атмосферы, гидросферы и литосферы.

Формула специальности:

- - разработка методов прогноза явлений в атмосфере и гидросфере с различной степенью заблаговременности, а именно: а) разработка трехмерной гидродинамической модели краткосрочного прогноза уровня моря и скоростей течений, включая приливы и штормовые нагоны; б) разработка технологии расчета переноса загрязняющих веществ в морях (для Каспийского моря); в) разработка метода оценки экстремальных характеристик уровня моря.
- - практическое значение проводимых в рамках данной специальности исследований состоит в обеспечении прогнозов явлений в атмосфере и гидросфере, а именно: трехмерная гидродинамическая модель прогноза скоростей и уровня используется в отделе морских гидрологических прогнозов ФБГУ «Гидрометцентр России» а) для оперативного гидрометеорологического обеспечения Белого, Баренцева, Каспийского морей; б) для ежедневных прогнозов на 48 часов уровня Азовского моря в целях своевременного предупреждения населения о штормовых нагонах.

Замечания по диссертации:

1. Положения, выносимые на защиту, сформулированы в диссертации излишне подробно. Так, например, Пункт 2 вообще ничего не формулирует и повествует о способностях созданной модели. Второе и третье предложение Пункта 3, скорее всего, нужно отнести к выводам 3-й главы. Следующее утверждение “размах ... колебаний ... увеличивается на 1 м с 3,5 м ... до 4,5 м ... в районе о. Тюлений” не является соответствующим положением, которое достойно выносить на защиту.
2. Математическая постановка задачи включает уравнения переноса тепла и соли, в которых отсутствуют диффузионные слагаемые, что не является традиционным. Понятно, что использование при аппроксимации адвективных слагаемых схемы, дающей схемную диффузию, позволило погасить все ложные нефизические осцилляции, но диффузия, как физический процесс, в морях существует и при нулевых скоростях. По крайней мере, следовало бы такой выбор объяснить на этапе математической постановки.
3. Непонятно, почему при формулировке задачи принято нефизическое граничное условие для солености на поверхности (в реальности поток соли равен нулю, ненулевым является поток пресной воды). Автор говорит о проблеме, ссылаясь на справедливые доводы из работы Р.А.Ибраева (2008г.), однако не приводит никакой аргументации почему, в конечном счете, используется нефизическая постановка.
4. Численные схемы выписаны при условии постоянного шага по координатам, что налагает существенные ограничения относительно применимости данной модели к протяженным объектам, когда локально-декартовы координаты становятся неприемлемыми.
5. Алгоритм “осушения-затопления” выписан слишком кратко, нет объяснений, почему выбрана именно указанная последовательность условий, а не другая. Кроме того совершенно не объясняется, что происходит с трехмерной структурой полей если вдруг «сухая» точка превратилась во «влажную», откуда возьмется значение для температуры и солености в этой точке? Каким образом в случае осушения/затопления перераспределяется объем? Если это авторские разработки, требуются более подробные комментарии, если нет - более подробные ссылки и, все равно, более подробные пояснения.
6. Непонятно, почему модельному spin-up уделяется столько внимания. Диагноз и адаптация, по сути, представляют собой установившееся движение при

фиксированном распределении плотности и первую реакцию плотности на это движение. Ни то, ни другое не имеют никакого особенного физического смысла и при описании экспериментов в современных моделях обычно не обсуждаются. Причина в искусственности разделения процесса на эти два этапа, имеющего мало общего с действительными процессами. Исторически использование диагноза-адаптации было связано с необходимостью коррекции грубых приближений распределения плотности в океане с тем, чтобы избежать “шокового” включения начальных распределений.

7. Утверждение что “ветер по реанализу оказался значительно слабее реально наблюдавшегося на станциях” (стр.37) нуждается либо в аргументации, либо в ссылках на работы, где эта аргументация приведена. Вместо этого используется «поле скоростей приводного ветра, полученное из поля атмосферного давления» по некоторым эмпирическим формулам (ни формулы, ни ссылки не приводятся). Если это поле давления получено из того же реанализа, то не утверждается ли что эмпирические формулы работают лучше полноценной модели NCEP/NCAR. Если так то, так и следовало бы утверждать и, опять же, такое утверждение должно быть соответственно аргументировано. Следует заметить, что в результатах NCEP/NCAR все сбалансировано, и если бы в NCEP/NCAR приземный ветер был бы другим, то и приземное давление могло бы измениться существенно. Если же поле давления получено из других источников, то, во-первых, отсутствуют ссылки на эти источники а, во-вторых, непонятно насколько согласованы эти данные с другими характеристиками, взятыми из реанализа. Поле ветра, полученное по этим формулам, следовало бы как-нибудь представить, иначе дальнейшие ссылки на то, куда этот ветер направлен, в различных контекстах выглядят неубедительно.
8. На стр. 41 утверждается, что “среднемесячные значения уровня моря и скорости течения, полученные путем осреднения ежечасных полей, лучше соответствуют природе”, однако, что понимается под “природой”, какой дискретности поля использовались для получения “природы”? Возможно, что очень грубой дискретности, тогда почему ежечасные поля оказались лучше ежедневных или еженедельных?
9. Стр. 41, 23 строка: « В Северном Каспии хорошо заметно влияние сгонно-нагонных колебаний уровня моря, приводящее в среднем к повышению уровня у западного побережья Северного Каспия и понижению у восточного» -- что нам об этом говорит? без демонстрации поля ветра, также осредненного за 60 лет, трудно согласиться, что именно сгонно-нагонные колебания приводят к повышению уровня у западного побережья. «У южного берега Каспия образуются повышения уровня моря, соответствующие антициклоническим вихрям» или «вблизи южного побережья Южного Каспия выделяются два антициклонических круговорота». Непонятно, о каких вихрях или круговоротах идет речь, поскольку из рис 2.86 этого не видно, т.е. видно лишь повышение уровня.
10. На стр.42 «В декабре в Северном Каспии изменения уровня моря, вызванные ветром гораздо меньше, чем в июле, так как часть Северного Каспия покрыта льдом». Ранее на стр.38 указывалось, «В зимние месяцы задавалась ежесуточная сплоченность льда». Непонятно, что понимается под словом “лед” в данном контексте, это модель или набор каких-то данных, имеется ли толщина (от нее сильно зависят потоки), подвижен ли лед или статичен? Все это следовало бы описать. Только через 50 страниц на стр.94 появляется некоторая информация о наличии банка ледовых карт.

11. При описании постановки граничных условий в Баренцевом море конкретно не указано, учитывается ли движение льда или он считается неподвижным даже при малой сплоченности. Непонятно также дальнейшее утверждение о том, что "районы моря со сплоченностью льда меньше 1 считаются свободными ото льда, а в районах со сплоченностью 1 лед считается неподвижным" -- при таком определении по результатам модели [Hunke, Dukowicz, 1997] (используются автором), например, вся Арктика может считаться свободной ото льда. По этой причине, ряд результатов, связанных со льдом, выглядит сомнительным, поскольку имеем две крайности -- льда либо нет, либо он припайный.
12. Нет ясности относительно того, как конкретно в модели учитываются (или рассчитываются) приливы, что является их источником на границе области. Говорится об использовании временного хода приливной составляющей, предвычисленной по гармоническим постоянным, но как он использовался - непонятно. Верификация расчетов приливных колебаний, скорее всего, не может быть проведена полноценно с помощью данных береговых постов, поскольку гармонические постоянные, как правило, непригодны для прибрежных районов. Например, данные модели Ерофеевой более-менее справедливы для океана глубиной порядка 1 км и больше, в прибрежных районах учет локальной топографии может приводить к существенным коррекциям, как амплитуд, так и фаз приливных колебаний. Данные работы [Kowalik, 1993], на которую ссылается автор, относятся только к гармоникам K1 и O1. Откуда брались остальные шесть не указано. Тем более, что далее указывается что именно амплитуды K1 и O1 малы по сравнению с M2 и S2.
13. При моделировании наводнений в Финском заливе, принимается условие вертикальных границ бассейна, т. е. затопление и осушение не учитывается. Это неожиданно, так как на примере Каспийского моря показано, что учет этих факторов позволяет более точно описывать уровень, а для прогноза развития наводнения в заливе адекватный прогноз уровня является наиболее важным.
14. Общее замечание к представлению материала: при описании постановки экспериментов и обсуждении результатов пропускается часто информация об используемых данных или их источниках (например, откуда брался климатический сток Волги и каков он? Почему вдруг на стр.41 появляются еще реки Урал, Терек Сулак? Что представляют собой поля ежесуточной сплоченности льда, и т.д.). Эта информация в каком-то виде иногда появляется через несколько параграфов. Такой подход затрудняет восприятие материала.

Сделанные замечания по большей части относятся к представлению проделанной работы в тексте диссертации. Они не снижают высокую оценку самой работы и ее несомненную практическую значимость.

Заключение

Диссертационная работа Попова Сергея Константиновича «Моделирование и прогноз изменения уровня и скорости течений в морях России» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных лично автором исследований, разработаны теоретические положения, совокупность которых является научным достижением, и решена научная проблема, имеющая важное прикладное значение для обеспечения прогнозов опасных погодных явлений. Работа содержит научно-обоснованные алгоритмические решения, представление которых в виде

программного продукта, способно внести значительный вклад в разработку систем экологического мониторинга и предупреждения об опасных природных явлениях. Практическая значимость работы подтверждается внедрением результатов исследования в систему оперативного гидрометеорологического обеспечения деятельности в морях России.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК при Минобрнауки России к докторским диссертациям, а ее автор, Попов Сергей Константинович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Диссертационная работа и отзыв на нее обсуждены и одобрены на заседании научного семинара “Физика атмосферы и океана и охрана окружающей среды” Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук 25 апреля 2019 г., протокол №1.

09.09.2019

Отзыв подготовили:

Главный научный сотрудник, заведующий «Лабораторией математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, доктор физико-математических наук по специальности 25.00.29


Геннадий Алексеевич Платов

Ведущий научный сотрудник «Лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, доктор физико-математических наук по специальности 25.00.29


Елена Николаевна Голубева

Подпись Г.А.Платова и Е.Н. Голубевой заверяю

Ученый секретарь ИВМиМГ СО РАН, к.ф.-м.н.  Л.В.Вшивкова