

Бейзель Софья Александровна

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ В МОДЕЛЬНЫХ
И РЕАЛЬНЫХ АКВАТОРИЯХ

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2010



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 Воеводин Анатолий Федорович
доктор физико-математических наук,
доцент Хабахпашев Георгий Алексеевич

Ведущая организация: Институт прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород,
ул. Ульянова, д. 46

Защита состоится «__» _____ 2010 г. в ____ на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 при Институте вычислительных технологий СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика М.А. Лаврентьева, д. 6, ИВТ СО РАН.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Л.Б. Чубаров

Общая характеристика работы

Актуальность темы и **востребованность** результатов работы обусловлены актуальностью и востребованностью решения задач по смягчению последствий воздействия катастрофических волн цунами на побережье и минимизации ущерба, наносимого этими волнами населению и гидротехническим сооружениям прибрежной зоны.

Принято считать, что причиной возникновения 85% заметных цунами являются события *сейсмического* характера. Оставшиеся 15% принято называть аномальными цунами, возникающими за счет других механизмов, из которых наибольший интерес для ученых представляют *оползневые* механизмы. Оползневые цунами весьма специфичны и значительно отличаются от сейсмических.

Для обеспечения безопасности населения и сохранения работоспособности критически важных хозяйственных объектов необходимо детальное изучение характеристик проявления цунами у побережья, предполагающее как решение фундаментальных задач исследовательского характера, так и выполнение прикладных работ по определению экстремальных волновых параметров с целью совершенствования систем предупреждения о цунами. С середины 70-х годов прошлого столетия одним из самых мощных инструментов исследования цунами стал метод математического моделирования.

Цель работы – исследование особенностей волновых режимов, порождаемых оползневым и сейсмическим механизмами генерации волн цунами, в реальных акваториях. Для достижения этой цели требовалось решить следующие задачи.

В части исследования оползневого механизма генерации волн цунами:

- * разработать вычислительный инструментарий на основе приближенных моделей теории мелкой воды различного порядка гидродинамической аппроксимации для численного исследования процессов генерации поверхностных волн оползневым механизмом в прибрежной зоне, а также их последующего распространения;
- * определить возможности различных математических моделей по воспроизведению дисперсионных и нелинейных характеристик волн, распространяющихся от зоны перемещения оползня в береговом и мористом направлениях;
- * определить характерные особенности движения оползня и порождаемых им волновых режимов в зависимости от геометрических и физических параметров задачи, в том числе, неоднородности рельефа подводного склона, размеров оползня и т.п.

В части определения характеристик волн цунами в интересах наполнения информационной базы национальной системы предупреждения о цунами:

- * разработать и исследовать экономичную методику численного моделирования волн цунами сейсмического происхождения в реальных акваториях с целью проведения ресурсоемких вычислительных экспериментов;

* рассчитать характеристики проявления волн цунами на побережье реальных акваторий от сейсмических источников различной мощности и удаленности в целях наполнения информационной базы Национальной системы предупреждения о цунами.

На защиту выносятся:

- результаты исследования границ применимости различных приближенных гидродинамических моделей генерации волн цунами оползнями в прибрежной зоне;
- определенные в ходе вычислительных экспериментов зависимости характеристик оползневого механизма генерации волн цунами от неоднородности рельефа склона, конечности размеров оползня, а также геометрических и физических параметров задачи;
- выявленные путем сопоставления с данными натурных наблюдений параметры источника начального возмущения исторического цунами 09.07.1956 в Эгейском море, обеспечившие достоверное воспроизведение амплитудных и частотных характеристик колебаний уровня моря вблизи восточного побережья Средиземного моря;
- характеристики проявления у Дальневосточного побережья РФ волн цунами, порожденных представительным набором гипотетических цунамигенных землетрясений различной мощности и удаленности, рассчитанные в интересах совершенствования Национальной системы предупреждения о цунами; особенности распространения волновой энергии по акватории Тихого океана в ходе трансформации волн цунами от вероятных удаленных сейсмических источников.

Научная новизна положений подтверждается следующим.

Новизной результатов исследования волновых режимов, порождаемых в прибрежной зоне оползневой механизмом. В том числе – определением возможностей различных приближенных моделей волновой гидродинамики по воспроизведению характеристик таких волновых режимов; новизной результатов моделирования такого рода явлений с учетом влияния реальных характеристик склона, по которому движется оползень, а также результатов, полученных для оползня конечных пространственных размеров и пространственной неоднородности склона.

Новизной результатов моделирования исторического цунами в Средиземном море (09.07.1956), в ходе которого были определены параметры механизма его генерации, обеспечившие согласование по амплитудным и частотным характеристикам с мареограммой, записанной в прибрежной зоне.

Оригинальностью уникального набора распределений характеристик волн цунами у Дальневосточного побережья РФ, рассчитанных для представительной совокупности очагов модельных цунамигенных землетрясений.

Новыми являются также результаты определения характера распространения волновой энергии по акватории Тихого океана в ходе трансформации волн цунами от модельных удаленных источников.

Теоретическая значимость исследований, представленных в диссертации, обуславливается новизной результатов численного моделирования оползневого механизма генерации волн, определением границ применимости используемых математических моделей, выявлением зависимости характеристик волнового режима от физических и геометрических параметров задачи.

Практическая значимость полученных результатов обусловлена возможностью их непосредственного использования для решения прикладных задач цунамирайонирования побережья. В частности, определенные в ходе работы над диссертацией характерные особенности проявления волн цунами у Дальневосточного побережья РФ от модельных цунамигенных землетрясений различной мощности и различной удаленности уже используются организациями Росгидромета в интересах построения национальной системы предупреждения о цунами нового поколения.

Основные результаты работы были использованы в ходе НИОКР по Федеральной целевой программе «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года» (контракты № 01Н-07, 02Н-08, 01Н-09, 01Н-10) и при выполнении проектов РФФИ (03-05-64108-а, 05-05-64460-а, 06-05-64869-а, 06-05-72014-МНТИ_а, 09-05-00294-а), междисциплинарного интеграционного проекта № 113 программы Интеграционных фундаментальных исследований СО РАН, плановых заданий ИВТ СО РАН по приоритетным направлениям фундаментальных исследований РАН (№№ гос. регистрации 01.2007 07874, 01.2007 07872), а также плановых заданий НГУ (№№ гос. регистрации 01940000846, 01960011633).

Методология исследования опирается на современные информационно-вычислительные технологии, предусматривающие использование адекватных математических моделей изучаемого явления и эффективных вычислительных алгоритмов.

В качестве моделей волновой гидродинамики используются приближенные модели теории мелкой воды в декартовой и сферической системах координат. Моделирование сейсмического механизма генерации волн происходит с помощью «поршневой» модели сейсмического источника Подъяпольского-Гусякова-Окады. Оползень моделируется как квазинедеформируемое тело, движущееся под действием внешних сил. В качестве вычислительных алгоритмов используются конечно-разностные алгоритмы, основанные на схеме МакКормака, методы Эйлера и Адамса.

Достоверность результатов моделирования подтверждается успешным тестированием алгоритмического и программного инструментария на модельных задачах, а также удовлетворительными результатами сопоставления с материалами расчетов по различным математическим моделям и численным алгоритмам, в том числе других авторов, с аналитическими и экспериментальными данными.

Представление работы. Результаты работы были представлены на следующих научных мероприятиях: Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (Алматы, Казахстан, 2004; Павлодар, Казахстан, 2006; Алматы, Казахстан, 2008); VIII Всероссийской конференции «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф» (Кемерово, 2005); Третьей Международной конференции International Conference Of Applied Mathematics (Пловдив, Болгария, 2006); IX Всероссийской конференции «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф» (Барнаул, 2007); Третьей и Четвертой Российско-Германских рабочих группах Russian-German Advanced Research Workshop on Computational Science and High Performance Computing (Новосибирск, 2007; Фрайбург, Германия, 2009); IX и X Всероссийских конференциях «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2008, 2010); 24 Международном симпозиуме по цунами (Новосибирск, 2009); Международной конференции «Mathematical and Informational Technologies (MIT 2009)» (Копоник, Сербия, Будва, Черногория, 2009); Теоретических семинарах «Нелинейные волны», посвященных памяти чл.-корр. РАН В.М. Тешукова (Новосибирск, 2009, 2010), объединенном семинаре «Информационно-вычислительные технологии» в ИВТ СО РАН (Новосибирск, 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ, в том числе (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций, в знаменателе – объем, принадлежащий лично автору) 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК (4.2/1.5), 2 – в международных рецензируемых журналах (2.4/0.5), 11 – в трудах международных и всероссийских конференций (8.8/2.5), 8 – в тезисах международных и всероссийских конференций (0.5/0.1).

Личный вклад автора. Во всех публикациях автору принадлежит участие в постановках задач и интерпретации результатов, проведение численных экспериментов с использованием приближенных гидродинамических моделей. В публикациях [1, 3–6, 9, 12, 16–18, 21, 25] автору принадлежит создание компьютерной программы для моделирования волн, порождаемых оползневой механизмом, на основе НЛД-моделей с улучшенными дисперсионными свойствами, а также расширение функциональных возможностей других используемых программных кодов.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 114 наименований. Полный объем диссертации составляет 162 страницы, включая 84 рисунка и 10 таблиц.

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. Отдельно хочется поблагодарить доктора физ.-мат.

наук, профессора Г.С. Хакимзянова за ценные советы и замечания, а также Д.Л. Чубарова за помощь в проведении расчетов на кластерах НГУ и ИВТ СО РАН.

Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность научному руководителю доктору физ.-мат. наук, профессору Л.Б. Чубарову за всестороннюю поддержку, постоянное внимание и многочисленные обсуждения, способствовавшие успешному выполнению работы.

Содержание диссертации

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 результаты, выносимые на защиту, кратко излагается содержание диссертации по главам

В **Главе 1** рассматриваются вопросы гидродинамического описания динамики волн цунами в рамках моделей теории мелкой воды. Приводятся модели сейсмического и оползневого механизмов генерации поверхностных волн. Описываются численные методы, используемые для решения соответствующих задач математического моделирования. Излагаются основные функциональные возможности использовавшихся при выполнении работы программных кодов.

В *параграфе 1.1* изложена постановка задачи математического моделирования волн на поверхности жидкости (п. 1.1.1). Приводятся приближенные модели волновой гидродинамики (п. 1.1.2): классические линейные и нелинейные уравнения мелкой воды, слабо нелинейные дисперсионные модели Грина-Нагди, Нвогу и Дорфмана-Яговдика (первая и третья модели), а также полностью нелинейные дисперсионные модели с улучшенными дисперсионными свойствами (одно- и двухслойные модели Лью-Линетта).

В п. 1.1.3 обсуждаются вопросы задания начальных и граничных условий, характерных для задач проблемы цунами. В частности, кратко описываются различные способы задания начальных данных при моделировании сейсмического и оползневого источников поверхностных волн. Выделяется четыре вида условий взаимодействия волн с границами области моделирования:

1. отражение волны от границы,
2. вхождение волнового возмущения через границу извне,
3. свободный проход волн через границу области моделирования,
4. накат волн на берег и его осушение.

В *параграфе 1.2* описывается «поршневая» модель сейсмического источника волн цунами (п. 1.2.1), которая основана на замкнутой системе уравнений динамической теории упругости, описывающей колебания слоя сжимаемой жидкости (модель океана), залегающего на поверхности упругого полупространства (модель земной коры и верхней мантии). При этом решение такой системы разбивается на последовательное решение двух отдельных задач: 1) определения статических (остаточных) деформаций

поверхности упругого полупространства, возникающих под действием внутреннего источника дислокационного типа (разрыва сплошности среды); 2) вычисления колебаний однородной несжимаемой жидкости при использовании в качестве начальных условий возмущения свободной поверхности, равного, вследствие предположения об импульсном характере события, деформации дна, вычисленной при решении первой задачи, и нулевого поля скоростей.

В п. 1.2.2 приводятся уравнения движения оползня, представляемого как квазинедеформируемое тело, в момент времени $t = 0$ покоившееся, а при $t > 0$ – движущееся по подводному пространственно неоднородному склону произвольной геометрии. При выводе уравнений движения оползень ассоциируется с некоторой материальной точкой (центром масс), для которой выписывается второй закон Ньютона, учитывающий в упрощенном виде действие сил тяжести, выталкивания, гидродинамического сопротивления и трения оползня о дно. В п. 1.2.3 приводится аналог этих уравнений для одномерной постановки, а в п. 1.2.4 – для частного случая донной поверхности в виде плоского откоса.

В *параграфе 1.3* приводятся вычислительные алгоритмы, обеспечивающие гидродинамическое моделирование волн цунами и численное решение уравнений движения оползня.

В основе этих алгоритмов лежат конечно-разностные схемы МакКормака (п. 1.3.1) и Адамса (п. 1.3.2) на равномерных сетках, аппроксимирующие приближенные модели волновой гидродинамики, изложенные в параграфе 1.1, а также (в п. 1.3.3) метод Эйлера, применяемый для аппроксимации уравнений движения материальной точки из параграфа 1.2 (пп. 1.2.2, 1.2.3).

Наконец, в *параграфе 1.4* кратко описаны структура и основные функциональные возможности использовавшихся в ходе работы программных кодов, а также форматы представления входных и выходных данных.

Глава 2 посвящена решению модельных задач, направленных на сравнительный анализ различных гидродинамических моделей, изложенных в параграфе 1.1, и изучение характеристик волновых режимов, генерируемых движением оползня, в одномерной постановке. Здесь также описаны и протестированы специальные вычислительные методы, обеспечивающие необходимую точность моделирования трансформации волн цунами на трассах от области генерации к защищаемым участкам побережья при вполне приемлемых требованиях к размерам вычислительных ресурсов.

В *параграфе 2.1* излагаются результаты сопоставления решений, полученных по приближенным и полной моделям волновой гидродинамики, которое позволило оценить степень влияния вертикальной структуры течения и определить область применимости приближенных моделей. Эти результаты получены при численном исследовании механизма генерации волн цунами движением затопленного оползня, которое имитируется

скольжением твердого тела по откосу, при этом рассматривается несколько вариантов движения, включающих, в том числе, фазы принудительного замедления тела и резкой остановки.

Детальное рассмотрение графиков (Рис. 1) показывает, что в прибрежной зоне все, даже самые простые, математические модели приводят к неразличимым результатам для всех законов движения, за исключением волны «остановки» для типа движения «слайд 1» (включающего этапа разгона, равномерного движения и резкой остановки), имеющую несколько большую амплитуду при расчете по классическим моделям мелкой воды. На мареограммах, записывающих волны, распространяющиеся в мористую часть акватории, первые волны повышения и понижения также очень похоже воспроизводятся и бездисперсионными, и дисперсионными моделями, однако при использовании НЛД-модели отчетливо виден цуг волн, идущий следом.

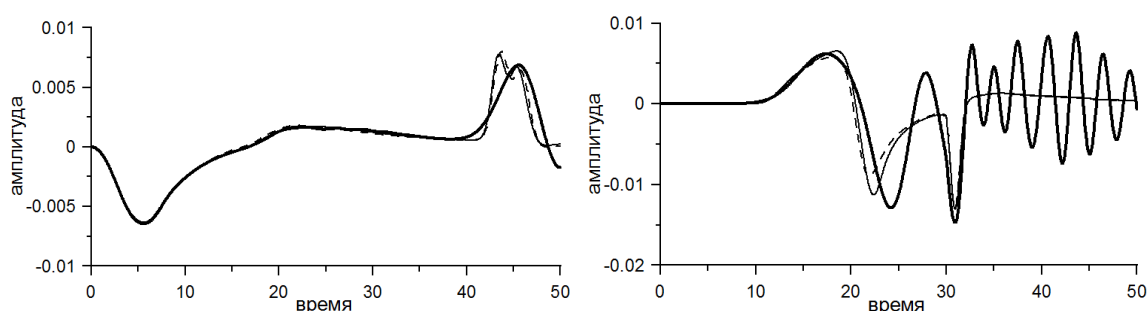


Рис. 1. Мареограммы, рассчитанные для варианта движения «слайд 1» в береговой (слева) и мористой (справа) мареографных точках с использованием линейной (тонкая штриховая линия) и нелинейной (тонкая сплошная) моделей мелкой воды, а также двухслойной модели Лью-Линетта (жирная сплошная).

Из всех рассмотренных нелинейно-дисперсионных моделей именно двухслойная модель Лью-Линетта дала результаты, наиболее близкие к результатам, полученным с помощью полной модели потенциальных течений жидкости (Рис. 2).

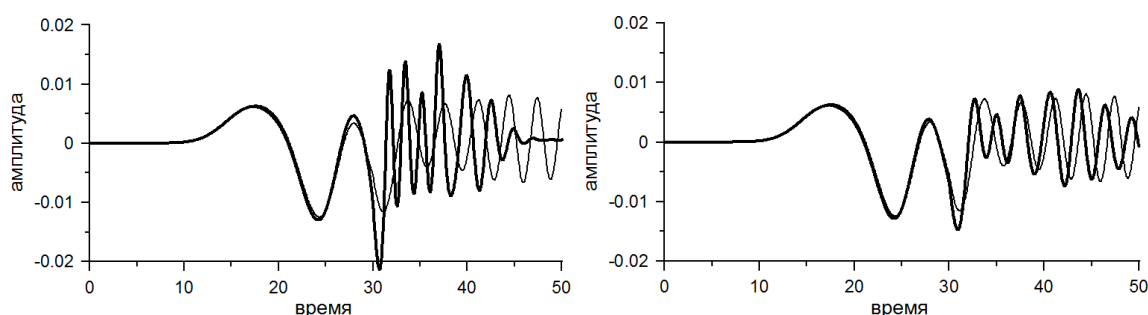


Рис. 2. Мареограммы, рассчитанные для оползня, движущегося по закону «слайд 1» в мористой точке с использованием полной модели (тонкая линия) и приближенных НЛД-моделей (жирная): слева – однослойной, справа – двухслойной моделей Лью-Линетта.

В параграфе 2.2 излагаются результаты исследования влияния неровности подводного склона на характеристики волнового режима, порождаемого движением по такому склону оползня. Задача рассматривается в одномерной постановке. В качестве подводных склонов используются модельные рельефы, в той или иной степени учитывающие

особенности средиземноморского побережья Израиля¹. Моделирование волновых процессов выполняется в рамках нелинейных уравнений теории мелкой воды. Обсуждаются результаты сопоставления волновых режимов, анализируются зависимости характеристик этих режимов от геометрических и физических параметров изучаемых явлений.

Выполненные вычислительные эксперименты продемонстрировали особенности проявления на разных рельефах изменений размеров оползней, их начальных заглублений, плотностных характеристик и коэффициента трения. Показано, что криволинейность склона в некоторых случаях оказывает существенное влияние на характер зависимости генерируемых движением по этому склону подводного оползня волновых режимов от перечисленных выше параметров явления.

Особенности волновых режимов, генерируемых движением оползня по «реальному» (произвольному криволинейному) рельефу, обусловлены, в первую очередь, учетом этой «реальности» (криволинейности) в законе движения оползня, т.е. вхождением угла наклона дна в уравнение, описывающее движение тела по склону. В гораздо меньшей степени реальное неоднородное распределение глубин влияет на распространение волн над таким дном как таковое.

Так, изменение начального заглубления влияет на криволинейном рельефе на волнообразование отличным от случая линейного склона образом в связи с тем, что при изменении начального положения оползня может изменяться угол наклона в занимаемом оползнем участке склона, что влияет на начальное ускорение. В итоге, если на линейных склонах меньшее заглубление оползня однозначно приводит к большим амплитудам генерируемых волн, то на рассмотренных криволинейных склонах наиболее цунамиопасный оползень не обязательно располагается вблизи берега.

При варьировании длины тела средний угол наклона дна под оползнем также меняется, и модифицированный характер движения оказывает дополнительное влияние на генерируемый волновой режим.

Увеличение или уменьшение коэффициента трения в целом влияет на волновые характеристики на всех склонах схожим образом. Здесь можно также отметить тот факт, что коэффициент трения является единственным из рассмотренных в настоящей работе параметром, существенным образом влияющим на место остановки тела.

В *параграфе 2.3* обсуждаются эффективные подходы к повышению точности результатов моделирования волн цунами. Один из них, называемый в работе методом «заморозки», основан на том, что в глобальной области на грубой сетке проводится расчет вплоть до некоторого момента времени, после чего поля скорости и свободной поверхности сохраняются и используются в качестве начальных данных для дальнейшего расчета в малой области, включающей защищаемое побережье, на мелкой сетке. Второй метод – «перехвата» – заключается в том, что в глобальной области расчет ведется на грубой сетке на все время расчета с записью

¹ Исследование выполнялось в рамках совместного проекта РФФИ-МНТИ.

мареограмм в узлах границы предполагаемой малой подобласти, после чего эти мареограммы используются для задания краевых условий при уточняющем расчете на мелкой сетке в малой подобласти.

Приводятся примеры применения этих подходов к решению задач в модельных и реальных акваториях. Изложенные в параграфе результаты вычислительных экспериментов показывают, что предложенные специальные вычислительные методики позволяют обеспечить необходимую точность моделирования трансформации волн цунами на трассах от области генерации к защищаемым участкам побережья при вполне приемлемых требованиях к размерам вычислительных ресурсов.

Эти методики целесообразно использовать в тех случаях, когда область содержит одновременно глубоководную зону, в которой достаточно использования грубой сетки, и мелководную, в которой расчеты необходимо вести на мелкой сетке. Результаты испытаний на модельных задачах показали, что для обеспечения необходимой точности необходимо правильно выбрать момент времени перехвата решения с одной сетки на другую («заморозки») и адекватно выделить малую подобласть, в которой расчет будет производиться на более мелкой сетке. При соблюдении этих условий удастся практически избежать снижения качества моделирования, которое порождается проведением части расчета на грубой сетке и отсечением некоторых фрагментов волновых полей при переходе к малой области. В то же время, продолжительность расчета существенно уменьшается.

Глава 3 посвящена решению ряда модельных и прикладных задач проблемы цунами. Так, в *параграфе 3.1* представлены результаты численного моделирования оползневой механизма генерации поверхностных волн в двумерной постановке с учетом пространственной неоднородности рельефа подводного склона и конечных размеров оползня.

Первые расчеты были проведены на модельном криволинейном склоне *I*, рельеф которого является однородным в направлении оси Oy (Рис. 3), так что движение оползня происходило параллельно горизонтальной оси Ox . На береговой линии (вдоль оси Oy) ставилось условие непротекания, на остальных границах – условия свободного прохода.

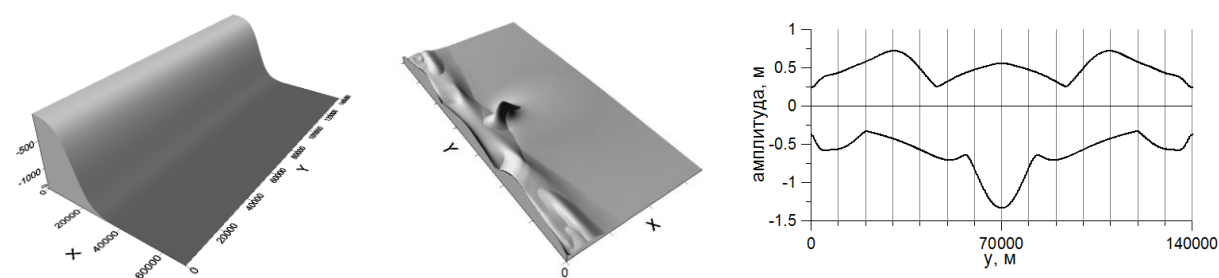


Рис. 3. Слева – рельеф модельной акватории *I*; в центре – распределение максимальных возвышений свободной поверхности за все время расчетов; справа – заплески на «береговую» линию $x = 0$.

Анализ картин свечений (распределений максимальных и минимальных возвышений свободной поверхности за все время расчетов) показал (Рис. 3) существенную неравномерность распределения волновой

энергии как в целом во всей области, так и вдоль береговой линии: наибольшие амплитуды волн наблюдаются над областью движения оползня, а также в береговой части акватории, в зоне малых глубин.

В модельной акватории 2 с пространственно неоднородным рельефом, имеющим желоб, расположенный по центру расчетной области перпендикулярно береговой линии (Рис. 4), рассматривались различные относительно указанной неоднородности начальные положения оползня: по центру и с края. В первом случае генерируемая волновая картина симметричная, причем в центре береговой линии, напротив желоба, положительные амплитуды имеют строгий минимум, и их абсолютное значение в 7–8 раз меньше, чем в точках максимума, наблюдаемых на расстоянии. Для отрицательных амплитуд локальный максимум в центре хоть и имеется, но значения там также намного меньше (примерно в 5 раз), чем по бокам. В случае постановки оползня в начальный момент на край желоба его движение вниз по склону происходит по траектории, имеющей колебания относительно центральной оси, при этом в части береговой линии, находящейся в стороне начального движения тела, амплитуды в два с небольшим раза больше, чем в противоположной стороне и чем в случае оползня, двигавшегося вдоль центральной оси желоба. По центру береговой линии амплитуды, в сравнении с максимальными, по-прежнему незначительные.

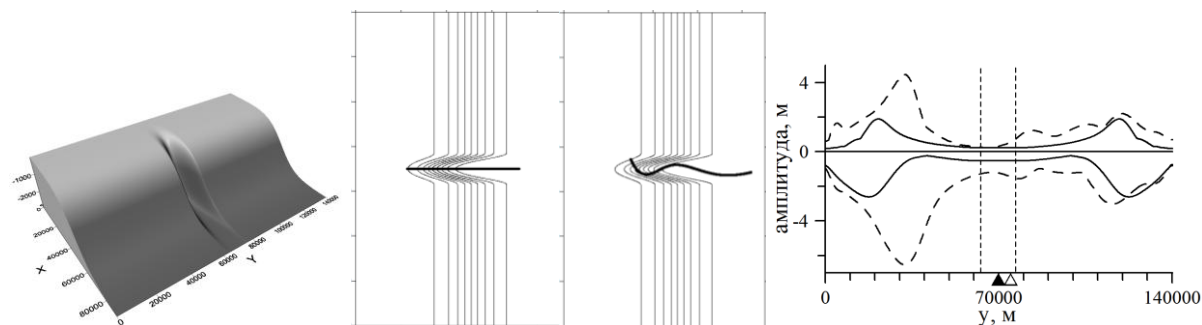


Рис. 4. Слева – рельеф модельной акватории 2; в центре – изолинии глубин и траектории движения оползня; справа – заплески на «береговую» линию $x=0$: сплошные линии соответствуют оползнию, стартовавшему по центру желоба, штриховые – с его края.

Изучены особенности волнообразования в прибрежной зоне модельных и реальных рельефов в зависимости от ряда физических и геометрических параметров задачи.

Содержание *параграфа 3.2* связано с работами по моделированию волн цунами в акватории Средиземного моря на примере исторического события, источником которого являлось мощное землетрясение, произошедшее 9 июля 1956 года в Эгейском море. Путем численного моделирования показано, что низкочастотная (за исключением приливной) составляющая натурной записи колебаний водной поверхности у берега Яффо (Израиль) определяется шельфовым резонансом прибрежной зоны. Для подтверждения гипотезы о том, что высокочастотная компонента записи обусловлена специфической природой механизма генерации волны, содержащего не только сейсмическую, но и оползневую компоненты, рассмотрено несколько вероятных сейсмических источников и оползневый.

Показано, что использование одной лишь сейсмической модели источника позволяет получить близкие к зафиксированным на мареограмме значения амплитуд, однако близость частотных характеристик удается обеспечить только с применением комбинированной модели очага.

В параграфе 3.3 представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных автором в составе научного коллектива для национальной системы предупреждения о цунами. В п. 3.3.1 кратко излагается методология проведения вычислительных экспериментов, включающая этапы подготовки начальных данных и выполнение собственно расчетов. В п. 3.3.2 представлены результаты серийных вычислительных экспериментов, направленных на исследование характерных особенностей проявления волн цунами у Дальневосточного побережья Российской Федерации от модельных региональных цунамигенных землетрясений.

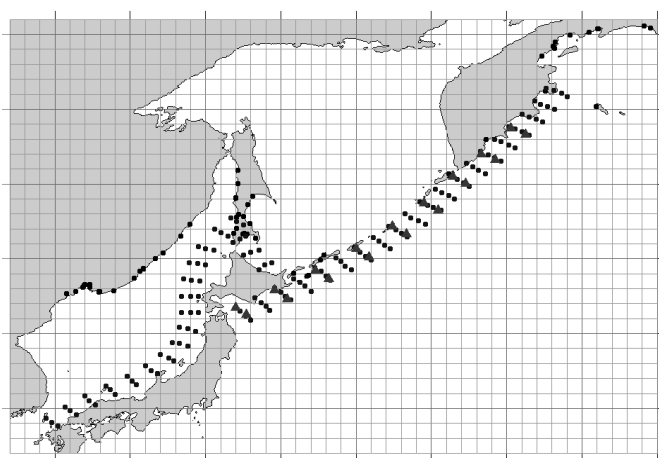


Рис. 5. Схема глобальной расчетной области. Указаны защищаемые пункты и точки гипоцентров землетрясений с магнитудой 7.8 и 8.4.

Рассмотрена система из 137 очагов магнитудой 7.8, расположенных вдоль восточного побережья Курильских островов и Камчатки, в восточной части Японского моря, южной части Татарского пролива и южной части Охотского моря, а также 18 очагов магнитудой 8.4 вдоль Курил и Камчатки (Рис. 5). Защищаемые пункты, для которых требовалось определить цунамиопасность от

рассматриваемых модельных очагов, располагались на восточном побережье Камчатки, побережье Курильских островов, о-ва Сахалин и Приморского края.

Выполненные на сетке с пространственным шагом 1 географическая минута предварительные расчеты продемонстрировали определенную локализацию распространения волновой энергии и позволили определить подобласти для проведения уточняющих расчетов на 15-тисекундной сетке. Анализ полученных в результате детальных расчетов мареограмм показал существенное (до трех раз) увеличение рассчитанных амплитуд и позволил уточнить цунамиопасность рассмотренных модельных источников для исследуемого побережья.

В п. 3.3.3 описываются результаты численного моделирования цунами, порожденных удаленными относительно Дальневосточного побережья России сейсмическими источниками, примыкающими к Тихоокеанскому побережью Америки. Обсуждаются особенности распространения волновой энергии от ряда модельных сейсмических источников, часть которых может быть сопоставлена с известными историческими событиями.

Так, начальные возмущения базовых источников рассчитывались с использованием модельных очагов землетрясений, произошедших у берегов Чили и США. Один из них, называемый далее «Chile-S», моделировал Чилийское землетрясение 22-го мая 1960-го года с магнитудой 9.5. Второй – «Chile-N» – географически размещен вблизи города Икике, где в 1877 году произошло землетрясение с магнитудой 9.0. Третий очаг – «Cascadia» – моделировал землетрясение в январе 1700 года в районе залива Пуджет Саунд (штат Вашингтон, США) с магнитудой 9.1.

Предварительные расчеты динамики волн цунами были проведены в глобальной области, охватывающей весь Тихий океан, на сетках с пространственным шагом 5 и 2 географические минуты до момента времени 150000 секунд (~42 часа). Согласно полученным результатам (см. Рис. 6), для модельного очага «Chile-S» основная часть энергии распространяется на северо-запад: к Филиппинам, Японии, Курилам и Камчатке. Для очага «Chile-N», расположенного севернее, энергия больше рассеивается по всему Тихому океану. В случае очага «Cascadia» распространения значительной части волновой энергии в сторону Российского побережья не наблюдается. Как показывают полученные на сетке с пространственным шагом 2 минуты предварительные распределения максимальных и минимальных высот волн в защищаемых пунктах, наибольшие волны (амплитуды до 3.5 – 4.5 метров) к Дальневосточному побережью Российской Федерации приходят от источника «Chile-S», причем значительные амплитуды (порядка 1 метра и больше) наблюдаются на побережье Камчатки, Курильских островов и восточной части Сахалина, а у западной его части и вдоль побережья Приморского края амплитуды незначительны (не более 30 см).

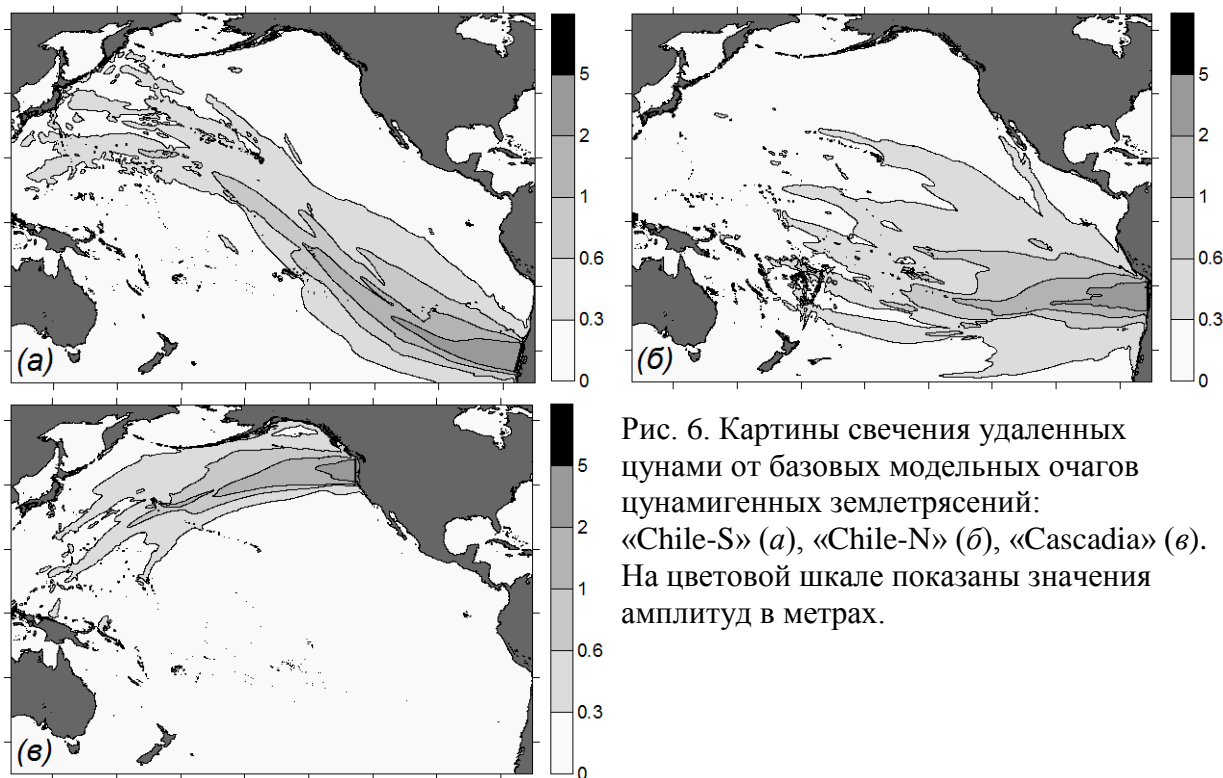


Рис. 6. Картины свечения удаленных цунами от базовых модельных очагов цунамигенных землетрясений: «Chile-S» (а), «Chile-N» (б), «Cascadia» (в). На цветовой шкале показаны значения амплитуд в метрах.

Также были проведены уточняющие расчеты на одноминутной сетке с использованием технологии «заморозки», описанной в параграфе 2.3, для

которой в качестве начальных данных были взяты промежуточные результаты расчетов на двухминутной сетке. Сравнение полученных результатов с результатами упомянутого выше предварительного расчета позволило сделать вывод о незначительном влиянии двукратного увеличения разрешающей способности сетки на значения экстремальных высот волн.

Рассмотренные дополнительно модельные источники, расположенные вдоль западного побережья Южной и Северной Америки, подтвердили предположение о том, что именно базовые источники являются наиболее цунамиопасными для побережья РФ.

В Заключении сформулированы результаты диссертационной работы:

1. На основе НЛД-моделей с улучшенными дисперсионными свойствами создана компьютерная программа для моделирования волн, порождаемых оползневым механизмом. Расширены функциональные возможности других используемых программных кодов, а именно, добавлены компоненты, отвечающие за нестационарность донной поверхности, обусловленную движением оползня.
2. С использованием результатов одномерных модельных расчетов выполнен качественный и количественный сравнительный анализ возможностей различных моделей волновой гидродинамики по воспроизведению динамики исследуемых волновых характеристик. Показано, что при рассмотренных значениях параметров задачи бездисперсионные модели удовлетворительно воспроизводят основные характеристики порождаемых оползневым движением волновых режимов, а для описания последующего за головными волнами цуга колебаний следует учитывать дисперсионные эффекты. Сопоставление с материалами расчетов по полной модели показало, что наилучшее соответствие достигается с использованием двухслойной модели Лью-Линетта с нелинейной дисперсией. В одномерной и двумерной постановках выполнено исследование особенностей оползневого механизма генерации волн цунами с учетом неоднородности рельефа склона и конечных пространственных размеров оползня. Определены зависимости порождаемых волновых режимов от геометрических и физических параметров задачи.
3. Выполнено численное моделирование процессов генерации и распространения волн цунами у Дальневосточного побережья России, а также у восточного побережья Средиземного моря. Путем сопоставления с историческими данными натурных наблюдений выявлены параметры источника начального возмущения исторического цунами в Эгейском море 9 июля 1956 г. В ходе систематических вычислительных экспериментов определены характерные особенности проявления волн цунами у Дальневосточного побережья РФ от модельных цунамигенных землетрясений. Определены также особенности распространения волновой энергии по акватории Тихого океана в ходе трансформации волн цунами от удаленных источников.

Список публикаций по теме диссертации

В рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Shokin Yu.I., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B., Beisel S.A. Modelling surface waves generated by a moving landslide with allowance for vertical flow structure // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2007, Vol. 22, No 1. P. 63–85.
2. Beisel S., Chubarov L., Didenkulova I., Kit E., Levin A., Pelinovsky E., Shokin Yu., Sladkevich M. The 1956 Greek Tsunami Recorded at Yafo (Israel) and Its Numerical Modeling // Journal of Geophysical Research. 2009, 114, C09002, doi:10.1029/2008JC005262.
3. Березин Е.Н., Бейзель С.А. Параллельная реализация алгоритма для расчета генерации длинных поверхностных волн цунами движением оползня // Вычислительные технологии. 2009, Т. 14, № 1. С. 7–20.
4. Бейзель С.А., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Моделирование поверхностных волн, порождаемых подводным оползнем, движущимся по пространственно неоднородному склону // Вычислительные технологии. 2010, Т. 15, № 3. С. 39–51.

В международных рецензируемых журналах:

5. Shokin Yu.I., Chubarov L.B., Fedotova Z.I., Beisel S.A., Eletsky S.V. Principles of numerical modeling applied to the tsunami problem // Russian Journal of Earth Sciences. American Geophysical Union, The World Publishing Service. 2006, No 8, ES6004, doi:10.2205/2006ES000216. ISSN: 1681–1208 (online), 23 p.
6. Beisel S.A., Chubarov L.B., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. On the approaches to a numerical modeling of landslide mechanism of tsunami wave generation // An International Journal for Theory and Applications “Communications in Applied Analysis”. 2007, Vol. 11, No. 1. P. 121–135.

В трудах международных и всероссийских конференций:

7. Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A., Chubarov L.B., Eletsky S.V., Fedotova Z.I., Gusyakov V.K. Mathematical Modeling in application to regional tsunami warning systems operations // Computational Science and High Performance Computing III, Springer. Notes on numerical fluid mechanics and multidisciplinary design. 2007, Vol. 101. P. 52–69.
8. Бабайлов В.В., Бейзель С.А., Гусев А.А., Гусяков В.К., Елецкий С.В., Зыскин И.А., Камаев Д.А., Федотова З.И., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Информационно-вычислительные аспекты совершенствования национальной системы предупреждения о цунами // Вычислительные технологии. Специальный выпуск 2. 2008, Т. 13. С. 4–20.
9. Шокин Ю.И., Федотова З.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б., Бейзель С.А. Моделирование генерации цунами движением оползня с учетом вертикальной структуры течения // Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф. Труды VIII Всероссийской конференции. Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2005. С. 3–27.

10. Шокин Ю.И., Бейзель С.А., Елецкий С.В., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. О некоторых особенностях вычислительных алгоритмов в задачах о волнах цунами // Труды международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». I том. Павлодар: ТОО НТФ «ЭКО», 2006. С. 14–35.
11. Шокин Ю.И., Бейзель С.А., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Об использовании методов численного моделирования для решения прикладных задач проблемы цунами // Труды международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». I том. Павлодар: ТОО НТФ «ЭКО», 2006. С. 36–51.
12. Beisel S.A., Chubarov L.B., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. Modeling of generation of tsunami waves by movement of a landslides in view of vertical structure of flow // High-Speed Hydrodynamics and Numerical Simulation: Proceedings of the Third International Summer Scientific Workshop. Kemerovo, 2006. P. 97–104.
13. Бейзель С.А., Елецкий С.В., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Вычислительные особенности моделирования волн цунами в реальных акваториях // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. 750 с. С. 432–436.
14. Beisel S.A., Chubarov L.B., Kit E., Levin A., Shokin Yu.I., Sladkevich M. Tsunami near the Israeli coast: preliminary results of numerical modeling // Вычислительные технологии. Вестник КазНУ им. Аль-Фараби. 2008, Т. 13, Ч. 1. Совместный выпуск по материалам Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». С. 17–24.
15. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Елецкий С.В., Федотова З.И., Чубаров Л.Б. Экономичные вычислительные технологии повышения точности моделирования волн цунами // Вычислительные технологии. Вестник КазНУ им. Аль-Фараби. 2008, Т. 13, Ч. 1. Совместный выпуск по материалам Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». С. 240–254.
16. Бейзель С.А., Хакимянов Г.С., Чубаров Л.Б. Пространственные эффекты оползневого волнообразования в прибрежной зоне // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2010. 478 с. С. 247–250.
17. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б. Численное исследование проявлений удаленных цунами у Дальневосточного побережья России // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2010. 478 с. С. 250–253.

В тезисах международных и всероссийских конференций:

18. Chubarov L.B., Beisel S.A., Fedotova Z.I. Modeling of generation of tsunami waves by movement of a landslide // Third International Conference Of Applied Mathematics, August 12-18, 2006, Plovdiv, Bulgaria. Vol. 1, P. 62.
19. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Федотова З.И., Гусяков В.К., Бабайлов В.В.,

Елецкий С.В., Смирнов В.В., Бейзель С.А. Информационно-вычислительные аспекты совершенствования камчатского фрагмента национальной системы предупреждения о цунами // Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф. Тезисы IX Всероссийской конференции (17–22 сентября 2007 г., Барнаул). Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2007. 138 с. С. 119.

20. Pelinovsky E., Sladkevich M., Chubarov L., Didenkulova I., Kit E., Shokin Yu., Beisel S., Levin A. The 1956 Greek tsunami recorded at Yafo (Israel) and its numerical Modeling // Geophysical Research Abstracts. Vol. 11, EGU2009-1317, 2009 EGU General Assembly.

21. Beisel S., Chubarov L., Khudyakova V., Shokin Yu. Some features of the landslide mechanism of the surface waves generation in real basins // Programm and Abstracts. 24th International Tsunami Symposium. July, 14–16, 2009. Novosibirsk, Russia. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. P. 51.

22. Babajlov V., Beisel S., Chubarov L., Eletsky S., Fedotova Z., Gusiakov V., Shokin Yu. Some aspects of the detailed numerical modeling of tsunami along the Far East coast of the Russian Federation // Programm and Abstracts. 24th International Tsunami Symposium. July, 14–16, 2009. Novosibirsk, Russia. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. P. 52.

23. Beisel S., Chubarov L., Kit E., Levin A., Shokin Yu., Sladkevich M. Numerical modeling of tsunami near the Israeli coast // Programm and Abstracts. 24th International Tsunami Symposium. July, 14–16, 2009. Novosibirsk, Russia. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. P. 81.

24. Beisel S., Chubarov L., Kit E., Levin A., Shokin Yu., Sladkevich M. Анализ возможных волн цунами у Израильского берега Средиземного моря // «Mathematical and Informational Technologies (MIT 2009), August, 27–31, 2009, Kopaonik, Serbia; August, 31 – September, 5, 2009, Budva, Montenegro, 2009, Vol. 1. P. 55.

25. Beisel S., Chubarov L., Khudyakova V., Shokin Yu. Modeling of landslide mechanism of tsunami wave generation near the Mediterranean coast of Israel // Mathematical and Informational Technologies (MIT 2009), August, 27–31, 2009, Kopaonik, Serbia; August, 31 – September, 5, 2009, Budva, Montenegro, 2009, Vol. 1. P. 56.