На правах рукописи

Елецкий Станислав Викторович

Вычислительные алгоритмы и комплексы программ нового поколения для решения задач проблемы цунами

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск − 2008

Работа выполнена в Институте вычислительных технологий СО РАН и в Новосибирском государственном университете на кафедре математического моделирования механико-математического факультета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Чубаров Леонид Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Пелиновский Ефим Наумович

доктор физико-математических наук, профессор Воеводин Анатолий Фёдорович

Ведущая организация: Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Защита состоится 5 сентября 2008 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 при Институте вычислительных технологий СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика М.А. Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном зале вычислительной математики и информатики ГПНТБ СО РАН (проспект академика М.А. Лаврентьева, 6).

Автореферат разослан 1 августа 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор Л.Б. Чубаров

Общая характеристика работы.

Актуальность темы и востребованность результатов работы связаны с тем, что в последние годы существенно возросло число хозяйственных объектов, располагающихся в силу технологической необходимости у побережья морей и океанов, и, следовательно, подверженных катастрофическому воздействию волн цунами. Значительная часть таких объектов характеризуется высокой степенью риска как в период их возведения так и, главным образом, в период эксплуатации.

Кроме этого, анализ статистических данных о характере природных катастроф за последние десятилетия с убедительностью демонстрирует тенденцию к заметному росту. Это утверждение справедливо и для волн цунами.

В связи с тем, что цунами относятся к неотвратимым явлениям природы, становится актуальной задача минимизация ущерба нанесённого стихией. Важным вкладом на пути решения указанной проблемы является развитие экспертных систем предупреждения о цунами, настроенных на специфические региональные особенности защищаемых территорий и предназначенных для информационной поддержки процедуры принятия решений в чрезвычайных обстоятельствах надвигающейся катастрофы и/или в обстоятельствах планирования хозяйственного освоения прибрежной зоны, проектирования, возведения и эксплуатации прибрежных объектов.

Одну из основ обсуждаемых систем составляют базы данных, содержащие: историческую информацию о проявлении цунами в проблемном регионе; сейсмические и гидрофизические данные по зафиксированным цунами и землетрясениям; информацию о длине и высоте заплеска волн, собранную в результате работы специальных экспедиций. Пополнение указанных баз данных информацией содержащей результаты предварительного гидродинамического моделирования вероятных событий цунами, бесспорно, улучшает проведение экспертных оценок о возможном проявлении цунами в проблемном регионе и о вреде, который может нанести стихия.

Рассматриваемые системы должны обладать возможностями моделирования различных сценариев развития цунами с использованием реальной батиметрии и топографии прибрежных участков суши, а также способных в оперативном режиме обрабатывать данные, поступающие по телекоммуникационным каналам связи.

Развитие информационных и вычислительных технологий, сделавшее возможным разработку и использование таких систем является фактором, обеспечивающим возможность решения поставленной задачи.

Цель работы:

- Создание вычислительного и программного обеспечения нового поколения для решения актуальных исследовательских и прикладных задач проблемы цунами.
- Определение диапазонов применимости созданного вычислительного инструментария и решение с его помощью задач по моделированию цунами в акваториях Тихого и Индийского океанов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи:**
1. Выполнен анализ имеющихся средств для описания гидродинамических аспектов цунами и сформулированы требования к соответствующим моделям и алгоритмам. Определены особенности разработки и реализации программных комплексов, необходимых для решения разных типов исследовательских и прикладных задач проблемы цунами.
2. С использованием эффективных конечно-разностных алгоритмов, модернизированных с учётом специфики класса решаемых задач, разработана вычислительная модель описания гидродинамики волн цунами.
3. Для проверки качества вычислительных алгоритмов и определения диапазона их применимости, построен набор тестовых и модельных задач. Проведены соответствующие вычислительные эксперименты и выполнен анализ их результатов.
4. Для решения производственных, исследовательских и информационно-обучающих задач проблемы цунами созданы комплексы программ и программные компоненты, основным вычислительным ядром которых является разработанная модель.
5. Решен ряд практически важных задач проблемы цунами, определены экстремальные характеристики волн в акваториях Тихого и Индийского океанов.

Научная новизна работы. На основе современных вычислительных средств разработан оригинальный инструментарий вычислительного эксперимента для решения прикладных задач проблемы цунами, включающий систему математических моделей и алгоритмов их реализации. При этом впервые в рамках информационно-аналитических систем программно реализована возможность динамического моделирования волн цунами пользователями разной степени подготовленности и профессионализма.

Решены новые прикладные задачи проблемы цунами и определены экстремальные характеристики процессов распространения и трансформации волн в акваториях Тихого и Индийского океанов. А именно, для заданных пунктов Курило-Камчатского региона определены экстремальные характеристики волн, рассчитанные от гипотетически возможных источников, находящихся в указанном регионе Тихого океана. Для проблемной части побережья Индии, в предположении того, что источник возникновения цунами располагается вблизи Индонезии, вычислены зона затопления и распределение максимальных высот волн. В рамках моделирования наката волн цунами на побережье Малокурильской бухты острова Шикотан получены зоны затопления и осушки дна, а также распределение максимальных высот волн.

Достоверность. Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается математическим обоснованием используемых методов и алгоритмов и подтверждается согласованием результатов численных расчётов как с натурными данными, решением ряда тестовых и модельных задач, так и с данными, полученными при помощи других программных систем.

Практическая значимость работы определяется успешным опытом использования её основных результатов (программ, результатов расчетов) при решении актуальных прикладных задач проблемы цунами, в том числе, для определения экстремальных характеристик волн, рассчитанных для заданных

пунктов Курило-Камчатского побережья, и создания информационно-моделирующих подсистем для автоматизации действий служб предупреждения о цунами.

Программные комплексы, созданные автором, успешно используются для решения задач проблемы цунами в рамках научной деятельности; выполнения производственных договоров и федеральных целевых программ в Институте вычислительных технологий СО РАН. Результаты численных расчётов, полученные при помощи указанных программных комплексов, применяются ГУ НПО "Тайфун" при проектировании систем принятия решений об угрозе цунами и отмене состояния угрозы цунами. Программные компоненты, созданные автором, составляют основу вычислительного ядра информационно-аналитических систем лаборатории цунами Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН и международной некоммерческой организации WAPMERR (World Agency of Planetary Monitoring and Earthquake Risk Reduction).

Методология исследования опирается на современные информационно-вычислительные технологии, предусматривающие использование

1) математических моделей волновой гидродинамики;
2) эффективных вычислительных конечно-разностных алгоритмов;
3) вспомогательных теорий и методов, таких как теория численных фильтров, введение искусственной диссипации, предварительные оценки теории волн цунами;
4) принципов и технологий создания проблемно-ориентированных программных комплексов, характеризующихся интегрированностью моделирующих, информационных и интерфейсных компонент, обеспечивающих, в свою очередь, возможность эксплуатации систем пользователями различного уровня квалификации.

На защиту выносятся:

1. Комплексная вычислительная модель описания реальных гидродинамических аспектов волн цунами, включающая численные алгоритмы, обеспечивающие достаточную точность результатов моделирования, в том числе за счёт применения специальных методик расчёта на сетках с различающейся разрешающей способностью.
2. Программные системы и отдельные компоненты для решения исследовательских и прикладных задач проблемы цунами. А именно:
   a. Программные системы *Nereus V.0.1* и *Nereus V.0.2*, предназначенные для проведения расчётов в рамках исследовательского режима. Указанные системы снабжены удобным пользовательским интерфейсом, а входные и рассчитываемые данные адаптированы к некоторым средствам визуализации данных компаний *Golden Software* и *Tecplot, Inc*.
   b. Программные компоненты, являющиеся частью информационно-аналитических систем *WinItdb* и *Itris*. Для представленных компонент выполнена упрощённая реализация ядра вычислительной модели.
   c. Программный компонент, предназначенный для проведения массовых производственных расчётов и вошедший в программную систему, ко-

торая используется для совершенствования национальной системы предупреждения о цунами.

3. Результаты решения тестовых и модельных задач, в ходе которых были выявлены ключевые характеристики изучаемых волновых процессов и диапазон применения созданных алгоритмов и программных систем. А именно:
   a. Определены возможности алгоритмов, реализующих характерные для задач проблемы цунами условия на границах расчётной области.
   b. Выявлены характерные особенности генерации волн движением затопленного оползня, в зависимости от его формы и законов движения.
   c. Результаты сравнительного анализа программных систем *Nereus* и *ЦУНАМИ*, выявившие не только качественное, но и количественное совпадение результатов, а также достоинства и недостатки анализировавшихся систем.
4. Результаты решения ряда важных и актуальных прикладных задач проблемы цунами. А именно:
   a. Распределения максимальных высот волн вдоль побережья и по трассе распространения цунами вблизи острова Ява (2006.07.17), хорошо согласующиеся с данными наблюдений и результатами, полученными другими авторами.
   b. Зоны затопления и осушки дна, а также распределение максимальных высот волн, при накате цунами на побережье Малокурильской бухты острова Шикотан.
   c. Зоны затопления и распределение максимальных высот волн, рассчитанные для участка побережья Индии, от источника расположенного вблизи Индонезии.
   d. Экстремальные характеристики волн цунами для заданных пунктов Курило-Камчатского региона, вошедшие в базу данных, сформированную в рамках работ по созданию национальной системы предупреждения о цунами. Методика формирования базы данных носит универсальный характер и программно не зависит от рассматриваемого региона.

Представление работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных мероприятиях:

- Международная студенческая конференция "Студент и научно-технический прогресс" (Новосибирск, 2003, 2004, 2005, 2008)
- Международная конференция "Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании" (Усть-Каменогорск, 2003, Алматы, 2004, Павлодар, 2006)
- Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Кемерово, 2005)
- Международная конференция "Информационные и математические технологии в научных исследованиях" (Иркутск, 2005)
- Всероссийская конференция "Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф" (Кемерово 2005, Барнаул, 2007)

- "Совещание разработчиков систем прогнозирования характеристик цунами на дальневосточном побережье России" (Барнаул, 2007)
- Международная конференция молодых учёных "Изучение природных катастроф на Сахалине и Курильских островах" (Южно-Сахалинск, 2006)
- Семинар в Институте вычислительных технологий СО РАН (Новосибирск, 2008)
- Встречи-семинары сотрудников некоммерческой организации WAPMERR (World Agency of Planetary Monitoring and Earthquake Risk Reduction) и группы компаний "Информап" (Москва, Дубаи, Нью-Йорк, Женева, Сингапур, Гонконг, Дели, Пекин, Лондон, Париж, Брюссель, 2005-2008)
- Всероссийская конференция "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики" (Санкт - Петербург, 2008)

Результаты работы использовались при выполнении следующих исследовательских проектов:

− Федеральная целевая программа "Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года":

- Контракт № 18н-06 на выполнение НИОКР для государственных нужд "Проектирование структуры алгоритмического обеспечения процедур оценки характеристик цунами при принятии решений об угрозе цунами и отмене состояния угрозы цунами на основе адаптации нового поколения информационно-вычислительных технологий".
- Контракт № 01н-07 на выполнение НИОКР для государственных нужд "Расчет высот волн цунами для защищаемых пунктов Курило-Камчатского региона".

− Контракты на выполнение договорных работ:

- Контракт № 17н-06 на выполнение НИР для ИМГиГ ДВО РАН "Расчет затопления прибрежной территории и осушки дна при цунами".

− Научно-исследовательские проекты РФФИ:

- 05-05-64460-а "Оценка воздействия экстремальных длинных волн на прибрежные зоны океана методами математического моделирования".
- 06-05-72014-МНТИ_а Исследование особенностей поведения катастрофических волн цунами у средиземноморского побережья Израиля методами математического и лабораторного моделирования.
- 07-05-13583-офи_ц Создание компьютерной системы для оценки последствий воздействия волн цунами на прибрежные населенные пункты Камчатки.

− Президентская программа поддержки ведущих научных школ РФ:

- (НШ-9886.2006.9) Грант Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации.

− Проекты программы Интеграционных фундаментальных исследований СО РАН:

- Междисциплинарный интеграционный проект № 113 "Проблема цунами: новые подходы к минимизации ущерба и обеспечению безопасности побережья России".

− Студенческие гранты:

- Стипендия Института вычислительных технологий СО РАН (2004).
- (Nr 06-1000014-6064) INTAS Young Scientist Fellowship (2006).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 печатных работы, куда входят (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций, в знаменателе – объем, принадлежащий автору): 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК (2.0/0.4 печ. л.), 1 – в международном рецензируемом журнале (1.4/0.3 печ. л.), 10 – в трудах международных и российских конференций (5.2/1.9 печ. л.), 9 – в тезисах международных и российских конференций (0.7/0.5 печ. л.).

Личный вклад автора. В совместных публикациях по теме работы [4, 6, 9, 15] автору принадлежат создание алгоритмического и программного инструментария и проведение вычислительных экспериментов. В работах [1, 5, 12] автор разработал комплекс программ для проведения расчётов в рамках моделей нелинейной теории мелкой воды и выполнял соответствующие вычисления. В [11] автор участвовал в разработке программной системы *Nereus* и выполнении расчётов. В работах [3, 20] автор осуществлял формулировку тестовых задач для верификации программных систем, предназначенных для гидродинамического моделирования цунами, здесь же автору принадлежит решение этих задач в рамках разработанных программ и сравнение результатов полученных по разным системам. В работах [2, 13, 21] автор осуществлял создание вычислительного компонента для массовых расчётов динамики волн цунами, в этих же работах автор принимал участие в подготовке данных, необходимых для проведения вычислений. Во всех совместных работах автор участвовал в постановке задачи и интерпретации результатов.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы из 113 наименований. Полный объем диссертации составляет 196 страниц, включая 123 рисунка и 7 таблицы. Каждая глава разбита на параграфы.

Автор выражает благодарность всем сотрудникам Института вычислительных технологий СО РАН и кафедры математического моделирования НГУ за знания, полученные на лекциях, семинарах и практических занятиях, а также за полезные научные дискуссии в ходе выполнения работы. Успешному выполнению работы во многом способствовали ценные и полезные советы доктора физ.-мат. наук, профессора Г.С. Хакимзянова.

Автор выражает благодарность всем сотрудникам некоммерческой организации WAPMERR, за практический опыт и возможность взаимодействия с одними из лучших специалистов в области разработки качественных программных систем.

Также автор благодарен коллегам В.В. Бабайлову, С.А. Бейзель, Е.В. Гагариной, В.А. Комарову за успешное и плодотворное сотрудничество.

Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность доктору физ.-мат. наук, профессору Л.Б. Чубарову и кандидату физ.-мат. наук З.И. Федотовой за бесценный опыт и знания, полученные в ходе выполнения работы, за руководство и всестороннюю поддержку, постоянное внимание и многочисленные обсуждения, способствовавшие успешному написанию диссертации.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируется цель, и ставятся основные задачи работы. Приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме. Раскрываются научная новизна и практическая значимость работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** рассматриваются вопросы гидродинамического описания динамики волн цунами в рамках моделей классической теории мелкой воды. Основное внимание уделяется численным методам, использующимся для решения соответствующих задач математического моделирования: конечно-разностным алгоритмам, а также специальным вычислительным приёмам, обеспечивающим приемлемое качество результатов.

В **параграфе 1.1** изложена постановка задачи математического моделирования волн на поверхности жидкости (п. 1.1.1). Рассматриваются важные для постановки задачи аспекты вывода и применения теории мелкой воды (п. 1.1.2). В п. 1.1.3 для декартовой системы координат и системы координат "долгота-широта" (далее (λ,φ)), приводятся различные формы записи линейных и нелинейных уравнений мелкой воды.

Так, консервативная форма записи нелинейных уравнений мелкой воды, полученная для системы координат (λ,φ), в настоящей работе записывается следующим образом:

$$\frac{\partial W}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial \lambda}+\frac{\partial G}{\partial \varphi}=Q,$$

где $t-$ время, $W=\begin{bmatrix} R_E\cos(\varphi)\,h \\ R_E\cos(\varphi)\,U \\ R_E\cos(\varphi)\,V \end{bmatrix}$, $U=uh$, $V=vh$, R_E- средний радиус Земли, u и v компоненты вектора скорости по направлениям λ и φ соответственно, $h-$ полная глубина слоя жидкости, $F=\begin{bmatrix} U \\ uU+\frac{1}{2}gh^2 \\ vU \end{bmatrix}$, $G=\begin{bmatrix} \cos(\varphi)\,V \\ \cos(\varphi)\,uV \\ \cos(\varphi)\left(vV+\frac{1}{2}gh^2\right) \end{bmatrix}$,

$$Q=\begin{bmatrix} 0 \\ h\left(g\dfrac{\partial H}{\partial \lambda}+R_E\cos(\varphi)\,f_{2g}\right) \\ \cos(\varphi)\,h\left(g\dfrac{\partial H}{\partial \varphi}+R_E f_{3g}\right)+\dfrac{1}{2}gh^2\dfrac{\partial\cos(\varphi)}{\partial\varphi} \end{bmatrix},\quad f_{2g}=lv+\frac{\tan(\varphi)}{R_E}uv-gk_f^2\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}},$$

$f_{3g}=-lu\ -\dfrac{\tan(\varphi)}{R_E}u^2-gk_f^2\dfrac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}$, $g-$ ускорение свободного падения, $H-$ глубина жидкости, отсчитываемая от невозмущённой свободной поверхности,

$l = 2\omega_E \sin(\varphi)$, ω_E – угловая скорость вращения Земли, k_f – коэффициент групповой шероховатости.

В п. 1.1.4 обсуждаются вопросы задания начальных и граничных условий, характерных для прикладных задач проблемы цунами. В частности, выделяется пять видов условий взаимодействия волн с границами области моделирования:

1) накат волн на берег и его осушение;
2) отражение волны от неподвижной границы;
3) вхождение волнового возмущения через границу извне;
4) проход волн за пределы области моделирования;
5) свободный проход волн через границу.

Для каждого вида условий указывается математическая формулировка, приемлемая для решения прикладных задач из проблемной области.

В **параграфе 1.2** рассматриваются вопросы построения основных вычислительных алгоритмов, обеспечивающих гидродинамическое моделирование волн цунами. В основе этих алгоритмов лежат конечно-разностные схемы на равномерных прямоугольных сетках, аппроксимирующие математические модели, изложенные в параграфе 1.1.

В частности, п. 1.2.1 посвящён построению вычислительных методов для решения уравнения мелкой воды, в случае постановки задачи в декартовой системе координат. В п. 1.2.2 рассматриваются алгоритмы решения задач сформулированных в системе координат (λ, φ), а в п. 1.2.3. приводятся алгоритмы численной реализации граничных условий, рассмотренных в п. 1.1.4.

Параграф 1.3 посвящен описанию вспомогательных вычислительных методик, использующихся в настоящей работе для подготовки исходных данных расчета (вычислительного эксперимента), а также для коррекции численного решения как на заданных слоях по времени, так и в процессе расчета по мере необходимости (на основании результатов осуществляемого на каждом шаге по времени анализа вычислений).

Так, в п. 1.3.1 приводится алгоритм сглаживания батиметрии и прибрежной топографии суши, основу которого составляет теория числовых фильтров (в настоящей работе используется $5-$ ти точечный $4-$ го порядка фильтр Голея − Савицкого). В п. 1.3.2 формулируется алгоритм пересчёта данных из системы координат (λ, φ) в декартову. Пункт 1.3.3 посвящён описанию метода, коррекции решения в случае возникновения малых высокочастотных возмущений свободной поверхности. В п. 1.3.4 рассматриваются вопросы сглаживания решения при помощи метода введения искусственной диссипации. Пункт 1.3.5 содержит описание применяемого в работе метода коррекции решения в случае нефизического роста компонент решения для случаев, когда традиционные способы борьбы с численной неустойчивостью не дают положительного результата.

В **главе 2** приводится описание созданных программных комплексов и отдельных компонент, предназначенных для моделирования волн цунами.

Так, в **параграфе 2.1** освещены ключевые моменты, сопутствующие программной реализации основного и общего для всего инструментария вычислительного ядра. В частности, в п. 2.1.1 обсуждаются вопросы выбора об-

ласти моделирования, её дискретизации и специфики задания граничных условий. Пункт 2.1.2 содержит описание программной реализации основных вычислительных алгоритмов, п. 2.1.3 посвящен вопросам ввода/вывода исходных и рассчитанных данных.

В **параграфе 2.2** излагаются принципы разработки и опыт реализации программных систем *Nereus V.0.1* (см. рис. 1 и 2) и *Nereus V.0.2*, предназначенных для проведения расчётов в рамках исследовательского режима. Так, п. 2.2.1 содержит краткое описание указанных программных систем в целом, а в п. 2.2.2 рассмотрены функциональные возможности и работа с диалоговыми окнами.

Параграф 2.3 посвящён описанию особенностей связанных с динамическим моделирования волн цунами в рамках информационно-аналитических программных систем *WinItdb* (п. 2.3.1, см. рис. 3 b) и *Itris* (п. 2.3.2, см. рис. 3 a). Здесь же рассматриваются некоторые вопросы программной реализации компонент, отвечающих за динамическое моделирование в указанных системах.

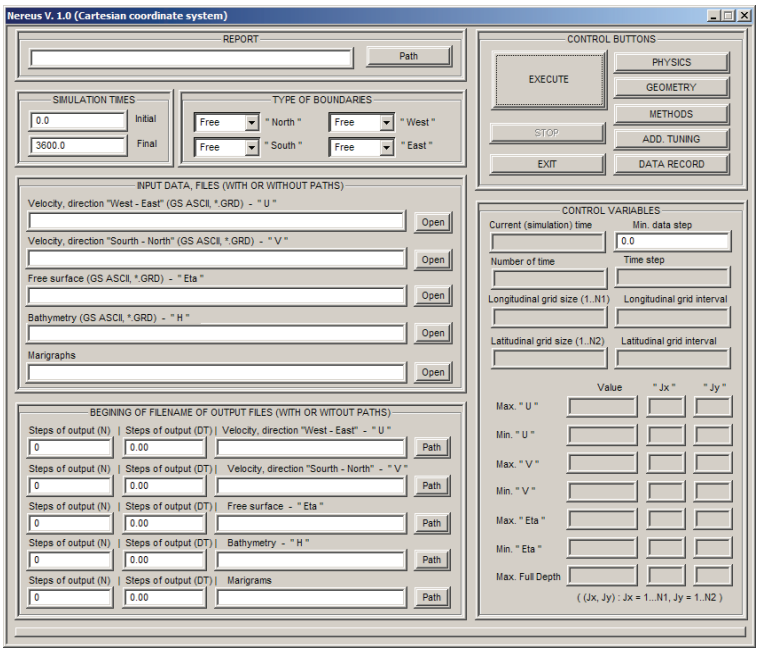


Рис. 1. Основное диалоговое окно программной системы *Nereus V.0.1*.

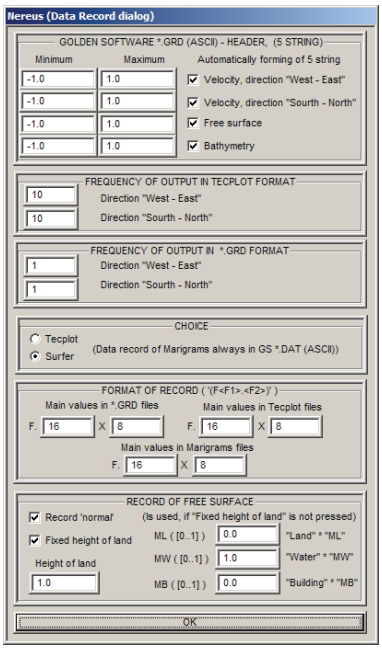
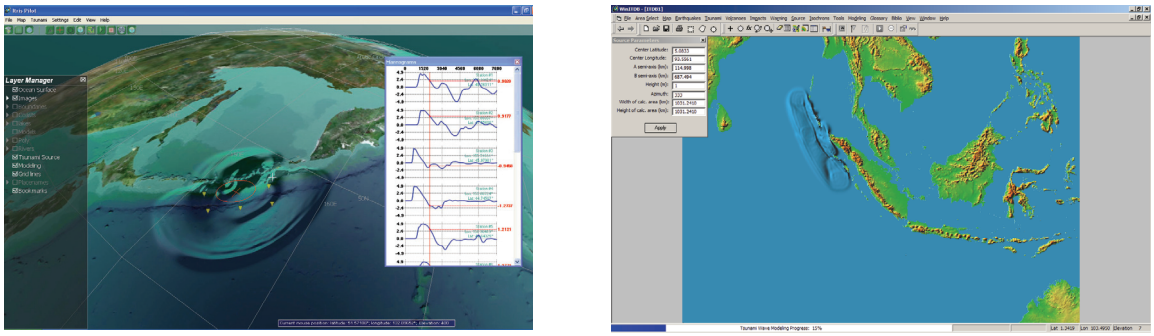


Рис. 2. Диалоговое окно "Data Record" программной системы *Nereus V.0.1*.

В **параграфе 2.4** содержится описание программного компонента, предназначенного для выполнения серийных расчетов распространения цунами. Назначение этого компонента – гидродинамическое моделирование трансформации волны цунами от зоны начального возмущения к защищаемым пунктам на берегу в рамках теории мелкой воды в системе координат "долгота-широта" (λ,φ). Выполняемые им функции обеспечены набором алгоритмического и программного обеспечения, поддерживающего как "производственный" режим работы, так и "исследовательский". Разработанный программный компонент может использоваться как автономно, так и быть частью комплексной программной системы.



a) b)

Рис. 3. Зафиксированные изображения с основных диалоговых окон информационно-аналитических систем *Itris* (a) и *WinItdb* (b), полученные во время динамического моделирования цунами.

Некоторые отличительные особенности программного компонента:

- Полный контроль выделения оперативной памяти и экономный её расход (но не в ущерб производительности). Отсутствие зарезервированной, неиспользуемой памяти.
- Полный контроль вводимой информации, её оценка на правдоподобность, проверка составляющих частей (элементов) на согласованность.
- Отсутствие жёстких требований наличия у пользователей знаний математика-вычислителя и/или программиста и/или геофизика.
- Обеспечение высокой скорости выполнения расчётов за счёт выбранных средств реализации и оптимизации (алгоритмической, исходного кода и исполняемого файла).

Глава 3 посвящена тестированию вычислительных методов, изложенных в параграфе 1.2, и решению модельных задач. Здесь же приводится сравнительный анализ результатов расчётов, полученных при помощи алгоритмов, реализованных в программных системах *Nereus* и *ЦУНАМИ*.

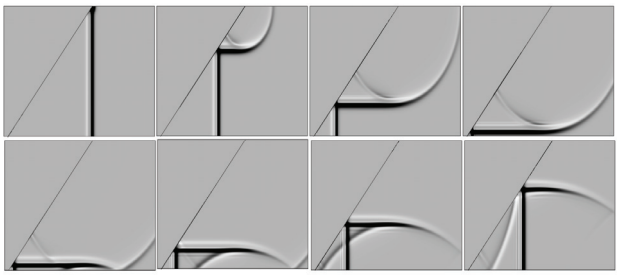


Рис. 4. Результаты численного решения тестовой задачи о взаимодействии уединённой волны со стенкой, расположенной под углом 45 градусов к начальному положению фронта волны (очередность: слева – направо, сверху – вниз).

В **параграфе 3.1** формулируются достаточно простые тестовые и модельные задачи, по численному решению которых можно судить о работоспособности алгоритмов. В этом же параграфе приводится и анализируется решение этих задач, полученное при помощи вычислительных методов, которые изложены в первой главе.

В частности, п. 3.1.1 посвящён проверке воспроизведения некоторых волновых режимов (в качестве примера см. рис. 4 и 5, демонстрирующие решение двух задач). Решаются задачи о взаимодействии уединённой волны со стенками, расположенными перпендикулярно направлению движения волны и под углом, и с коническим островом. Здесь же рассматривается многопара-

метрическая задача о свободном проходе волн через границу области моделирования, решение которой демонстрирует работоспособность соответствующих граничных условий и возможность их применения для решения задач проблемы цунами.

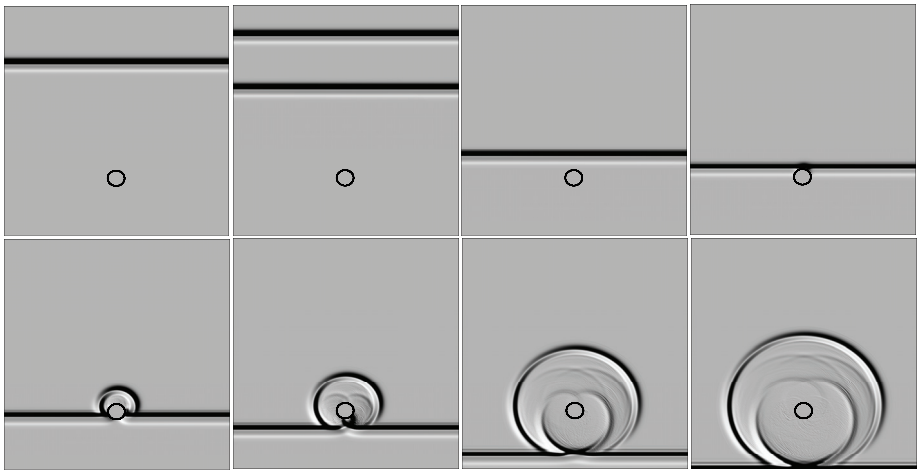


Рис. 4. Результаты численного решения тестовой задачи о взаимодействии уединённой волны с коническим островом.

Содержание п. 3.1.2 связано с решением трёх модельных задач генерации поверхностных волн движением затопленного грунта. В первой задаче рассматриваются процессы волнообразования, движением по ровному дну объектов разной геометрической формы. Во второй и третьей задаче генерация волн происходит движением сползающего по склону оползня. При этом во второй задаче (см. рис. 5 и 6) оползень моделируется твердым полуэллипсом, движущимся равноускоренно со специально подобранным, близким к реальному, ускорением. В третьей же задаче сползание оползня описывается в рамках упругопластической модели.

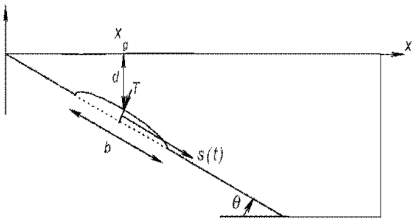


Рис. 5. Схема задачи генерации волны сползающим по склону оползнем, который моделируется твердым полуэллипсом, движущимся равноускоренно со специально подобранным, близким к реальному, ускорением.

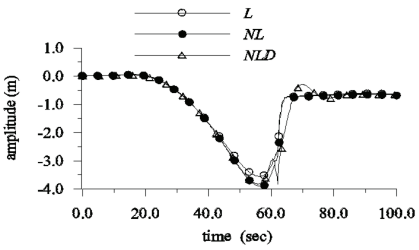


Рис. 6. Мареограммы в точке x_g (см. схему соответствующей задачи на рис. 5) полученные решением уравнений линейной, нелинейной и нелинейно-дисперсионной теорий мелкой воды.

В **параграфе 3.2** проводится сравнение результатов расчётов, полученных с использованием алгоритмов реализованных в программных системах *Nereus* и *ЦУНАМИ*. Последняя система была разработана нижегородскими и турецкими специалистами на основе кода *TUNAMI*, созданного японскими учёными в 80-х годах прошедшего столетия. Модификации *TUNAMI* широко распространены в сообществе специалистов, вовлеченных в решение задач проблемы цунами. Так, вычислительную основу комплекса *ЦУНАМИ* со-

ставляет адаптированный к новым средствам программной реализации код *TUNAMI-N2*, согласно которому гидродинамическое описание цунами происходит в рамках линейной (в открытом океане) и нелинейной (в прибрежной части) теории мелкой воды (с возможным последующим моделированием наката волн на берег).

Сравнение результатов расчётов происходит на основе трёх задач связанных с моделированием Индонезийского цунами 2004 года (см. рис. 7). Постановка первой задачи является наиболее близкой к одному из возможных сценариев события. Данные для расчётов были предоставлены нижегородскими специалистами, решение задачи происходит в реальной акватории, а начальное возмущение свободной поверхности размещается в соответствии с одним из принятых представлений об источнике события.

Первая задача предполагает моделирование трансформации волны цунами в акватории Индийского океана. Вторая задача представляет собой упрощение первой, в ней реальные значения глубин заменены постоянным значением, равным 1000 метров. В третьей задаче унаследованное от двух предыдущих задач начальное смещение свободной поверхности размещается в прямоугольном бассейне постоянной глубины 1000 метров. Во всех трёх задачах моделирование наката не происходит, вдоль береговой линии осуществляется постановка граничного условия отражения волны от вертикальной стенки.

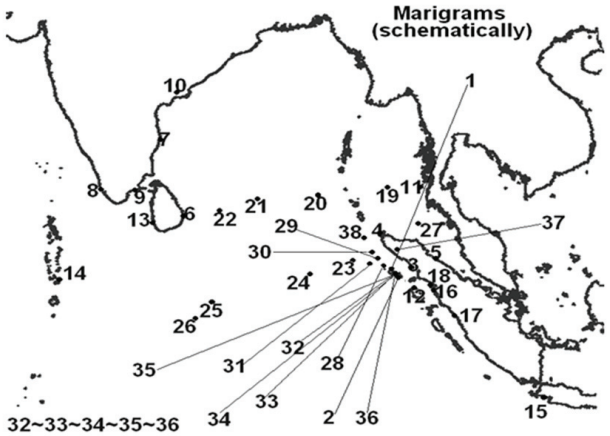


Рис. 7. Схема расстановки мареографов (задачи параграфа 3.2).

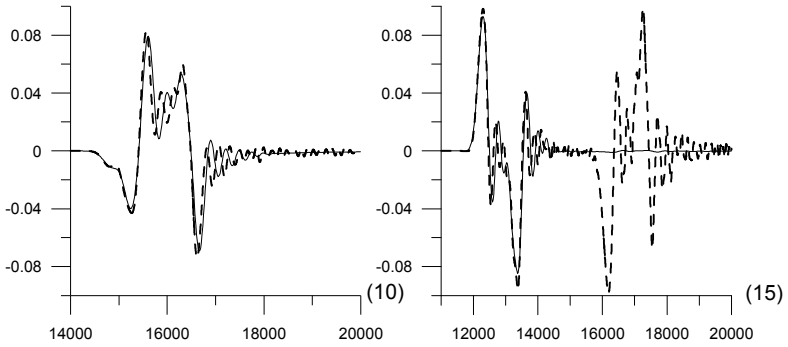


Рис. 8. Показания 10-го и 15-го мареографов, рассчитанные для 3-ей задачи (параграф 3.2).

На рисунках 8 и 9 приведены сравнительные результаты моделирования по решению задач 1 – 3 с помощью программных систем *Nereus* (сплошная линия) и *ЦУНАМИ* (штрихованная линия). По результатам всего анализа

мареограмм, можно говорить не только о качественном, но и о количественном совпадении результатов моделирования.

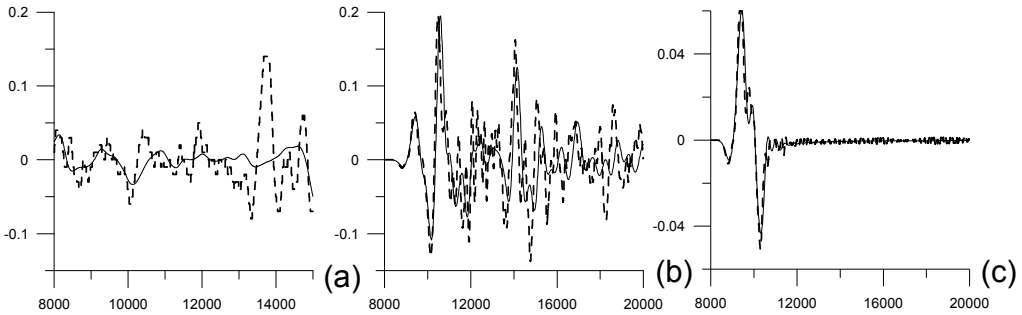


Рис. 9. Показания 22-го мареографа, рассчитанные для 1-ой (a), 2-ой (b) и 3-ей (c) задач (параграф 3.2).

Кроме этого определены причины расхождения в результатах, обусловленные логическими особенностями программной реализации *ЦУНАМИ* (см. рис. 8, 9). Необходимо заметить, что взаимодействие высокочастотных "численных" осцилляций с неровностями рельефа дна и особенностями береговых границ может служить причиной усиливающегося искажения решения более сложных задач 1 и 2 и нарастающего расхождения с результатами расчетов по рассматриваемым программным системам (см. например рис. 9 a, b).

Параграф 3.3 посвящён сравнительному анализу результатов расчётов проводимых на последовательности сеток для модельной акватории с резко меняющимся распределением глубин (п. 3.3.3). Здесь же демонстрируется эффективность и практическая ценность двух реализованных методик расчёта на вложенных сетках. В одном из вариантов (п. 3.3.1) счет на детальной сетке осуществляется по начальным данным, полученным через "заморозку" результатов расчета на "грубой" сетке. Во втором варианте (п. 3.3.2) в область детального расчета входит волна, рассчитанная на грубой сетке и перехваченная в точках границы, выделяющей нужную область.

Содержание **главы 4** связано с решением ряда актуальных прикладных задач проблемы цунами. Как правило, решение таких задач является результатом серьёзной совместной работы как отдельных, так и смешанных коллективов учёных, инженеров и программистов. Поэтому в главе кратко излагается постановка, решение и особенности реализации задач, при этом делается упор на работе, выполненной автором.

Так, **параграф 4.1** посвящён решению задачи моделирования наката волн на часть побережья Индии, в предположении того, что источник возникновения цунами располагался вблизи Индонезии. Результаты моделирования цунами, произошедшего возле берегов Явы (2006.07.17), представлены в **параграфе 4.2**.

В **параграфе 4.3** приводятся результаты моделирования наката волн на побережье Малокурильской бухты острова Шикотан. Содержание **параграфа 4.4** связано с работой автора, осуществляемой в рамках создания национальной системы предупреждения о цунами. В этом параграфе изложены особенности и ключевые моменты, сопутствовавшие созданию базы данных, содержащей для заданных пунктов Курило-Камчатского региона основные характеристики волн, пришедших от гипотетически возможных источников.

В **Заключении** сформулированы результаты диссертационной работы:

1. Выполнен анализ имеющихся средств для описания гидродинамических аспектов цунами и сформулированы требования к соответствующим моделям и алгоритмам. Определены особенности разработки и реализации программных комплексов, необходимых для решения разных типов исследовательских и прикладных задач проблемы цунами.
2. С использованием эффективных конечно-разностных алгоритмов, модернизированных с учётом специфики класса решаемых задач, разработана вычислительная модель описания гидродинамики волн цунами.
3. Построен набор тестовых и модельных задач, предназначенных для проверки качества вычислительных алгоритмов и определения диапазона их применимости.
4. Выполнена программная реализация ядра вычислительной модели, с использованием которого создана совокупность специализированных программных комплексов различного назначения. А именно:
   a. Программные системы *Nereus V.0.1* и *Nereus V.0.2*, предназначенные для проведения расчётов в рамках исследовательского режима.
   b. Программные компоненты, являющиеся частью информационно-аналитических систем *WinItdb* и *Itris*, и основанные на упрощённой реализации ядра вычислительной модели.
   c. Программный компонент, предназначенный для проведения массовых производственных расчётов.
5. По результатам решения тестовых и модельных задач выявлены ключевые характеристики изучаемых волновых процессов и диапазон применения созданных алгоритмов и программных систем.
6. Получены результаты решения ряда важных и актуальных прикладных задач проблемы цунами. А именно:
   a. Рассчитаны зоны затопления и распределение максимальных высот волн, при накате цунами на часть побережья Индии.
   b. Определены распределения максимальных высот волн вдоль побережья и по трассе распространения, рассчитанные для цунами произошедшего возле берегов острова Ява (2006.07.17). Результаты вычислительного эксперимента хорошо согласовываются с данными наблюдений и результатами, полученными другими авторами.
   c. Рассчитаны зоны затопления и осушки дна, а также распределение максимальных высот волн, при накате цунами на побережье Малокурильской бухты острова Шикотан.
   d. Определены экстремальные характеристики волн для заданных пунктов Курило-Камчатского региона, вошедшие в базу данных национальной системы предупреждения о цунами.

Список основных работ по теме диссертации:

В рецензируемых журналах рекомендуемых ВАК:

1. Chubarov L.B. Simulation of Surface Waves by un Underwater Landslide [Текст] / S.V. Eletsky, Z.I. Fedotova, G.S. Khakimzyanov // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2005. – Volume 20. – № 5. – P. 425-437.

В специальных выпусках рецензируемых журналов рекомендуемых ВАК:

2. Бабайлов В.В. Информационно-вычислительные аспекты совершенствования национальной системы предупреждения о цунами [Текст] / С.А. Бейзель, А.А. Гусев, В.К. Гусяков, С.В. Елецкий, И.А. Зыскин, Д.А. Камаев, З.И. Федотова, Л.Б. Чубаров, Ю.И. Шокин // Вычислительные технологии. – Том 13. – Специальный выпуск № 2. – 2008. – С. 4-20.

В международных рецензируемых журналах:

3. Shokin Yu.I. Principles of numerical modeling applied to the tsunami problem [Текст] / L.B. Chubarov, Z.I. Fedotova, S.A. Beizel, S.V. Eletsky // Russian Journal of Earth Science. – 2006. – Volume 8. – № 5. – ES6004. – P. 23.

В трудах международных и всероссийских конференций:

4. Чубаров Л.Б. Численное моделирование генерации волн движением затопленного грунта [Текст] / З.И. Федотова, С.В. Елецкий // Совместный выпуск журнала "Вычислительные технологии" и журнала "Региональный вестник Востока": По материалам международной конференции "Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании". – Казахстан: Усть-Каменогорск. – 2003. – Часть 3. – С. 272-280.
5. Елецкий С.В. Моделирование генерации поверхностных волн перемещением фрагмента дна по береговому склону [Текст] / Ю.Б. Майоров, В.В. Максимов, И.С. Нуднер, З.И. Федотова, М.Г. Хажоян, Г.С. Хакимзянов, Л.Б. Чубаров // Совместный выпуск журнала "Вычислительные технологии" – 2004. – Том 9. и журнала "Вестник КазНУ им. аль-Фараби" – 2004. – № 3 (42). – Часть II. – С. 194-206.
6. Чубаров Л.Б. Численное моделирование генерации волн движением оползня [Текст] / З.И. Федотова, С.В. Елецкий // Труды Международной конференции по вычислительной математике (МКВМ–2004). Часть II. – Новосибирск: Издательство ИВМиМГ СО РАН. – 2004. – С. 753-758.
7. Елецкий С.В. Создание компьютерной модели волн цунами [Текст] // Труды XLIII Международной научной студенческой конференции "Студент и научно–технический прогресс". – Новосибирск: Издательство НГУ. – 2005. – С. 175-180.
8. Елецкий С.В. Компьютерная модель волн цунами [Текст] / З.И. Федотова, Л.Б. Чубаров // Труды X Байкальской Всероссийской конференции "Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании". Часть I. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН. – 2005. – С. 138-146.
9. Шокин Ю.И. О некоторых особенностях вычислительных алгоритмов в задачах о волнах цунами [Текст] / С.А. Бейзель, С.В. Елецкий, З.И. Федотова, Л.Б. Чубаров // Труды Международной конференции "Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании". – Павлодар (Казахстан): Издательство ПГУ. – 2006. – Часть 1. – С. 14-35.
10. Елецкий С.В. Программная система моделирования волн цунами NEREUS, опыт разработки: предназначение и реализация [Текст] // Труды I (XIX) Международной конференции молодых ученых "Изучение природных катастроф на Сахалине и Курильских островах". – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. – 2007. – С. 230-236.

11. Гусяков В.К. Обзор и сравнение некоторых программных систем для моделирования цунами [Текст] / С.В. Елецкий, З.И. Федотова, Л.Б. Чубаров // Труды I (XIX) Международной конференции молодых ученых "Изучение природных катастроф на Сахалине и Курильских островах". – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. – 2007. – С. 214-221.
12. Елецкий С.В. Особенности поверхностных волн, создаваемых движением подводного оползня [Текст] / Ю.Б. Майоров, В.В. Максимов, И.С. Нуднер, З.И. Федотова, Г.С. Хакимзянов, Л.Б. Чубаров // Труды IX Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". – Санкт - Петербург: Издательство Наука. – 2008. – С. 428-432.
13. Бейзель С.А. Вычислительные особенности моделирования волн цунами в реальных акваториях [Текст] / С.В. Елецкий, З.И. Федотова, Л.Б. Чубаров // Труды IX Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". – Санкт - Петербург: Издательство Наука. – 2008. – С. 432-437.

В тезисах российских и международных конференций:

14. Елецкий С.В. Численное моделирование генерации волн движением затопленного грунта [Текст] // Материалы XLI Международной научной студенческой конференции "Студент и научно–технический прогресс" (МНСК XLI): Математика, Сеточные и конечно–элементные методы и их приложения. – Новосибирск: Издательство НГУ. – 2003. – С. 116-117.
15. Chubarov L.B. Numerical Modeling of Generation of Surface Water Waves by Motion of the Drowned Soil [Текст] / Z.I. Fedotova, S.V. Eletsky // Eos. Trans. AGU. – Fall Meet. Suppl. – Abstract OS21D-06. – 2003. – Volume 84. – № 46. – P. F8111.
16. Елецкий С.В. Численное моделирование генерации длинных волн движением подводного оползня [Текст] // Материалы XLII Международной научной студенческой конференции "Студент и научно–технический прогресс" (МНСК XLII): Математика, Сеточные и конечно–элементные методы и их приложения. – Новосибирск: Издательство НГУ. – 2004. – С. 164-165.
17. Елецкий С.В. Компьютерная модель волн цунами [Текст] // Материалы XLIII Международной научной студенческой конференции "Студент и научно–технический прогресс" (МНСК XLIII): Математика, Сеточные и конечно–элементные методы и их приложения. – Новосибирск: Издательство НГУ. – 2005. – С. 174-175.
18. Елецкий С.В. Компьютерная модель волн цунами [Текст] // Материалы VI Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (с участием иностранных учёных) (YM2005): Математическое моделирование. – Кемерово: Издательство КемГУ. – 2005. – С. 34-35.
19. Eletsky S.V. Program System of Tsunami Simulation Nereus, Experience of Development: Destination and Features of Realization [Текст] // Abstracts of the I (XIX) International Conference of Young Scientists "Study of Natural and Catastrophes on Sakhalin and Kuril Islands". – Yuzhno-Sakhalinsk. – 2006. – P. 18-20.

20. Chubarov L.B. The Review and Compression of Some Program Systems for Tsunami Simulation [Текст] / S.V. Eletsky, Z.I. Fedotova, V.K. Gusiakov // Abstracts of the I (XIX) International Conference of Young Scientists "Study of Natural and Catastrophes on Sakhalin and Kuril Islands". – Yuzhno-Sakhalinsk. – 2006. – P. 15-18.
21. Шокин Ю.И. Информационно-вычислительные аспекты совершенствования камчатского фрагмента национальной системы предупреждения о цунами [Текст] / Л.Б. Чубаров, З.И. Федотова, В.К. Гусяков, В.В. Бабайлов, С.В. Елецкий, В.В. Смирнов, С.А. Бейзель // Материалы IX Всероссийской конференции "Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф". – Барнаул: Издательство АГУ. – 2007. – С. 119.
22. Елецкий С.В. Сравнительный анализ методик повышения точности моделирования волн цунами в акваториях с резко меняющимся распределением глубин [Текст] // Материалы XLVI Международной научной студенческой конференции "Студент и научно–технический прогресс" (МНСК XLVI): Математика, Математическое моделирование. – Новосибирск: Издательство НГУ. – 2008. – С. 133-134.

Тираж 100 экз.
Формат 60x84 1/16 Заказ № 334
Отпечатано в ЗАО РИЦ «Прайс-курьер» 28.07.2008
630090, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4 а , тел. 330-7202