

Российское научно-техническое общество судостроителей
имени Алексея Николаевича Крылова
Сахалинское отделение

Российская академия наук
Дальневосточное отделение
Специальное конструкторское бюро
средств автоматизации морских исследований

Храмушин Василий Николаевич

На правах рукописи

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ:
МОРСКИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ
И ПРОГНОЗ ОПАСНЫХ МОРСКИХ ЯВЛЕНИЙ**

Специальность:
25.00.29. физика атмосферы и гидросферы

*Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук*

Южно-Сахалинск
2005-06-01 – 2017...

Работа выполнена в Специальном конструкторском бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,

доктор физико-математических наук,

доктор технических наук,

Ведущая организация _____

Защита диссертации состоится «__» _____ 201_ года в __ часов на заседании Диссертационного Совета _____ при _____, по адресу: _____

С диссертацией можно ознакомиться в интернет:
http://shipdesign.ru/Khram/Doctoral-thesis_Waves.pdf

Автореферат разослан «__» _____ 2005-2017 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Сахалинская область – единственный регион в Российской Федерации, полностью расположенный на многочисленных островах в Японском, Охотском морях и на Тихом океане. Область является уникальным для России морским регионом, географическое положение которого обязывает активно развивать системы мониторинга и контроля морских акваторий, поддерживать эффективность функционирования морских служб и действенность систем предупреждения об опасных морских, метеорологических и сейсмических явлениях.

Для успешного функционирования морских коммуникаций и освоения ресурсов сахалинского шельфа необходимы регулярные и комплексные морские исследования, ориентированные на создание условий для эффективного обустройства прибрежной инфраструктуры и оптимального проектирования береговых и шельфовых гидротехнических сооружений, и в том числе нацеленные на обеспечение безопасности мореплавания и предотвращение последствий морских катастроф природного и техногенного характера.

Актуальность выполненных исследований обусловлена быстрым обновлением средств вычислительной техники и телеметрических систем сбора оперативной информации о состоянии моря, что при активном использовании вычислительных экспериментов по моделированию динамики океана дает возможность существенного повышения эффективности работы всех морских служб, активизации морских работ и изысканий, которые на прежнем техническом уровне были слишком дорогостоящими или принципиально нереализуемы.

Высокая штормовая и сейсмическая активность морских акваторий Сахалинской области, особенно вблизи Курильских островов, требует постоянного изучения физики и гидродинамики столь грозных явлений природы, должный контроль и заблаговременный прогноз потенциально опасных проявлений которых является ключевым условием эффективного развития экономики всего Дальнего Востока России.

Современные информационно-вычислительные технологии и вычислительные эксперименты по моделированию гидродинамических процессов позволяют на новом научно-техническом и технологическом уровне проводить контроль морских акваторий и взаимодействия атмосферы и океана, в том числе с целью заблаговременного прогноза опасных морских явлений в условиях работы морских служб, оперативных и спасательных центров.

Объектом исследования являются математические модели и компьютерные алгоритмы для построения прямых вычислительных экспериментов в гидромеханике, комплексы программного обеспечения и методы прямого численного моделирования длинноволновых процессов, взаимодействия атмосферы и океана, в том числе с целью оперативного прогноза опасных морских явлений. В работе даются результаты использования новых методов моделирования для дальневосточных морей России.

Современный этап развития систем контроля и наблюдения за обстановкой на море знаменуется активной интеграцией идей и методов исследования Мирового океана, быстрым внедрением новых технических средств и телеметрических систем оперативного обнаружения потенциально опасной динамики взаимодействия атмосферы и океана, катастрофических процессов геофизического или техногенного характера.

Современные методы оценки состояния моря развиваются на фоне возрастающих возможностей вычислительной техники. Это открывает перспективы активного использования прямого численного моделирования гидродинамических процессов в открытом океане и вблизи защищаемых участков морского побережья, в том числе используемых в режиме автоматического построения вычислительных экспериментов.

При оперативном анализе информации о состоянии моря, непрерывно поступающей по телеметрическим каналам связи, могут, также, использоваться данные от других систем наблюдения, к примеру, материалы дистанционного зондирования Земли из космоса, но все эти разрозненные во времени и пространстве данные могут быть увязаны с помощью единой модели состояния моря и атмосферы, построенной на основе непрерывного численного моделирования гидрофизических процессов в морских акваториях.

В настоящем исследовании созданы теоретические основы и разработаны новые математические модели, программное обеспечение ЭВМ и методы комплексного изучения длинноволнового режима в открытом море, в мелководной шельфовой зоне и на акваториях закрытых бухт и гаваней портов, необходимых как для гидротехнических изысканий при строительстве морских инженерных сооружений, так и для принятия эффективных решений по защите прибрежной инфраструктуры и минимизации ущерба от геофизических катастроф на море.

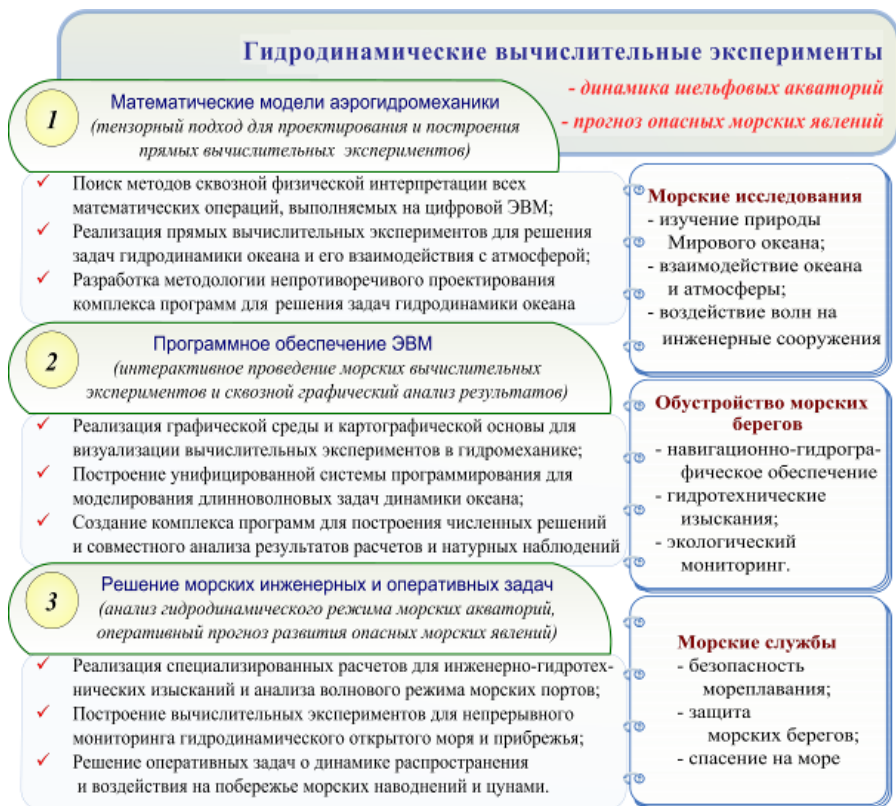


Рис. 1. Функциональная схема исследований, составленная в проектном направлении «снизу–вверх»: от имеющихся теоретических разработок - к доступным для реализации прикладным задачам в области гидродинамических вычислительных экспериментов.

Логическая схема диссертационной работы построена по принципу исследования фундаментальных математических законов механики сплошных сред, ориентированных на решение широкого круга прикладных задач гидромеханики океана, атмосферы и их воздействия на морские стационарные и плавучие инженерные сооружения. В практическом использовании круг реализованных математических моделей сужается для решения конкретных инженерных задач, в данном случае - длинноволновой гидродинамики океана. Применимость новых вычислительных технологий расширяется прикладными задачами для решения гидротехнических задач и оперативного моделирования опасных морских явлений, которые доведены до уровня практического внедрения в действующие морские службы.

Цель и задачи исследования

Главной целью диссертационных исследований является разработка теоретических основ и реализация новых информационно-аналитических технологий для эффективного контроля длинноволновых гидродинамических процессов в океане и его прибрежной зоне, изучения динамики взаимодействия океана и атмосферы.

Изучение природы опасных морских явлений и поиск технических решений для оперативного прогноза штормов, наводнений и цунами, изначально ориентированы на комплексное решение задач о минимизации ущерба от морских катастроф природного и техногенного характера, на безусловное поддержание безопасности мореплавания и обеспечение устойчивости морской инфраструктуры в целом.

Весь комплекс исследований разделен на три взаимосвязанных направления, с единых позиций представляющих задачи изучения гидродинамических процессов в океане, исследование условий возникновения и развития потенциально опасных морских явлений и обосновывающих научно-технические решения для их заблаговременного прогноза.

1) Создание новых математических моделей гидромеханики, изначально ориентированных на проведение прямых вычислительных экспериментов, в которых все расчетные объекты и алгоритмические процессы представлены в тензорной форме, и на любых этапах моделирования могут сравниваться с телеметрическими данными о текущем состоянии атмосферы и океана, в том числе поступающими по цифровым каналам связи от автоматических регистраторов и систем дистанционного мониторинга океана и атмосферы (*глава 1*);

2) Проектирование и реализация новых программных комплексов, позволяющих не только анализировать гидродинамические и гидрофизические процессы в океане, но и проводить быстрые вычислительные эксперименты с целью прогноза развития опасных морских явлений или необратимых процессов в открытом море и мелководных прибрежных акваториях (*глава 2*);

3) Разработка технических решений и методов морских инженерных гидротехнических изысканий и оперативных прогнозов опасных морских явлений, выполняемых при минимально доступной информации для постановки гидродинамических вычислительных экспериментов, с возможностью последовательного уточнения результатов моделирования по мере проведения морских экспедиционных работ или поступления оперативных данных о реальном развитии гидрофизических и гидродинамических процессов на море (*глава 3*).

На настоящем этапе, реализованные вычислительные эксперименты позволяют решать следующие ключевые задачи гидродинамики океана и воздействия волн на морское побережье:

- изучение длинноволнового режима в открытом море, мелководной шельфовой зоне и на акваториях закрытых бухт и гаваней портов;
- численные гидротехнические изыскания волнового режима при строительстве морских инженерных сооружений;
- инженерные и оперативные расчеты с целью прогноза проявления длинных волн на конкретных участках морского побережья, и с целью поиска эффективных технических решений по минимизации ущерба от грядущих геофизических катастроф на море.

Методологические основы и источники исследования.

Основным методом исследования явилось построение унифицированного логического, математического и алгоритмического аппарата для проектирования и построения вычислительных экспериментов гидромеханики, содержащего внутренние средства для анализа корректности проводимых вычислений.

Цифровые ЭВМ позволяют аппроксимировать непрерывные поля и моделировать процессы гидроаэромеханики только с помощью дискретных шагов во времени и малых элементарных объемов в пространстве – крупных частиц жидкости. В настоящей работе показываются результаты обобщений численных схем, выполненных при поиске эффективных компьютерных алгоритмов решения прикладных задач гидромеханики.

Конечноразностные дифференциалы, с которыми работал еще Исаак Ньютон, удалось формализовать в рамках тензорного исчисления, дающего возможность линейной интерполяции физических параметров между смежными пространственными ячейками и их расчетными узлами. Такой вычислительный инструмент, как оказалось, не только упрощает форму представления традиционных расчетных схем, но и способен претендовать на своеобразный теоретический анализ некоторых явлений и парадоксов механики сплошных сред. В тензорной модели гидромеханики всегда учитываются конвективные составляющие течений; имеется возможность контроля физической корректности моделируемых процессов непосредственно в ходе вычислений; уточняются некоторые новые явления и парадоксы механики жидкостей, от которых зависит принципиальная возможность и качество постановки вычислительных экспериментов.

Инструментальная поддержка исследований обеспечивалась созданием специальной среды программирования, содержащей необходимый набор графических и картографических функций для гибкого построения сложных численных моделей длинноволновой динамики океана, и обеспечивающей сквозной анализ всех вычислительных объектов и алгоритмических процессов ЭВМ. Соблюдение методических разработок стало возможным на пути создания полного комплекса программного обеспечения, поддерживающего автоматизированные режимы подготовки исходных данных, проведение и анализ результатов гидродинамических вычислительных экспериментов.

Источником исследований явились традиционные конечно-разностные схемы численного решения систем дифференциальных уравнений механики сплошных сред в частных производных:

- прямые вычислительные эксперименты с использованием крупных частиц жидкости (метода конечного объема);
- функционально-алгоритмическая унификация систем разностных уравнений с помощью тензорных формализаций;
- формирование численных моделей и разделение процессов вычислений по принципу допустимости сквозного физического контроля всех расчетов в размерной форме;

Для верификации новых математических моделей активно использовались прибрежные и морские экспедиционные исследования гидродинамики морских инженерных сооружений, океана, атмосферы и их взаимодействия, в том числе выполненные под непосредственным руководством автора работы.

На защиту выносятся следующие основные результаты работы:

1. Новый специальный вычислительный аппарат для систем конечно-разностных уравнений в тензорной форме, согласованный с методом непротиворечивого проектирования сложных алгоритмов и программных комплексов для численного решения прикладных задач длинноволновой гидродинамики, взаимодействия атмосферы и океана:

2. Новый программный комплекс для проведения прямых вычислительных экспериментов по моделированию длинноволновых процессов в открытом океане, в его шельфовых и мелководных прибрежных акваториях. Комплекс обеспечивает решение широкого круга длинноволновых задач с использованием ограниченных вычислительных ресурсов, доступных в условиях работы оперативных служб, морских экспедиций и автоматических систем мониторинга морских вод;

3. Законченные методические разработки для численного решения морских инженерных и оперативных задач, основанных на прямых гидродинамических вычислительных экспериментах по моделированию цунами, штормовых нагонов, приливного режима, собственных длинноволновых колебаний на акваториях заливов и гаваней портов.

Научная новизна исследования заключается в создании новых математических моделей и методов проектирования высокоэффективных компьютерных алгоритмов для построения вычислительных экспериментов в гидромеханике океана и атмосферы, морских течений, колебаний уровня моря и штормового волнения, предназначенных для решения прикладных задач обеспечения безопасности штормового мореплавания и защиты морских инженерных сооружений от морских наводнений и цунами.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решены следующие научно-технические задачи:

- Созданы теоретические основы и методы практической реализации вычислительных экспериментов в гидромеханике, основанные на функциональной проработке метода непротиворечивого проектирования больших комплексов программ и на обобщении конечноразностных систем уравнений с помощью тензорных формализаций, позволяющих проводить сквозной анализ и контроль корректности всех вычислительных процессов на цифровой ЭВМ;

- Реализован программный комплекс для проведения вычислительных экспериментов и анализа данных о состоянии морских акваторий, позволяющий в наглядной графической форме управлять всеми моделируемыми процессами, распараллеливать вычисления на сетевых компьютерах и совместно анализировать как расчетные, так и телеметрические материалы, поступающие от гидрофизической и сейсмической подсистем контроля морских акваторий;

- Выделены типовые расчетные сценарии проведения вычислительных экспериментов: «краткосрочный прогноз», «штормовой режим», «кризисный контроль», «гидрографические изыскания», «режимный контроль морских акваторий» и «повседневные морские научные исследования». Разработана методология выбора внешних возмущений поверхности моря для характерных задач мониторинга и контроля морских акваторий, реализованы необходимые математические модели, пригодные для повседневного или тревожного использования в рамках выбранного сценария функционирования морского академического цен-

тра, морских служб и оперативных центров штормовых и тревожных оповещений.

При разработке нового математического обеспечения использовано множество авторских решений, которые позволили существенно ускорить вычислительные процессы и объединить решение всего комплекса задач длинноволновой динамики океана в виде единой информационно-вычислительной системы.

В русле поиска новых методик для решения традиционных гидротехнических задач, связанных с изучением волнового режима в закрытых акваториях, разработаны специальные вычислительные эксперименты для оптимального проектирования новых портовых сооружений и реконструкции операционной гавани подходов к порту, позволяющие улучшить штормовую защищенность и условия эксплуатации морского порта.

Практическая ценность.

Новые технические решения и реализованные комплексы компьютерных программ, по мере их практического внедрения, создадут научную основу для совершенствования и качественного информационно-аналитического перевооружения морских служб Сахалинской области. Скорейшее внедрение новых вычислительных технологий необходимо для активизации морских исследований в шельфовых акваториях и на побережье Сахалина и Курильских островов, их использование значительно повысит безопасность производственных работ и мореплавания на морских коммуникациях Дальнего Востока России.

В настоящее время информационно-вычислительный комплекс активно используется в научно-исследовательских работах СКБ САМИ ДВО РАН, связанных с изучением динамики атмосферы и океана, особенностей приливного режима в Охотском море, при выполнении исследований опасных морских явлений, таких как цунами и штормовые нагоны. Основное математическое обеспечение подготовлено к внедрению в практическое использование в условиях оперативных служб и морских отделов гидрометеослужбы.

Разработанные методы проектирования и реализации гидродинамических вычислительных экспериментов носят универсальный характер и могут активно задействоваться в исследованиях природы Мирового океана, а также найти практическое применение в судовых бортовых системах контроля условий мореплавания; в качестве инструментального средства для автоматизированного анализа обстановки на море; в том числе с использованием телеметрических данных от автоном-

ных морских измерительных комплексов и систем дистанционного мониторинга состояния моря и атмосферы.

Новый информационно-вычислительный комплекс выполнен в виде графической экспертно-информационной системы, обеспечивающей объединение и унификацию работы с океанологической, гидрометеорологической и сейсмологической информацией. Комплекс программ приспособлен к решению практических задач в условиях оперативной службы предупреждения об опасности цунами, штормовых нагонов, тягунов в портах, для своевременного обнаружения других опасных морских явлений, для обоснования действия по предотвращений морских аварий и катастроф.

Прикладное значение результатов исследований по моделированию длинноволновых гидродинамических процессов представляется в инженерных гидротехнических изысканиях, в подготовке оперативных прогнозов опасных морских явлений и проведении научных исследований гидродинамического режима в морских акваториях Дальнего Востока России.

Новые разработки пригодны для практического моделирования цунами, штормовых нагонов и приливного режима, что уже сейчас может быть активно использовано в повседневной практике ведомственных оперативных служб и режимных отделов Управлений по гидрометеослужбе, ведущих наблюдение за состоянием моря.

Комплекс взаимосвязанных программ позволяет решать следующие прикладные задачи: 1) – выполнение вычислительных экспериментов в океанологии при моделировании различных явлений длинноволновой динамики океана; 2) - ведение и анализ временных рядов наблюдений в океанографии и сейсмологии; 3) – создание и ведение архивов, визуализация и динамическое редактирование батиметрических массивов и векторных географических карт.

Внедрение основных результатов работы.

Диссертационная работа является составной частью научно-исследовательских работ, выполняемых в СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН в рамках Плана фундаментальных исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (тема Тензор – «Трехмерная тензорная математика вычислительных экспериментов в гидромеханике, № Г/р [01.200.1 18177](#), и тема Море – «Автоматизированная система наблюдений за опасными морскими явлениями, № Г/р [01.200.1 18175](#)).

К современному виду математическое обеспечение ЭВМ приведено при реализации исследований по грантам РФФИ № 97-05-66037 «**Математическое и вычислительное моделирование приливного режима и режима течений в Охотском море**» и № 97-01-96010 «**Теоретические исследования и численное моделирование камчатских цунами, вопросы совершенствования единой дальневосточной системы предупреждения о цунами**».

Новые математические модели и программное обеспечение ЭВМ внедрены в исследовательские работы и опытное использование в Сахалинском центре цунами, в Сахалинском Управлении по делам ГО и ЧС, в лаборатории цунами ИМГиГ ДВО РАН, в Дальневосточном научно-исследовательском гидрометеорологическом институте.

С использованием результатов гидродинамических вычислительных экспериментов, под руководством автора в СКБ САМИ ДВО РАН выполнены следующие НИР:

- Анализ и моделирование распространения гидроакустического сигнала на стационарной трассе о.Сахалин–о.Итуруп № Г/р 01.9.90 003157, Инв. № 02.99.00 05018, Южно-Сахалинск, 1999. 174 с.

- Исследование мореходных качеств корабля, оптимизация формы корпуса и корабельной архитектуры с позиций наилучшей штормовой мореходности и безопасности мореплавания: № Г/р 01.9.90 003155, Инв. № 02.20.02 00437. Южно-Сахалинск, 2001. 128с; 2 этап. № Г/р 01.20.01 18176, Инв. № 02.20.02 06405, 2002. 93 с; *Закл.этап.* Инв. № 02.20.03 07015, 2003. 65с.

- Гидрологические и химические исследования морских и прибрежных вод, грунтов, исследования загрязненности атмосферного воздуха. № Г/р 01.9.90 003152, Инв. № 02.200.2 00438, Южно-Сахалинск, 2001. 289 с.

- Автоматизированная система наблюдений за опасными морскими явлениями № Г/р 01.20.01 18175, Инв. № 02.20.02 06404, Южно-Сахалинск, 2002, 101с. *Закл.этап.* Инв. № 02.20.03 05793, 2003, 163 с.

- Экспедиционные и аналитические исследования гидрофизических и гидродинамических процессов во внешних акваториях сахалинских портов, № Г/р 01.200.1 18175, Инв. № 02.20.02 06404, Южно-Сахалинск, 2002, 101с.

- Создание компьютерной картографической информационной системы Сахалинской области, разработка действующей модели экспертной системы предназначенной для информационного обеспечения экологического контроля в Сахалинской области, № Г/р 01.9.90 003156, Инв. № 02.99.00 05122, Южно-Сахалинск, 1999, 249 с. 2 этап. Инв. № 02.2001.09219, 2000, 266 с. *Закл.этап.* Инв. № 02.20.01.09220, 2001, 353 с.

Личный вклад автора. Всего по теме диссертации автором лично (22) и в соавторстве опубликовано 67 статей и 3 монографии. Они отражают основные результаты диссертации.

Методы проектирования и постановки вычислительных экспериментов, построение тензорных формализаций вычислительной гидромеханики и реализация сложных программных комплексов выполнены, изучение штормовой мореходности корабля и поиск технических решений для обеспечения безопасности мореплавания выполнены автором лично [2,5,9,17,20,21,30].

Создание новых технических средств и методов телеметрического контроля состояния моря, атмосферы и их воздействия на побережье и судно в открытом море, выполнены совместно с *М.Л. Красным* [1,2,8]. Математические модели длинноволновой гидродинамики, прикладные вычислительные эксперименты и экспедиционное обследование морских акваторий выполнены совместно с *А.В. Файн* и *В.А. Шустиным* [3,6,7]. В совместных работах по изучению проблемы цунами активное участие принимали *А.А. Поплавский*, *В.И. Иванов*, *К.И. Непон* [4,10,11,13,14].

Апробация работы. Основные научные положения и результаты работы многократно представлялись на международных, всесоюзных и всероссийских симпозиумах и конференциях, доложены и обсуждены на семинарах лаборатории цунами ИМГиГ ДВО РАН, ДВНИГМИ в г. Владивостоке, в Военно-морском инженерном институте и в НТО им.ак. А.Н. Крылова в Санкт-Петербурге, в Институте тепломассообмена АН Белоруссии в г. Минске и др.

На основе результатов и технических предложений, разработанных в ходе диссертационных исследований, под редакцией автора подготовлены следующие научные издания:

1. Охрана природы, мониторинг и обустройство Сахалинского шельфа / *Ред. М.Л. Красный, В.Н. Храмушин, Р.П. Бернгардт.* – Южно-Сахалинск: Сах. кн. изд-во, 2001, 180 с. (рус, англ.).

2. Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана. Вып. 1: сб.ст. /ред.выпуска *В.Н. Храмушин.* - Владивосток: ДВО РАН, 2005 – 192 с.;

3. Информационный ресурс www.Science.Sakhalin.ru «Наука». *Ред. Храмушин В.Н., Красный М.Л.* СКБ САМИ ДВО РАН, Научно-экспертный совет при адм. Сах.обл. Южно-Сахалинск: Сахалинское управление «Дальсвязь». 26 Мбайт.

Результаты исследования штормовой мореходности и безопасности мореплавания в дальневосточных морях России отмечены золотой медалью Всемирного салона инноваций, научных исследований и новых

технологий “Brussels Eureka 2002”: Форма корпуса корабля повышенной мореходности. *Турмов Г.П., Антоненко С.В., Бугаев В.Г., Суров О.Э., Храмушин В.Н.* / Всемирный салон инноваций, научных исследований и новых технологий «Брюссель–Эврика–2002», 12–17 ноября 2002 года. *Золотая медаль.*

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано более 50 печатных работ в виде монографий, разделов монографий, научных статей и докладов на научных конференциях и симпозиумах. По данной тематике и близким к ней, под руководством автора выполнено 11 НИР. Список основных научных работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 142 наименований. Общий объем работы составляет 295 страниц машинописного текста, включая 76 рисунков и 16 таблиц.

Основное содержание работы

В основе диссертационной работы лежат материалы исследований длинноволновой динамики океана, по результатам которых созданы комплексные вычислительные эксперименты для моделирования различных гидродинамических процессов в океане и его прибрежной зоне. Новые разработки вполне пригодны для практического моделирования цунами, штормовых нагонов и приливного режима, что уже сейчас может быть активно использовано в повседневной практике ведомственных оперативных служб и режимных отделов Управлений по гидрометеослужбе, ведущих наблюдение за состоянием моря.

Традиционно вопросы проектирования портовых сооружений и обустройства безопасных гаваней, так же как и выбор оптимальных режимов штормового плавания флота на морских коммуникациях, решаются с использованием комплексного изучения гидрометеорологических, гидродинамических и гидрофизических условий, в первую очередь выполняемых в специальных морских экспедициях. Отмечая быстрое развитие технических средств судовождения, в настоящей работе удалось применить современное судовое навигационное оборудование для изучения гидродинамических условий морских акваторий по ходу экспедиционного судна, что позволило сверить результаты длинноволновых вычислительных экспериментов с реальным состоянием фоновых колебаний уровня моря, и обосновать новые методы эффективного контроля морских акваторий с участием флота, находящегося в море, и прибрежных телеметрических регистраторов, объединяемых в единый комплекс мониторинга морских акваторий с помощью прямого численного моделирования гидродинамических процессов, в том числе учитывающих штормовые условия в атмосфере и сейсмические события на морском дне.

В практической части работы показываются материалы исследований в области математического моделирования длинноволновой динамики океана, по результатам которых создаются комплексные вычислительные эксперименты, предназначенные для изучения различных гидродинамических процессов в океане и его прибрежной зоне. Раскрываются особенности вычислительного моделирования цунами, штормовых нагонов и приливного режима, ставятся проблемы и задачи, решение которых необходимо для внедрения автоматизированных информационных систем и вычислительного моделирования динамики океана в повседневную практику оперативных служб наблюдения за состоянием моря.

Во **Введении** обосновывается актуальность проблемы, приведена краткая характеристика комплекса решаемых задач, определяется объект исследований и обосновываются пути достижения поставленной цели.

Глава 1. Математические и алгоритмические модели для построения вычислительных экспериментов при решении гидродинамических задач.

Вычислительные эксперименты в длинноволновой гидромеханике океана, оперирующие многомиллионными массивами данных о состоянии окружающей среды, представляются идеальным физическим процессом, имеющим строгую математическую основу для отработки специальной среды программирования и формальных методов эффективной реализации широкого круга прикладных задач изучения динамики морских вод; моделирования взаимодействия океана и атмосферы; анализа условий зарождения и развития потенциально опасных морских явлений. Это послужило основой для рассмотрения математических основ проектирования и построения прямых гидродинамических вычислительных экспериментов, нацеленных на создание базовой логики, новых числовых объектов и унифицированных математических операций, в полной мере соответствующих особенностям цифровой вычислительной техники и методам алгоритмического представления прикладных задач механики сплошных сред. В результате удалось обосновать теоретические основы для построения обобщенных вычислительных экспериментов в гидромеханике, сводящихся к реализации специального языка программирования, имеющего прямое алгоритмическое представление, максимально приближенное к особенностям цифровой вычислительной техники, и в том числе создающее проектные предпосылки для создания новых поколений компьютеров с глубоко распараллеленными вычислительными процессами, оперирующими унифицированными элементарными объектами гидромеханики в тензорной форме.

Очень важно, что и современная цифровая вычислительная техника позволяет динамически экспериментировать при анализе изучаемых процессов физики моря, в графическом виде выявлять самые тонкие особенности численных схем и моделируемых природных явлений, создавая тем самым условия для комплексного решения задач аэрогидромеханики инженерных сооружений, Атмосферы, Океана и пластичной поверхности Земли в целом.

Практическая отработка новых вычислительных схем в диссертационном исследовании выполнялась с использованием хорошо известного волнового гиперболического уравнения о распространении про-

дольных волн в упругой среде (*длинных волн на море*), допускающего каноническое представление математической модели и явную одношаговую постановку вычислительной задачи для построения нестационарных во времени вычислительных экспериментов, и тестирования различных, и в том числе гибридных численных схем.

Эта модель, после допущений о малости влияния конвективных эффектов, довольно легко сводится к одному дифференциальному уравнению второго порядка, но в численном решении эти модели не могут быть названы идентичными:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \eta}{\partial \bar{r}} = 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{r}} \right) = 0 \end{array} \right. \left(\frac{\partial}{\partial \bar{r}} \right) \Leftrightarrow \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - C^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial \bar{r}^2} = 0,$$

где: $H = \eta + D$ – полный уровень моря, с учетом высоты волны; $U = V \cdot H$ – скоростной поток жидкости учитывает влияние глубины моря; $C^2 = g \cdot H$ – скорость свободного движения волны здесь выступает в качестве весового коэффициента. В записи уравнений использовано формальное векторное представление пространственной производной для $\delta \vec{r}$, которая соответствует градиенту (grad), а в случае использования простых скобок – как дивергенции (div), квадратных – ротору (rot). Однако такая формализация математических операций не дает возможности строгой и полной интерпретации физических процессов при построении реальных вычислительных экспериментов в гидромеханике, что обусловлено невозможностью сведения реологических свойств жидкости к одной - бесконечно малой точке.

Аналогичную по форме численную модель можно построить прямым рассмотрением сил на границах малого деформируемого контрольного объема (метод конечного объема), когда дифференциалы изначально трактуются в виде конечных разностей.

На рис. 2. показано выделение элементарного вычислительного объекта – крупной частицы жидкости из дискретного сеточного разбиения пространственного поля. Важно отметить, что дифференциальные (разностные) операции на сеточном пространстве всегда соотносятся не с узлами сетки, а с центрами масс (объемов) образуемых их узлами элементарных частиц, внутри которых действуют линейные аппроксимации.

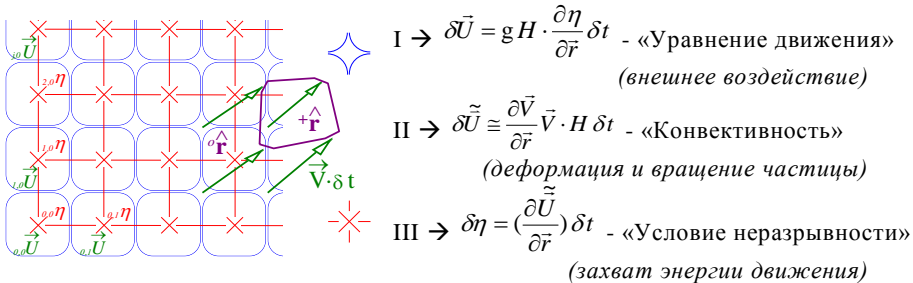


Рис.2. Выделение элементарного вычислительного объекта – крупной частицы жидкости из традиционной сеточной области дискретного разбиения пространственного поля, построенного для моделирования гидродинамических процессов на цифровой ЭВМ. Важно отметить, что дифференциальные (разностные) операции на сеточном пространстве всегда соотносятся не с узлами сетки, а с центрами масс (объемов) образуемых этими узлами элементарных частиц, внутри которых действуют линейные аппроксимации.

Полученная схема разностных вычислений не связана непосредственно с волновыми (гиперболическими) решениями механики сплошных сред. Упрощающей особенностью длинноволновых решений является возможность пропуска этапа **II**, на котором определяются конвективные свойства течения. Для идеальной жидкости (эллиптических уравнений математической физики) формально отсутствует этап **III**, точнее он является контрольным по условию сохранения объема жидкости при исполнении первых двух этапов. А так как на этапах **I** и **II** невозможно в явной форме разделить искомые векторные потоки U , то явное численное решение задачи и, соответственно, сквозной анализ численного решения традиционными методами становятся неразрешимыми.

Включение в вычислительную модель этапа **II**, который, по сути, задается интерполяционным оператором для учета малых, но конечных, смещений частиц жидкости, и - переводит процесс моделирования к решению полной задачи механики сплошных сред, с учетом реологических свойств жидкости, как вязкость, упругость и сжимаемость.

Из сказанного следует вывод, что вычислительные эксперименты в механике сплошных сред опираются на собственный математический аппарат конечных разностей (как в пространстве, так и во времени), в основе которого лежат аппроксимации непрерывных функций ограниченным количеством опорных величин, распределенных в дискретных ячейках памяти цифровой ЭВМ.

Логика вычислительных моделей. Следуя обязательному правилу о сквозной физико-механической интерпретации всех вычислительных объектов и операций, выполняемых на ЭВМ при проведении вычислительного эксперимента, можно сформулировать основные требования, которые должны соблюдаться на этапе проектирования новых вычислительных экспериментов в гидромеханике:

1) Элементарные объекты гидромеханики должны определяться только в размерной форме;

2) Вычислительные операции должны быть определены в строгой взаимосвязи физических свойств жидкости и законов механики, которые должны применяться в условиях автоматического преобразования координатных величин и пересчета физических размерностей;

3) Свойства вычислительных операций и элементарных числовых объектов определяются как в единой – абсолютной системе координат, так и в локальных - дуальных базисах, связанных с конкретными частицами жидкости.

Методология *«построения тензорной математики для проектирования вычислительных экспериментов в гидромеханике»* может быть представлена по правилу исследовательского проектирования *«снизу-вверх»*, которое возможно при условии, что основные математические инструменты и вычислительные алгоритмы уже известны и опробованы на практике. Соответственно при рассмотрении этого же вопроса в направлении *«сверху-вниз»*, недостающие математические модели и программно-инструментальные средства могут быть должным образом доработаны, что не снимет ограниченности результата, обусловленного недостатком исходных знаний. Оптимальным вариантом поиска искомым проектных решений может быть совместное рассмотрение математических моделей и вычислительных алгоритмов, что и было выполнено в настоящей работе в результате методического изучения и сквозной физической интерпретации всех числовых объектов и операций, реализуемых на цифровой ЭВМ, представляющей непрерывные поля гидромеханики в виде дискретных числовых массивов.

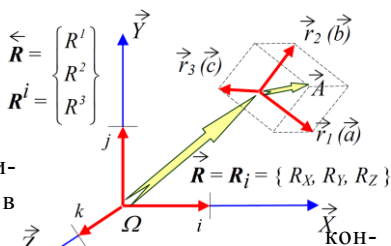
Математическая модель. Практический опыт реализации вычислительных экспериментов, связанный с решением инженерных задач гидромеханики, требовал формализации тех действий, которые необходимы как для ускорения расчетных алгоритмов (*включая оптимизацию циклов вычислений*), так и для унификации процедур, моделирующих законы гидромеханики на внутренних разрывах и внешних границах расчетной области (*обеспечении функциональной невидимости границ*).



Рис.3. Структура трюичной матрицы, определяющей взаимосвязь элементарных объектов вычислительной гидромеханики, применяемых к ним математических операций и логики пространственно-временных преобразований.

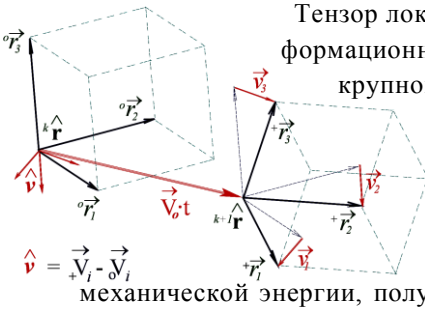
Естественным математическим инструментом для построения элементарных вычислительных объектов стало классическое тензорное исчисление, точнее – его малая часть, моделирующая линейные интерполяционные операции с элементарными физическими объектами в размерном виде (*не выше тензоров II ранга – для 3-мерного пространства*). При этом, свертывание численных схем к тензорной форме, нередко приводит к своеобразной канонической записи исходных уравнений, которые наиболее быстрым и эффективным образом реализуются на цифровых дискретных ЭВМ.

По сути, являясь пространственным расширением конечно-разностной формы классических дифференциалов, тензорное исчисление стало своеобразным упрощением формы записи традиционных численных схем. Однако, теперь в качестве линейных функций предстали и вективные составляющие течения, и реологические свойства жидкости, такие как вязкость, упругость и сжимаемость. Критерии обусловленности тензорных величин одновременно явились критериями существования устойчивых численных решений или признаками соответствующих режимами течения реальной жидкости.



Важным достоинством новой модели является также то, что без потери общности практически все математические записи доведены до уровня простых арифметических операций с матрицами тензоров II ранга, без труда реализуемых на современных быстродействующих компьютерах.

Локальный базис \vec{r}_i местной системы координат образуется тройкой базисных векторов – ортов условно единичной длины.



Тензор локальных скоростей \hat{v} образуется деформационными смещениями базисных векторов крупной частицы жидкости за расчетный интервал времени

На всех этапах численного решения, элементарные тензорные объекты учитывают эффекты аккумуляции и последующего излучения механической энергии, полученной в результате внешних взаимодействий между смежными расчетными ячейками. Внутренняя энергия элементарных деформируемых частиц (если в тензоре конвективных скоростей будут наблюдаться вихревые или дипольные эффекты) может задавать изменение направления реакции на внешние силы, а также изменение величины инерции частицы жидкости, что расширяет применение основных законов механики (для взаимозависимых или неразрывных сред).

Принятые условные обозначения:

- T - абсолютный отсчет времени, с
- t - расчетный интервал времени, с
- ρ - скалярная (точечная) плотность жидкости, кг/м³
- $\hat{r} = \vec{r}_k = r_{ik}$ - тензор формы крупной частицы жидкости
- $\check{\rho} = \check{\rho}^j = \rho^{kj}$ - тензор внутреннего состояния жидкой частицы, кг/м³
- $\hat{M} = M_i^j = \hat{r} \cdot \check{\rho}$ - смешанный тензор, соотносящий внутреннее состояние частицы жидкости на абсолютную систему отсчета [кг];
- \vec{V} - скорость в абсолютной системе отсчета, м/с
- \vec{v} - вектор приращения скорости за интервал времени t , м/с
- \hat{v} - тензор локальных скоростей (приращений скоростей), м³/с
- \check{v} - тензор конвективных скоростей, 1/с
- \hat{f} - тензор напряжений, Н·м²
- \vec{R}_Ω - координаты узла сеточной области Ω на момент времени T
- \vec{R}_+ - координаты смежной точки в следующий момент времени

1. Условный векторный закон движения для деформируемой частицы жидкости на этапах численного моделирования примет форму:

$$\vec{F} = \mathbf{M} \cdot \vec{W} = \mathbf{r} \cdot \rho \cdot \vec{W}; \quad (1)$$

2. Тензор вязких напряжений для Ньютоновой жидкости:

$$\mathbf{f}_H = \mu \cdot \nabla_H = \mu \cdot \nabla_H \cdot \mathbf{T}; \quad (2)$$

3. Тензор упругих напряжений для твердого тела Гука:

$$\mathbf{f}_T = \mathbf{c} \cdot (\mathbf{r} + \nabla_T \cdot \mathbf{t}) \cdot \mathbf{r} = \mathbf{c} \cdot (\mathbf{I} + \nabla_T \cdot \mathbf{t}), \quad (3)$$

Главные реологические константы представлены как тензоры: ρ^{jk} – тензор инерции и μ , \mathbf{c} – тензоры динамической вязкости и жесткости жидкости.

С тензором плотности ρ связывается предыстория деформации элементарных расчетных объектов, что на Лагранжевом этапе вычислительного эксперимента позволяет считать крупные частицы жидкости участвующими в свободном (*корпускулярном*) движении. На всех расчетных этапах будут проявляться упругие и вязкостные свойства жидкости в виде связанных тензоров μ и \mathbf{c} .

Выделением диагонального тензора ∇_{v_0} , такого, что след остатка ∇^* равен нулю: $\nabla = \nabla_{v_0} + \nabla^*$ ($\text{tr } \nabla^* = 0$), получим тензор шарового сжатия:

$$\mathbf{f}_0 = \varepsilon \cdot \nabla_{v_0} \cdot \mathbf{t},$$



где компоненты тензора ∇_{v_0} определяют давление, ε – коэффициент динамического сжатия.

Выделением кососимметричной части тензора ∇^* получен тензор вязких напряжений, с вращением частиц жидкости:

$$\mathbf{f}_H = \mu \cdot \nabla_H = \mu \cdot (\nabla^* - \nabla^{*T})/2.$$



Оставшийся симметричный тензор связывается с упругой деформацией:

$$\mathbf{f}_T = \mathbf{c} \cdot \nabla_T \cdot \mathbf{t} = \mathbf{c} \cdot (\nabla^* + \nabla^{*T}) \cdot \mathbf{t}/2.$$



Полный тензор внутренних напряжений:

$$\mathbf{f} = (\varepsilon \cdot \nabla_{v_0} + \mathbf{c} \cdot \nabla_T) \cdot \mathbf{t}/2 + \mu \cdot \nabla_H.$$

Если течение установившееся, то, за расчетный интервал времени тензор приращения скоростей ∇^* должен компенсировать сам тензор

конвективных скоростей: $\hat{v} \cdot \hat{r} + \hat{r} \cdot \hat{v} = 0$ - традиционное условие неразрывности.

Построение вычислительного эксперимента

1 этап. КИНЕМАТИКА.

Новое поле узловых точек определяется с учетом смещения частиц:

$$\{ \overset{+}{R} = \overset{+}{R} + \overset{+}{V} \cdot t + \overset{+}{F} \cdot \overset{+}{M} \cdot t^2 / 2 \}.$$

Поле конвективных скоростей:

$$\{ \hat{v} \} = \{ \overset{+}{V} i - \overset{o}{V} i \}$$

Расчетное состояние нового поля внутренних свойств:

$$\{ \overset{+}{M} \} = \{ \hat{r} \cdot \overset{+}{\rho} \} = \{ (\hat{r} + \hat{v} \cdot t) \cdot \overset{+}{\rho} \}$$

$$\{ \overset{+}{\rho} \} = \{ \overset{+}{\rho} \cdot (1 + \overset{+}{v} \cdot t) \}$$

2 этап. ДИНАМИКА.

Закон сохранения количества движения на разнесенном по этапам вычислений интервале времени, относится элементарным частицам:

$$\overset{+}{M} \cdot \overset{+}{V} = \overset{+}{M} \cdot (\overset{+}{V} + \overset{\Delta}{V}),$$

$$\overset{\Delta}{V} = (\overset{+}{M} - \overset{+}{M}) \cdot \overset{+}{V} = \overset{+}{v} \cdot \overset{+}{V} \cdot t,$$

получается векторное уравнение Ньютона в форме Эйлера, справедливое для крупной частицы жидкости на неподвижных узлах расчетной области:

$$\overset{+}{F} = \overset{+}{M} \cdot \overset{+}{v} \cdot \overset{+}{V} = \hat{r} \cdot \overset{\wedge}{\rho} \cdot \overset{+}{v} \cdot \overset{+}{V}.$$

Напряженное состояние и реологическими свойствами вычислительной модели:

$$\{ \hat{f} \} = \{ \overset{+}{F} i - \overset{o}{F} i \} \text{ или } \hat{f} = \hat{r} \cdot \overset{\wedge}{\rho} \cdot \overset{+}{v} \cdot \overset{+}{V} = \overset{+}{M} \cdot \overset{+}{v} \cdot \overset{+}{V}.$$

По форме новое уравнение соответствует записи напряжений в уравнениях Навье-Стокса, которое в тензорной записи сохраняет линейность аппроксимаций внутри элементарной частицы жидкости.

Объемная составляющая ускорения как движение частицы с переменной массой, без учета деформации:

$$M = \det(\overset{+}{M}), \quad \rho = \det(\overset{+}{\rho}), \quad \overset{\Delta}{V} = \overset{+}{V} \cdot (\frac{M}{+M} - 1) = \overset{+}{V} \cdot (\frac{\rho}{+ \rho} - 1)$$

3 этап. СТАТИКА

Тензор конвективных скоростей: $\overset{\wedge}{\mathbf{v}} = \overset{\wedge}{\mathbf{v}} \cdot \overset{\wedge}{\mathbf{r}}$ не связан с геометрией локального базиса $\overset{\wedge}{\mathbf{r}}$. Для перехода к исходной Эйлеровой сетке строится новый локальный базис, опирающийся на неподвижный узел, со смещенными во времени пространственными точками: $\overset{+}{\mathbf{r}} = \overset{+}{\mathbf{r}}_i - \overset{o}{\mathbf{r}}_i$.

Раскрывая это выражение, использованное при построении тензора локальных скоростей: $\overset{\wedge}{\mathbf{v}} = \overset{+}{\mathbf{v}}_i - \overset{o}{\mathbf{v}}_i$, связанным с новыми базисными векторами $\overset{+}{\mathbf{r}}$, получим алгоритм вычисления нового поля скорости: $\overset{+}{\mathbf{v}} = \overset{o}{\mathbf{v}} + \sum_i \overset{\wedge}{\mathbf{r}}_i \cdot \overset{\wedge}{\mathbf{v}}_i$, который суммирует приращения скорости от окружающих крупных частиц.

Эти выражения раскрывают обратный закон движения, при котором приращения скорости определяются произведением внешних и внутренних сил: $\overset{\rightarrow}{\mathbf{W}} = \overset{\rightarrow}{\mathbf{F}} \cdot \overset{\leftarrow}{\mathbf{M}}$. Ускорения, полученные в векторной форме для частицы с переменной «массой», должны быть интерполированы на исходные узлы расчетной области с учетом необходимости восстановления всех условно нарушенных законов сохранения.

Этапы вычислений определяются следующим образом:

1 - на неподвижной Эйлеровой сетке производятся расчеты распределенных характеристик течения;

2 - рассматриваются внутренние свойства частиц жидкости с целью построения тензоров «массы», в которых сохраняется предыстория деформации. Здесь же организуются итерационные процессы установления, в которых происходит согласование реологии вычислительной и физической моделей течения жидкости;

3 - на завершающем этапе производится интерполяция характеристик течения со смещенных в Лагранжевом движении центров тяжести крупных частиц на исходные узлы расчетной области.

Вычислительная среда. Свойства тензора напряжений $\overset{>}{\mathbf{f}}$ в процессе вычислений могут рассогласоваться с реологией рассматриваемой жидкости. Для получения итерационного алгоритма согласования физических и вычислительных параметров течения, тензор напряжений $\overset{>}{\mathbf{f}}$ можно разделить на истинный тензор и девиатор. Это позволит допустимые напряжения включить в динамику течения, а девиаторные отразить от границ сопряжения смежных частиц. По сути, это обычный ме-

ханизм свободных и отражающих границ, только применяемых для релаксационного согласования численных решений.

Контроль корректности выполняемого решения всегда сводится к контролю допустимости интерполяционных формул. В качестве примера разрушения решения, можно привести случай, когда одна грань частицы, в результате свободного движения в заданном поле скоростей, обгонит свою же противоположную сторону. Этого можно избежать уменьшением расчетного интервала времени. Выражение, показывающее такой предельно допустимый интервал обычно называют критерием устойчивости решения во времени. Известный критерий Куранта в точности соответствует вышеуказанному определению. Контроль пространственной аппроксимации намного сложнее, так как соответствующие критерии связываются не только с начальными условиями, но и с локальными геометрическими характеристиками расчетной области.

В соответствии с выражением для дефектов массы под действием тензора скоростей: $\overset{+}{M} = (\hat{r} + \hat{v} \cdot t) \cdot \overset{\vee}{\rho}$, масса частицы фактически является сумматором локальных скоростей. На первом этапе $\overset{+}{M}$ используется для определения внутренних свойств частицы, на третьем - с помощью сопоставления $\overset{<}{M} = \overset{+}{M}^{-1}$, но относящихся к смежным ячейкам, согласовываются условия сохранения при взаимодействии смежных частиц жидкости.

$$\overset{\vee}{f} = \varepsilon \cdot \overset{\vee}{v}_0 \cdot t + \mu \cdot \overset{\vee}{v}_H + c \cdot \overset{\vee}{v}_\Gamma \cdot t = \overset{\vee}{f}_0 + \overset{\vee}{f}_H + \overset{\vee}{f}_\Gamma.$$

Тензор напряжений можно представить в качестве характеристического полинома для внутреннего состояния расчетной частицы: $\overset{>}{v}_0 : \mathbf{I} \neq 0$ – сжимаемость; $\overset{>}{v}_H : \mathbf{II} \neq 0$ – поворот; $\overset{>}{v}_A : \mathbf{III} \neq 0$ – чистая деформация, другие инварианты этих тензоров равны нулю.

Рассмотрим два варианта разрушения полного тензора $\overset{+}{\rho}$ при выполнении одного такта вычислений, когда $\rho = \det(\overset{\vee}{\rho})$ обращается в ноль.

1. Кавитационный разрыв плотности:

$\overset{\vee}{\rho}_f$ - не рассматривается;

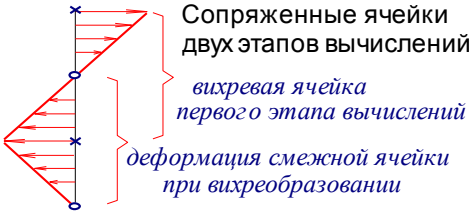
$\overset{\vee}{\rho}_0 = \det(\overset{\vee}{\rho}_0) < 0$ - соответствует полю с разрежением;

$\overset{\vee}{\rho}^* = \det(\overset{\vee}{\rho}_0 + \overset{\vee}{\rho}_\Gamma) = 0$ - тензор плотности обращается в диаду, ко-

торая может быть определена плоскостью, перпендикулярной к главной

оси растяжения тензора упругости ρ_{Γ} . Если жидкость не выдерживает отрицательного давления, то данная плоскость должна быть использована в качестве свободной границы, проходящей через крупную частицу.

2. *Образование свободной струи или турбулентного вихря.*



Пусть система отсчета будет связана с движущейся частицей, которая подвержена сдвиговой деформации.

На завершающем этапе вычислений исходная вихревая частица может обратиться в нуль детерминант внутреннего поля сопряженной частицы, где $\rho_0 > 0$. В этом случае можно воспользоваться эмпирическим алгоритмом переноса вихря с первого этапа вычислений, в тензор «массы» третьего этапа. В этом случае будет снято напряжение со смежной ячейки, а частица в свободном движении будет проявлять особенности, свойственные турбулентному вихрю. Приведенный алгоритм является эмпирической моделью, которую можно использовать за пределами аппроксимационного разрешения расчетной области, для получения точного решения сетка в районе вихря может быть сгущена.

Таким образом, сложилась взаимосвязь между численным определением частиц метода конечного объема (*крупных частиц жидкости*) и реологическими параметрами этой жидкости, которые оказались жестко и однозначно связанными с гидродинамическими процессами внутри контрольного объема новой вычислительной модели.

Вычислительная модель гидродинамического режима на основе уравнений длинных волн в полных потоках.

Дифференциальные уравнения первого порядка в разностном представлении дают решения задач гидромеханики, в которых присутствуют схемная вязкость, упругость, и сжимаемость жидкости.

Уравнения движения:
$$\tilde{U}_x = g \cdot D \cdot \frac{\delta \tilde{\zeta}}{\delta x} \cdot \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} \cdot dt; \tilde{U}_y = g \cdot D \cdot \frac{\delta \tilde{\zeta}}{\delta y} \cdot \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} \cdot dt$$

Уравнение неразрывности:
$$\tilde{\zeta} = \left(-\frac{\delta U_y}{\delta y} + \frac{\delta U_x}{\delta x} \right) \cdot \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi}$$

Поправки Кориолиса:
$$\tilde{U}_x = 2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot \tilde{U}_y \cdot dt = 1.4544 \cdot 10^{-4} \cdot \sin \varphi \cdot \tilde{U}_y \cdot dt,$$

$$\tilde{U}_y = 2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot \tilde{U}_x \cdot dt = 1.4544 \cdot 10^{-4} \cdot \sin \varphi \cdot \tilde{U}_x \cdot dt.$$

*Поправки на
донное трение:*

$$U_x = \tilde{U}_x \cdot \frac{K_v \cdot |\bar{U}|}{D^3} \cdot dt; U_y = \tilde{U}_y \cdot \frac{K_v \cdot |\bar{U}|}{D^3} \cdot dt.$$

ζ [м] - отклонение уровня моря от равновесного состояния;

D [м] - глубина спокойного моря;

φ, φ_0 - широта точки и приведенная широта меркаторской карты;

$$\bar{U} [\text{m}^2/\text{c}] = \bar{V} \cdot D - \text{поток}; \quad \bar{V} [\text{m}/\text{c}] = \frac{1}{D+z} \cdot \int_{-D}^{\zeta} \bar{V} dz - \text{скорость}$$

Уравнения определены на Меркаторской картографической проекции и скорректированы поправками на вращение Земли и придонное трение.

Условия и критерии моделирования.

Граничные условия вблизи побережья специально не ставятся, если не требуется моделировать накат волны на пологий берег. Они выполняются по естественному правилу: $C = \sqrt{g \cdot D}$ - скорость волны стремится к нулю по мере приближения к мелководью. На глубоководных “свободных” границах расчетной области задаются условия излучения, которые экстраполируют форму волнового поля на одну ячейку за пределы расчетной области. Это в точности соответствует условию излучения Зоммерфельда:

$$\frac{\delta \zeta}{\delta t} = \frac{\delta \zeta(t)}{\delta t} \pm \bar{C} \cdot \left(\frac{\delta \zeta}{\delta \bar{r}} + \frac{\delta \zeta(t)}{\delta \bar{r}} \right),$$

Устойчивость расчетной схемы во времени определяется критерием Куранта, задающим минимальное время, за которое фронт волны пересекает противоположные границы одной расчетной ячейки:

$$\Delta T \leq \frac{\delta y \cdot \delta x}{(\delta \bar{r} \cdot \bar{C})_{\max}} \cdot 0.8,$$

здесь: $\delta y, \delta x$ - пространственный размер расчетных ячеек.

Пространственный аппроксимационный критерий может быть связан с минимальной глубиной моря, на которой моделируемая длинная волна сжимается до минимального количества узлов K :

$$D_{\min} \geq \left(\frac{K \cdot \delta r}{T_{\min}} \right)^2 / g.$$

При моделировании первых одного - двух периодов волны цунами - K может быть принято в пределах: $4 \div 6$, для длительного моделирования волнообразования в шельфовой зоне или при восстановлении приливного режима, этот критерий должен быть существенно увеличен, примерно до: $K \geq 24$.

Кинематическая модель расчета волновых фронтов и лучей.

Кинематическая модель распространения волновых фронтов и лучей основывается на сортировке точек с минимальными отсчетами времен добегания длинных волн, полученных на основе принципа Гюйгенса для точечных излучателей. В работе реализована новая модель на основе 4-точечного шаблона, на котором вычисляются производные по направлению. Для уточнения времени в центре шаблона используется неявное уравнение:

$$\sqrt{\left(\frac{S_x}{T_0 - T_x}\right)^2 + \left(\frac{S_y}{T_0 - T_y}\right)^2} = C = \sqrt{g \cdot H}.$$

где: S_x, S_y - шаг расчетной сетки; T_0, T_x, T_y - расчетное время прихода фронта волны в центре и на концах крестового шаблона C - скорость распространения волны в центре шаблона; H - глубина моря.

Для оценки амплитуды первого вступления фронта волны цунами задействовано численное решение для «сверхдлинных волн»:

$$\zeta = \frac{\sum_{d=\delta N, \delta S, \delta W, \delta E} d \cdot \zeta_d}{\sqrt{(N - S)^2 + (W - E)^2}},$$

где: N, W, S, E - отсчеты времени в точках шаблона, отмеченных сторонами света; $\delta N, \delta W, \delta S, \delta E$ - разности времен между концевыми точками шаблона и его центром; ζ_d - величина уровня моря в точках шаблона, отмеченных направлением d .

Волны открытого моря представляются интереснейшей темой новых исследований в СКБ САМИ ДВО РАН, связанных с изучением штормового мореходства. Последние экспедиционные исследования показали, что при использовании морских судов в качестве больших регистраторов морского волнения, в записях навигационных приборов отлично просматриваются длинноволновые процессы в открытом море и близи побережья, которые отлично согласуются с аналогичными расчетами собственных частот прибрежных акваторий с использованием длинноволновых вычислительных экспериментов.

Глава 2. Программная реализация длинноволновых вычислительных экспериментов.

Созданный при реализации диссертационной работы комплекс вычислительных экспериментов представлен несколькими взаимосвязанными программами, разработанными в единой унифицированной среде программирования:

- ANI – подготовка батиметрических данных, постановка и проведение численного моделирования длинноволновой динамики океана;
- MARIO – ведение, интерпретация и анализ временных рядов наблюдений в океанографии и сейсмологии;
- WORLD – прорисовка и редактирование каталогов цунами, решение других задач на контурных географических картах;
- SPECRM – расчет, визуализация и подготовка полей пространственного распределения спектральных характеристик для мареографных записей;
- THREE – оцифровка, слияние и автоматическое редактирование батиметрических массивов;
- TV – подготовка и конвертирование батиметрических данных; просмотр и редактирование графических результатов численного моделирования.

Указанные программы поддерживают файлы (базы данных), которые опознаются в настройках операционной системы по «расширению» (второму трехбуквенному имени):

- .inf -> .int, .byt, .dat - батиметрические данные с описанием постов наблюдения;
- .chk - полный образ данных (контрольная точка) временно приостановленного вычислительного эксперимента;
- .mar - приливы и другие временные ряды наблюдений на морских и сейсмических постах наблюдения;
- .tim - данные о приливных постах и гармонических постоянных;
- .lts - списки сейсмических событий и цунами;
- .tv, pсx - черно-белые и цветные рисунки снятые с экрана ЭВМ;

Из вышеперечисленных, необходимо выделить две крупные программные разработки, одна из которых ориентирована на проведение вычислительных экспериментов: “ANI”, другая для анализа наблюдений за уровнем моря: “MARIO”. Они представляют из себя унифицированные программные модули, в которых объединено множество процедур для решения различных гидрофизических и океанологических задач.

Эти модули объединены форматами используемых данных и единообразным графическим интерфейсом.

Первый программный модуль - ANI. Он предназначен для проведения вычислительных экспериментов по длинноволновой динамике океана. Он состоит из следующих процедур:

1. Ведение базы данных батиметрического материала;
2. Ведение списков мареографных постов наблюдения;
3. Комплекс задач на основе кинематики волновых фронтов;
4. Комплекс задач для проведения вычислительного эксперимента в океанологии для цунами, приливов и штормовых нагонов;

Второй крупный модуль - Mario. Это информационно-вычислительный комплекс изначально ориентированный на обработку мареографных данных, получаемых в результате вычислительных экспериментов. Он характеризуется наличием двух больших комплексов процедур:

1. База данных для хранения и обработки мареографных рядов;
2. База данных для работы с годовыми приливными рядами и их гармоническими постоянными;

В программы, содержащие картографическую информацию, встроены утилиты для работы с каталогами землетрясений и цунами. В графической среде всех процедур встроены процедуры для редактирования и печати графических изображений.

Глава 3. Реализация вычислительных экспериментов для инженерных изысканий и оперативного контроля морских акваторий

Современная вычислительная математика, компьютерные технологии и электронные средств передачи информации допускают выполнение оперативных и экспертных работ по контролю обстановки на море с использованием сложных программно-технических комплексов.

В настоящее время в повседневной работе лаборатории вычислительной гидромеханики и океанографии СКБ САМИ ДВО РАН ведутся активные исследования гидродинамических моделей на основе длинных волн в полных потоках.

В заключительной главе представлены новые технические решения по реализации вычислительных экспериментов для моделирования различных длинноволновых процессов в открытом море, на прибрежных мелководьях, в заливах и гаванях портов. Рассмотрены конкретные морские инженерные гидротехнических изыскания и методы оперативных

прогнозов опасных морских явлений с использованием специальных длинноволновых вычислительных экспериментов, выполняемых при минимально доступной информации о текущем состоянии моря.

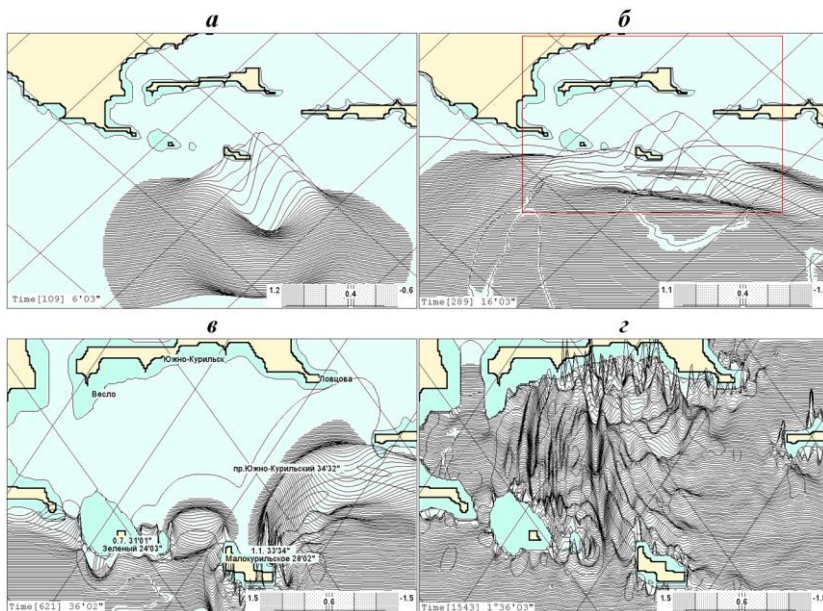


Рис. 4. Результаты численного моделирования Шикотанского цунами 5/X 1994 в районе Южных Курил. а - форма очага цунами через 6 мин после землетрясения; б - переход с обзорной батиметрии на более подробную; в - прохождение первой волны цунами в Южно-Курильский пролив; г - образование групповой структуры волн цунами и запираение волновой энергии в мелководном проливе.

Реализация и внедрение гидродинамических вычислительных экспериментов является актуальной и приоритетной задачей информационно-аналитического обеспечения мониторинга и контроля опасных морских явлений на Дальнем Востоке России. Для эффективного задействования этого инструментария вполне достаточно существующих потоков оперативных данных, проходящих в рамках регламентов повседневной работы Сахалинского Управления гидрометеослужбы и Геофизической службы Российской академии наук.

В случае применения такого моделирования для решения практических задач оперативного контроля состояния моря круг задач оперативного мониторинга может быть существенно расширен, в зависимости от качества и оперативности поступления данных от телеметрических

комплексов, систем дистанционного мониторинга и прибрежных постов наблюдения.

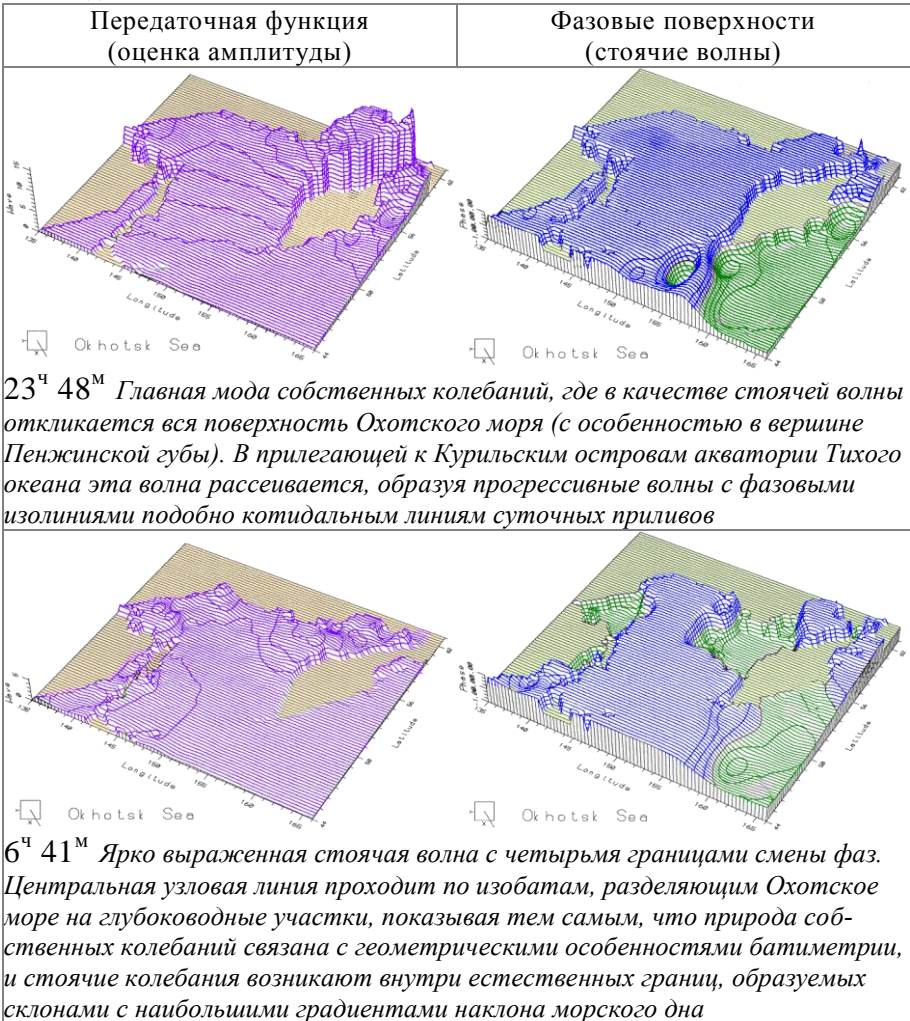


Рис. 5. Таблица рисунков с иллюстрациями распределения амплитуд и фазовых поверхностей для собственных длинноволновых колебаний уровня моря на поверхности Охотского моря.

На настоящем этапе, реализованные вычислительные эксперименты позволяют решать следующие ключевые задачи гидродинамики океана и воздействия волн на морское побережье:

- изучение длинноволнового режима в открытом море, мелководной шельфовой зоне и на акваториях закрытых бухт и гаваней портов;
- численные гидротехнические изыскания волнового режима при строительстве морских инженерных сооружений;
- инженерные и оперативные расчеты с целью прогноза проявления длинных волн на конкретных участках морского побережья, и с целью поиска эффективных технических решений по минимизации ущерба от грядущих геофизических катастроф на море.

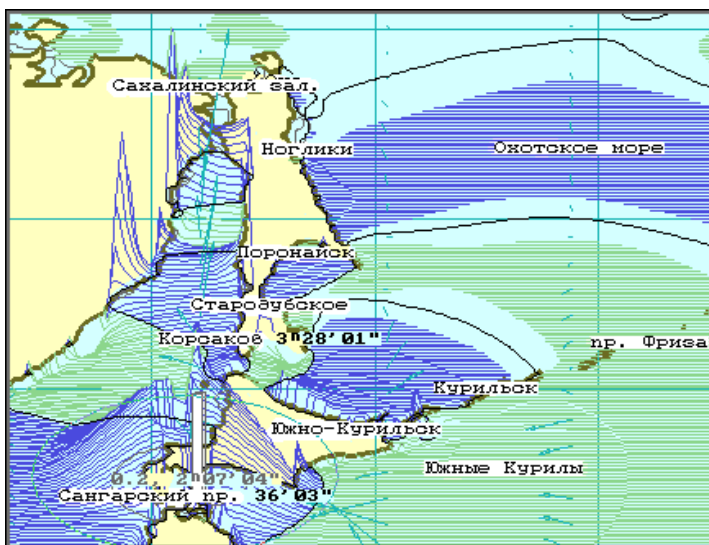


Рис. 4.6. Характерное изменение уровня моря и проявление сейшевых колебаний вблизи побережья под воздействием циклона, прошедшего над Южными Курилами 30 сентября, за 5 дней до землетрясения, и цунами 4 октября 1994 года. Величина экстремальных уровней моря в расчетной области пока не превышает 30 см, наблюдаемых на приморском побережье Татарского пролива.

Основные результаты работы

Высокая штормовая и сейсмическая активность в морских акваториях Сахалинской области, особенно вблизи Курильских островов, требует постоянного контроля состояния моря и оценки процессов взаимодействия атмосферы и океана, нацеленных на выработку заблаговременных прогнозов опасных морских явлений, недопущение материальных потерь и человеческих жертв среди населения, проживающего на морском побережье.

Изучение природы опасных морских явлений и поиск технических решений для контроля динамики цунами и штормовых нагонов, в основе которых лежат глубокие исследования физики и гидродинамики столь грозных явлений природы, ориентированы на комплексное решение задачи о минимизации ущерба от морских катастроф природного и техногенного характера; защиты от штормов и наводнений прибрежной инфраструктуры, в том числе на этапах ее проектирования; обеспечения безопасности мореплавания на каботажных и дальних морских коммуникациях.

В качестве важнейшего звена в системе наблюдения за обстановкой на море должны стать гидродинамические вычислительные эксперименты, в которых моделирование длинноволновых процессов в прибрежной зоне океана в полной мере опробовано и готово к внедрению в действующие службы и режимные отделы Сахалинского и других дальневосточных Управлений по гидрометеослужбе и мониторингу окружающей среды.

Современный уровень развития информационно-измерительной техники, систем электронной связи и телеметрического контроля позволяет решать множество традиционных задач существенно новыми методами, а некоторые технологически неразрешимые исследовательские задачи прошлых лет получили совершенные инструментальные средства. Несомненно, что к таким инструментам можно отнести как вычислительные эксперименты в гидромеханике, выполняемые на персональных компьютерах, так и новые средства измерения и доставки телеметрической информации, способные эффективно работать по каналам интернет и электронной почты.

На пути решения поставленных задач, основным результатом диссертационных исследований стало создание теоретических основ для построения эффективных вычислительных экспериментов в длинноволновой гидродинамике океана, приведших к реализации новых информационно-вычислительных комплексов для использования в морских гид-

ротехнических изысканиях; в регламенте оперативной работы центров предупреждения об опасных явлениях на море; для информационной поддержки служб мореплавания и спасения человеческой жизни на море.

Основные результаты выполненных исследований сводятся к следующим.

1. Созданы теоретические основы оптимального проектирования и эффективной реализации гидродинамических вычислительных экспериментов, адаптированных к особенностям аппаратной и системной организации современных цифровых дискретных ЭВМ.

1.1. Определены математические, логические и алгоритмические закономерности построения вычислительных экспериментов для решения прикладных задач механики сплошных сред, что позволило создать схемы построения сложных программных комплексов как на пути проектирования «снизу-вверх» - от имеющихся программных наработок к решению большого круга прикладных задач, так и на пути «сверху-вниз» - от обобщенной постановки прикладной задачи к реализации специализированной программной среды, наилучшим образом адаптированной для искомой задачи.

1.2. Создан специализированный математический аппарат трехмерной тензорной гидромеханики, приводящий к созданию вычислительных экспериментов для решения широкого круга прикладных задач механики сплошных сред. Проработаны методы прямого алгоритмического представления новых численных схем на современных цифровых дискретных ЭВМ, в том числе допускающих распараллеливание вычислительных операций вплоть до каждого из элементарных вычислительных объектов.

1.3. Реализована специализированная среда программирования для постановки и реализации вычислительных экспериментов при решении широкого круга задач длинноволновой гидродинамики океана и его прибрежной зоны. В алгоритмической плоскости новой среды представлены математические модели с предельной скоростью исполнения, в функциональной – операции по автоматической обработке и визуализации гидродинамических полей на батиметрических картах в произвольном ориентированных меркаторских проекциях.

2. Разработан и запущен в практическое использование новый комплекс программных модулей, предназначенных для постановки и проведения прямых вычислительных экспериментов по моделированию длинноволновых процессов в океане и его прибрежной зоне.

Основной программный модуль “Ani” позволяет в графическом виде готовить батиметрические материалы, анализировать начальные и граничные условия, а также обеспечивать непрерывный визуальный контроль и управление всеми процессами численного моделирования. В ходе вычислительного эксперимента возможно изменение свойств жидкости, динамическая переинтерполяция или подмена батиметрических карта, установка произвольных внешних возмущений уровня моря и скорости течений, вызванных подводными землетрясениями, атмосферными циклонами и тайфунами, силами астрономической природы и внешними приливными воздействиями.

В состав комплекса вошли дополнительные программные модули, позволяющие обрабатывать большие батиметрические массивы (Three, Tv) и другие исходные данные (World, SpectM), необходимые для проведения вычислительных экспериментов в длинноволновой динамике океана. Программный модуль “Mario” позволяет в наглядной форме проанализировать результаты расчетов, подготовить базы данных по приливным гармоническим постоянным, сопоставить результаты вычислительных экспериментов и мареографных наблюдений за динамикой уровня моря.

3. Созданы и отработаны типовые вычислительные эксперименты, позволяющие решать комплекс инженерных задач по обследованию гидродинамического и волнового режима в открытых морских акваториях, шельфовой зоне, бухтах и гаванях портов. Обоснованы и опробованы типовые сценарии использования гидродинамических вычислительных экспериментов в оперативной работе морских служб и центров оповещения о морских наводнениях и цунами.

В заключительной главе диссертации приведены типовые методы решения гидродинамических задач с использованием вычислительных экспериментов и реальных данных о состоянии моря и атмосферы.

- Методы использования информационных систем для подготовки батиметрических материалов, допускающих все виды редактирования карт, в том числе непосредственно в процессе проведения гидродинамических вычислительных экспериментов:

- Проведение всех видов быстрых кинематических расчетов, необходимых для оценки времен и интенсивности распространения длинных волн по картинам их лучей и фронтов; для одного или множества пунктов наблюдения, для произвольного по времени включения длинноволновых источников, с возможностью анализа разностей времен подхода

волновых фронтов, с использованием специальной интерактивной системы для графического анализа результатов моделирования.

- Разработан метод оперативной оценки динамики уровня моря при прохождении атмосферных циклонов. Численное моделирование прохождения глубокого циклона вдоль северо-восточного шельфа о-ва Сахалин подтвердило, что штормовые нагоны могут быть соизмеримы с цунами по размаху колебаний уровня моря, а экстремальные течения вблизи побережья могут быть существенно большими, чем при цунами.

- Разработана методика моделирования собственных длинноволновых колебаний уровня для больших морских акваторий. Вычислительный эксперимент на выявление внутренних длинноволновых колебаний в Охотском море, подтвердил существование больших приливных колебаний уровня в Пенжинском заливе и в районе Шантраских о-вов, природа которых объяснилась существованием близких к астрономическим собственным суточных и полусуточных колебаний уровня моря. Важным результатом стало обнаружение факта, что форма собственных колебаний уровня моря совпала с распределениями амплитуд приливной волны в Охотском море на близких периодах волн.

- В результате изучения особенностей влияния схемной (*числовой*) вязкости и придонного трения на пространственную форму вынужденной полусуточной приливной волны M2, нагнетаемой в Охотское море через Курильские проливы, был поставлен успешный вычислительный эксперимент, приведший к полному восстановлению приливного режима в Охотском море численными методами. Полученный метод установления хода прилива может быть использован для непрерывного контроля режима течений и хода уровня моря в любой точке на открытых акваториях и вблизи побережья Охотского моря;

- Отработана методика оперативного моделирования штормовых нагонов и цунами на мелководных акваториях Южных Курильских островов. Результаты численного моделирования нашли удовлетворительное подтверждение экспедиционными наблюдениями проявлений цунами в октябре 1994 года, которые выполнялись уже после представления результатов численного моделирования этого же цунами. В качестве начального возмущения уровня моря использовались параметры циклона, прошедшего за неделю до цунами 4 октября 1994 года, а также параметры источника цунами по макросейсмической модели А.П. Поплавского [1997], и по оперативным данным из Японии, предоставленным по факсу во время проведения тревоги цунами на Юно-Сахалинскую сейсмостанцию.

- Разработана методика районирования побережья по проявлениям волны цунами с разными параметрами подходящей к побережью волны, учитывающая как опасность первого фронта волны цунами, так и возможность длинноволнового возбуждения частично замкнутых прибрежных акваторий. По результатам систематических вычислительных экспериментов для побережья южной части о-ва Сахалин, сделаны выводы об обоснованности новой схемы районирования, как соответствующей наблюдениям за длинноволновым фоном в прибрежных акваториях Сахалина, измеренного с борта экспедиционного судна, а также отмечавшегося на побережье при прохождении глубокого циклона 7 ноября 1995 года.

- Создана и опробована на практике методика регистрации длинноволновых процессов с борта экспедиционного судна в открытом море. Проведенная регистрация длинноволнового фона на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин, в заливах Терпения и Анива, а также вдоль всего побережья Сахалина в Татарском проливе, подтвердила качественное соответствие результатов численного моделирования и натуральных наблюдений за длинноволновыми процессами по маршруту движения экспедиционного судна.

- Создана и реализована на практике комплексная методика гидро-технического обследования акватории Холмского морского торгового порта, позволившая сделать обоснованные технические предложения по реконструкции порта для улучшения волнового режима и штормовой защищенности операционных акваторий порта. В реализации исследований активно использовались вычислительные эксперименты, длительные и высокоточные наблюдения за ходом уровня моря на Холмском мареографе, а также цифровые записи штормового волнения в непосредственной близости от мареографа;

- Разработаны и опробованы комплексные методики контроля длинноволновой динамики и штормового волнения в открытом море и вблизи побережья, в основе которой лежат прямые вычислительные эксперименты, прибрежные мареографные наблюдения и регистрация волнения с борта судов, находящихся в море. Реализация технических работ на практике позволит существенно повысить уровень заблаговременности прогнозов опасных морских явлений, обеспечит повышение штормовой безопасности мореплавания на морских коммуникациях Дальнего Востока России.

- В результате исследования штормовой мореходности морских судов, разработаны технические предложения о создании самоходных

гидрофизических модулей, способных производить длительные гидрофизические измерения в прибрежных открытых морских акваториях, обеспечивая непрерывную доставку информации о состоянии моря по телеметрическим каналам цифровой связи;

- Разработаны и опробованы на практике новые методики использования вычислительных экспериментов для прогноза опасных морских наводнений и цунами в условиях повседневной и тревожной работы морских служб и оперативных центров, в обязанности которых входит организация действий по тревоге и выработка решений по минимизации ущерба от морских катастроф природного и техногенного характера.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Пути создания системы мониторинга шельфа Сахалинской области / *М.Л. Красный, В.Н. Храмушин, В.А. Шустин и др.* – Южно-Сахалинск: Сах. кн. изд-во, 1998. 208 с.
2. *Храмушин В.Н.* Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. Владивосток : Дальнаука, 2003. 172 с.
3. История штормовой мореходности (от древности до наших дней) : по материалам поисковых и научно-исследовательских работ, Калининград, 1975–Владивосток–Санкт-Петербург–Сахалин, 2003 / *В.Н. Храмушин, С.В. Антоненко, А.А. Комарицын и др.* – Южно-Сахалинск : Сах. кн. изд-во, 2004. – 288 с., ил. + 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
4. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. *Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Непон К.И., Королев Ю.П.* Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 272 с.
5. *Храмушин В.Н.* О постановке вычислительного эксперимента в гидромеханике. Реализация задачи о распространении длинных волн. – Препринт. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО АН СССР, 1988. 41 с.
6. *Храмушин В.Н., Файн А.В.* Тензорное представление алгоритмов вычислительной гидромеханики. / Вестник ДВО РАН. 2004, № 1(113). С. 52-68
7. Исследование гидродинамического режима на акватории Холмского морского торгового порта. *Храмушин В.Н., Втюрина А.С., Шустин В.А., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н.* / Вестник ДВО РАН. 2004, № 1(113). С. 40-51
8. *Храмушин В.Н., Антоненко С.В., Малащенко А.Е.* Поисковые исследования штормового мореходства / Вестник ДВО РАН. 2004, № 1(113). С. 26-39
9. *Храмушин В.Н.* Исследования по оптимизации формы корпуса корабля. / Вестник ДВО РАН. 2003, № 1(107). С.50-65

10. *Иванов В.В., Храмушин В.Н.* Генерация волн на мелководье. // Известия АН СССР Физика атмосферы и океана. том 27, ном.4, М.,1991г. С. 463-474.
11. *Храмушин В.Н., Иванов В.В.* Рассеяние волновой энергии на береговой линии. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – Т.25, №6, М.,1989г. С. 627-635
12. Разработка судовых комплексов контроля экологического состояния нефтепромысловых акваторий (Приборно-техническое оснащение российского природоохранного флота). *Гусев А.В., Гуральник Д.Л., Красный М.Л., Храмушин В.Н.* / Вестник ДВО РАН. 2004, № 1(113). С.15-19
13. Исследование следов палеоцунами для цунамирайонирования. *Булгаков Р.Ф., Иванов В.В., Певзнер М.М. Сулержицкий Л.Д., Храмушин В.Н.* / Известия АН России, Физика Земли. том.4, № 2, М. 1995г. С. 18-27
14. *Шевченко Г.В. Храмушин В.Н.* Метод детального цунамирайонирования на примере Анивского залива // Океанология, том 34, ном 2, М.,1994г. С. 218-223
15. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. /*А.И.Иващенко, В.К.Гусяков, В.А.Джумагалиев, Г.Йех, Л.Д.Жукова, Н.Д.Золотухина, В.М.Кайстренко, Л.Н.Като, А.А.Клочков, Ю.П.Королев, А.А.Кругляков, Е.А.Куликов, В.Н.Куракин, Б.В.Левин, Е.Н.Пелиновский, А.А.Поплавский, В.В.Титов, А.А.Харламов, В.Н.Храмушин, Е.В.Шельтинг.* - ДАН, 1996, том 348, №4. - С. 532 - 538.
16. *Храмушин В.Н., Красный М.Л.* Концепция создания системы государственного мониторинга для шельфа острова Сахалин. / Освоение шельфа арктических морей России, Труды пятой международной конференции (11-14 сентября), г. Санкт-Петербург, 2001 г. С. 331-336
17. *Храмушин В.Н.* Трехмерная тензорная математика вычислительных экспериментов в гидромеханике // Высокопроизводительные вычисления и их приложения. Материалы всероссийской научной конференции. – М.: НИВЦ МГУ, 2000. - С. 114-117.
18. *Пелиновский Е.Н., Заibo Н., Храмушин В.Н.* Моделирование цунами на Малых Антильских островах / Известия академии инженерных наук Российской Федерации. Том 2. Москва – Нижний Новгород, 2001 г. С. 68-84
19. *Савельев В.Ю., Храмушин В.Н.* О создании информационно-аналитических систем оперативного анализа обстановки на море // Гидрометеорологические процессы на шельфе: оценка воздействия на морскую среду. Труды Дальневосточного ордена трудового красного знамени регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. – Владивосток: Дальнаука, 1998. - С. 159-170.

20. *Храмушин В.Н.* Концепция вычислительного и дистанционного мониторинга дальневосточных морей / Рыбохозяйственные исследования в Сахалино-Курильском районе и сопредельных акваториях, Сборник научных трудов, том 1. СахНИРО, Южно-Сахалинск, 1996. С. 34-44
21. *Храмушин В.Н.* Комплекс программ для решения задач о распространении волн цунами // Вычислительные технологии. Том 1, N 3 Сборник научных трудов. Институт вычислительных технологий СО РАН. Новосибирск, 1992. С. 281-295
22. *Храмушин В.Н.* Использование особенностей цифровой ЭВМ для постановки вычислительного эксперимента в гидромеханике // Актуальные вопросы геологии геофизики и биологии (материалы XVI конференции молодых ученых ИМГиГ), Южно-Сахалинск, ДВО АН СССР, 1990. с. 119-133.
23. *Храмушин В.Н., Красный М.Л.* Единая система государственного мониторинга сахалинского шельфа как важнейший элемент обустройства морских акваторий. / Охрана природы, мониторинг и обустройство сахалинского шельфа. Environmental monitoring and sea facilities on the Sakhalin shelf. – Южно-Сахалинск, Сах.кн.изд-во., 2001 (рус, англ). С.15-30
24. *Храмушин В.Н., Поплавский А.А.* Опыт оперативного моделирования цунами 4 октября 1994 года. / Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией, Том VIII, “Проявление конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России”, Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 1998. С. 129-136
25. Использование судовых природоохранных комплексов и систем, размещенных на борту буровой платформы, для непрерывного контроля экологического состояния нефтепромысловых акваторий. *Гусев А.В., Гуральник Д.Л., Красный М.Л., Храмушин В.Н.* // Охрана природы, мониторинг и обустройство сахалинского шельфа. – Южно-Сахалинск, Сахалинское книжное издательство, 2001 (рус, англ), стр. 177-180.
26. *А.Ш.Ачкинадзе, С.В.Фигурин, В.Н. Храмушин* Расчет изолированного гребного винта с использованием обобщенного условия оптимума / Совершенствование ходовых мореходных и маневренных качеств судов. Л. Судостроение 1985/НТО им. ак. Крылова, Материалы по обмену опытом, вып. 414. С. 42-50
27. *Ивельская Т.Н., Храмушин В.Н., Шевченко Г.В.* Мониторинг морских опасных явлений в порту города Холмск. Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов, Научное издание, Институт морской геологии и геофизики Сахалинского научного центра ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, 2001 г. стр. 146-159.

28. Исследование очагов цунами удаленных землетрясений (на примере землетрясения 8 августа 1993 года). *Иванов В. В., Го Ч. Н., Михайлова Т. Г., Храмушин В. Н.* / Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией, Том VII, "Цунами и сопутствующие явления", Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 31-46
29. *Храмушин В. Н., Симонов К. В.* Численные расчеты распространения цунами в районе Усть-Камчатска. // Природные катастрофы и стихийные бедствия в дальневосточном регионе. – Т 1, Владивосток, ДВО АН СССР, 1990. С. 179-189.
30. *Khramushin Vasily N.* Stormy seakeeping and navigation safety researches for hull form design / Proc. of the 2nd Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics. Sangman International House, Busan, Korea, June 21-22, 2004. P.398-402
31. *Khramushin Vasily N, Shevchenko George V., Tatiana N. Ivetskaya.* Investigation of long waves in the port Kholmsk, Sakhalin island / ITC 2001, Proceedings, Session 7, Number 7-16. P. 837-848
32. The 1994 Shikotan Earthquake Tsunamis. *Harry Yeh, V. Titov, V. Gusiakov, E. Pelinovsky, V. Kaistrenko, V. Khramushin* / PAGEOPH, Vol.144, Nos.3/4 (1995). P.855-874
33. *У Тон Иль, Табояков А.А., Храмушин В.Н.* Методические разработки прогноза сильных землетрясений гидроакустическими методами (использование сейсмогидроакустической локации метоположения очагов землетрясений) // Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана. Вып.1: Владивосток, ДВО РАН. 2005. С.49-59.
34. *Храмушин В.Н., Корытко А.С.* Исследование путей создания сверхмалого телеуправляемого корабля для решения задач мониторинга водной среды и несения охранно-сторожевой службы // Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана. Вып. 1: Владивосток: ДВО РАН, 2005. С.176-178
35. *Храмушин В.Н.* Исследование путей создания гибкого плавникового движителя с динамически изменяемой геометрией машущего крыла. // Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана. Вып. 1: Владивосток: ДВО РАН, 2005. С.179-183
36. *Храмушин В.Н., Шкуть Г.И.* О возможности активного штормового маневрирования самоходного приборно-измерительного модуля с повышенным запасом плавучести. // Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана. Вып. 1: Владивосток: ДВО РАН, 2005. С. 184-188