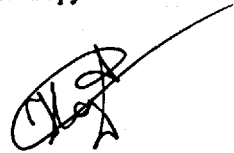


На правах рукописи



КОЗЕЛКОВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ
ПОБЕРЕЖЬЯ КАРИБСКОГО МОРЯ**

25.00.28 – Океанология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2006

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика» Нижегородского государственного технического университета

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, доцент, А.А. Куркин

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор, В.В. Жмур

(Институт Океанологии РАН, Москва)

Кандидат физико-математических наук, В.М. Кайстренко

(Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск)

Ведущая организация – Институт вычислительных технологий СО РАН,
Новосибирск

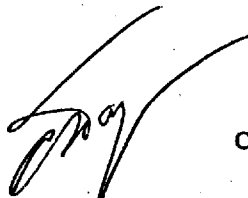
Защита состоится «19» 09 2006 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета К 002.239.01 при институте Океанологии им. П.П. Ширшова РАН по адресу:

117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Автореферат разослан «19» 09 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук



С.Г. Панфилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и цели исследования

Среди природных стихий, катастрофических по своим последствиям для человечества, особое место занимают разрушительные морские волны, основная причина которых подводные землетрясения. С середины XX века за ними закрепился японский термин «цунами», в переводе на русский язык – «высокая волна в гавани». Опираясь на существующую теорию о связи огромных волн с землетрясениями, большинство стран, где землетрясения редки, уверено, что находятся в безопасности. Однако волна цунами может быть вызвана не только «собственным» подводным землетрясением, но и удаленным (на расстоянии в десятки тысяч километров) землетрясением, а также подводными оползнями и извержениями вулканов. Так, волны цунами, возникшие при разрушительном землетрясении 26 декабря 2004 г. около о. Суматра (Индонезия), оказались опасными для большинства стран Индийского океана, включая удаленные на несколько тысяч километров: Индия, Шри-Ланка, Мальдивские острова, Кения и Сомали. Общее число погибших превысило 200 тыс. человек. Это событие показало еще раз, что любая страна, находящаяся на океанском побережье должна быть готова к приходу цунами.

Как известно, цунами является относительно частым стихийным бедствием. Достаточно сказать, что за последнее десятилетие XX века (1990 – 2000 гг. в мире произошло около 70 событий, из них более 10 – катастрофических. Для смягчения последствий разрушительных морских волн (цунами и другие кратковременные воздействия) в прибрежной зоне и планирования соответствующих защитных мероприятий крайне необходимо иметь статистически обоснованные оценки возможных высот волн и вероятностей их превышения. Получение таких оценок, основанное только на историческом материале о проявлении цунами на берегу, невозможно из-за малого объема данных для каждого конкретного пункта в силу редкого характера разрушительных стихийных бедствий. Анализ исторических данных показывает, что изменения высот волн на берегу, наблюдаемых вдоль побережья, даже в пределах малого участка, достаточно большие. Каталог цунами для каждого конкретного пункта побережья содержит очень небольшое число описаний. В значительной степени это связано с малой вероятностью возникновения цунами в каждом конкретном регионе (с периодом повторяемости в 100 лет или больше), так и малым числом пунктов регистрации уровня моря. Данные обследований побережья после прошедшего цунами относятся, как правило, к катастрофическим событиям, причем многие описания носят качественный характер. Это обстоятельство препятствует анализу повторяемости цунами в конкретном пункте. В результате, задача оценки рисков, связанных с цунами, является, несомненно, более трудной, чем для землетрясений и паводков, для которых имеются достаточно хорошо представимые ряды наблюдений. Увеличить объем данных для каждого конкретного пункта можно с помощью методов математического моделирования. Если разработанная численная модель достаточно хорошо описывает данные наблюдений в некоторых («опорных») пунктах, то можно верить расчетным значениям

высот волн в пунктах, где таких наблюдений не было. Этот способ генерации «синтетического» каталога цунами был использован для построения количественной схемы цунами районирования Тихоокеанского побережья России [Го и др., 1988], восточного побережья Кореи [Choi et al., 2001; Chung et al., 1993; Choi et al., 2002], Японии [Choi et al, 2003] и других районов.

Именно этот метод мы применили для оценки риска волн цунами для побережья бассейна Карибского моря. В этой акватории за последние пятьсот лет произошло не менее ста случаев возникновения волн цунами, причем 19 из них носили катастрофический характер [ETDB/ATL; Lander et al., 2002; O'Loughlin and Lander, 2003; Reid and Taber, 1920; Mercado et al., 2002; Zahibo and Pelinovsky, 2001]. Исторический материал проявления цунами на побережье Карибского моря очень скуден и, как правило, ограничивается количественной информацией только для одной точки побережья, в то время как его описание (без указаний на высоту волны) имеются для многих пунктов. Такая же ситуация реализуется для большинства российских морей, в частности для Каспийского и Охотского. Поэтому опыт оценки опасности цунами для Карибского моря, которое сейчас активно исследуется специалистами из США, Франции и России, окажется полезным и для оценки опасности волн цунами для побережий российских морей. Из всего сказанного становится ясной *актуальность* анализа исторического материала и численного моделирования цунами в Карибском море для дальнейшего совершенствования методов прогноза опасности цунами.

В качестве *основной цели диссертации* выбрана оценка опасности цунами для побережья бассейна Карибского моря. В работе дан анализ исторических событий, приведены результаты обследования двух последних случаев цунами (2003 г. и 2004 г.), выполнено численное моделирование реальных и прогностических событий, и сделана оценка опасности цунами для побережья Карибского моря.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту

Научная новизна диссертационной работы определяется полученными оригинальными результатами:

1. Продемонстрирована важность учета нелинейных и дисперсионных эффектов при распространении волн цунами в мелких морях. Исследована применимость точных и приближенных решений нелинейной теории волн на воде для объяснения результатов численного моделирования. Показано, что в мелководных районах на фронте длинной волны возникают мелкомасштабные ондуляции (солитоны).
2. Выполнено численное моделирование Виргинского цунами 1867 г. в Карибском море в рамках теории мелкой воды. Рассчитаны диаграмма направленности волн цунами и распределение высот волн вдоль побережья. Результаты расчетов высот волн на побережье хорошо согласуются с имеющимися данными наблюдений.
3. Проведено обследование цунами вулканического (2003 г.) и сейсмического (2004 г.) происхождения на Малых Антильских островах. Выполнено численное моделирование этих событий в рамках теории мелкой воды и нели-

нейно-дисперсионной теории (последняя только для вулканического цунами), показавшее хорошее согласие с данными наших наблюдений.

4. Выполнено численное моделирование возможных цунами в Карибском море для оценки сравнительной защищенности различных участков побережья (цунами потенциал Карибского моря). Выделены области малого риска цунами на побережье, подтверждаемые имеющимися историческими данными

Практическая значимость результатов работы

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования в службе цунами, создаваемой в настоящее время для этого региона, а также возможности переноса полученного опыта для оценки опасности цунами российских морей. Расчеты цунами в рамках теории мелкой воды и ее дисперсионного обобщения окажутся полезными для выбора оптимальных математических методов описания цунами сейсмического и вулканического происхождения.

Апробация работы

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1 – 18] докладывались на следующих конференциях: Международном симпозиуме по цунами (Чанай, Греция, 2005); Генеральных Ассамблеях Европейского геофизического союза (Ницца, Франция, 2004; Вена, Австрия, 2005); Совместной ассамблее геофизических обществ США и Канады (Монреаль, Канада, 2004); Международной конференции «Потоки и структуры в жидкости» (Москва, Россия, 2001; Санкт Петербург, Россия, 2003); Международных семинарах «Стихи – 2002», «Стихия – 2003» (Севастополь, Украина); Двенадцатой зимней школы по механике сплошных сред (Пермь, Россия, 1999); Международных летних школах «Современные проблемы механики» (Санкт Петербург, Россия, 2002–2004); Международном симпозиуме «Актуальные проблемы физики нелинейных волн» (Н. Новгород, Россия, 2003); Всесоюзной молодежной научной технической конференции «Будущее технической науки» (Н. Новгород, Россия, 2004).

Результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах Нижегородского государственного технического университета, Института прикладной физики РАН, Института океанологии РАН, научных школ академик РАН В.И. Таланова и члена-корреспондента РАН Б.В. Левина.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, содержащего 120 наименований. Общий объем диссертации составляет 171 страницу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлено современное состояние исследований по тем диссертации и обоснована ее актуальность, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту, отмечена новизна полученных результатов, кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** приводятся теоретические сведения о волнах цунами

основные характеристики этих волн, необходимые для последующего исследования нелинейных и дисперсионных эффектов. Описаны математические модели, применяемые для моделирования распространения волн цунами сейсмического и вулканического происхождения. Оригинальные результаты автора связаны именно с изучением нелинейных и дисперсионных эффектов при распространении волн цунами. Основные характеристики волн цунами и причины их возникновения приводятся в параграфе 1.1. В параграфе 1.2 приводятся основные уравнения нелинейной теории мелкой воды, используемые для расчета волн цунами в небольших акваториях:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{k}{2D^2} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{k}{2D^2} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

где η – смещение водной поверхности; t – время; x и y – горизонтальные координаты; M и N – компоненты расхода воды вдоль осей x и y ; $D = h(x, y) + \eta$ – полная глубина, а $h(x, y)$ – невозмущенная глубина воды; g – гравитационная постоянная; k – коэффициент турбулентного трения о дно (в расчетах были использованы два значения: 0 или 0,0025, последнее значение типично для длинных волн). Ввиду малых размеров расчетной области, сила Кориолиса и сферичность Земли не учитываются. Не учитываются также приливы и ветровые нагоны, поскольку их временные масштабы отличаются от характерных периодов цунами. В параграфе 1.3 представлены основные уравнения обобщенной нелинейной теории мелкой воды – нелинейно-дисперсионной длинноволновой теории, применяемых для описания распространения волн цунами в открытом океане [Wei et al., 1995; Wei and Kirby, 1995; Kirby et al., 1998; Gobbi et al., 2000]:

$$\eta_t + \nabla \cdot \left\{ (h + \eta) \left[\bar{u}_a + \left(z_a + \frac{h - \eta}{2} \right) \nabla (\nabla (h \bar{u}_a)) \right] + \left(\frac{z_a^2}{2} - \frac{h^2 - h\eta + \eta^2}{6} \right) \nabla (\bar{u}_a) \right\} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \bar{u}_{at} + (\bar{u}_a \nabla) \bar{u}_a + g \nabla \eta + z_a \left\{ \frac{1}{2} z_a \nabla (\nabla \bar{u}_{at}) + \nabla (\nabla (h \bar{u}_{at})) \right\} + \\ & + \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{2} (z_a^2 - \eta^2) (\bar{u}_a \nabla) (\nabla \bar{u}_a) + \frac{1}{2} [\nabla (h \bar{u}_a) + \eta \nabla \bar{u}_a]^2 \right\} + \\ & + \nabla \cdot \left\{ (z_a - \eta) (\bar{u}_a \nabla) (\nabla (h \bar{u}_a)) - \eta \left[\frac{1}{2} h \nabla \bar{u}_{at} + \nabla (h \bar{u}_{at}) \right] \right\} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где \bar{u}_a – горизонтальный вектор скорости на глубине $z = z_a = -0,531h$, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ – горизонтальный оператор градиента.

Источник (очаг) цунами моделируется соответствующими начальными условиями. В расчетах используются два типа очага. Первый из них – так назы-

ваемый гидродинамический очаг, который представляет изменение уровня моря в начальный момент времени

$$\eta(x, y, t = 0) = \eta_0(x, y), \quad u(x, y, t = 0) = v(x, y, t = 0) = 0.$$

Второй очаг представляет собой так называемый сейсмический очаг, его параметры определяются характеристиками сейсмического процесса, такими как протяженность разлома, наклоны плоскости разлома, сейсмический момент. Начальное смещение водной поверхности рассчитывается при этом по формулам Окады [Okada, 1985].

Оценка нелинейных эффектов проведена в параграфе 1.4 на примере распространения цунами в Яванском море (рис. 1). Основная цель этого параграфа продемонстрировать важность учета нелинейных эффектов для объяснения наблюдаемых данных.

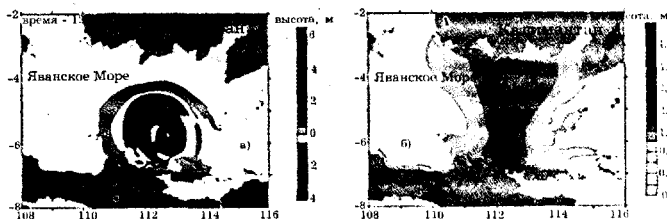


Рис. 1. Смещение уровня моря через 120 мин после выхода цунами из источника (а). Распределение максимальных амплитуд во время прохождения волны цунами (б). Красный эллипс показывает расположение начального источника волны цунами

Для того чтобы исследовать роль нелинейных эффектов, выполнено моделирование нескольких случаев с различными начальными условиями. В первом случае взята довольно маленькая начальная амплитуда (1 м) и пренебрегается коэффициентом придонного трения. Второй случай – это большая амплитуда начального возмущения (5 м) и снова коэффициент придонного трения равен нулю. И, наконец, третий случай – большая амплитуда начального возмущения (5 м) и ненулевой нелинейный коэффициент трения о дно.

Смещение поверхности уровня моря в различные моменты времени на разных расстояниях от источника, для всех трех вариантов, показаны на рис. 2 и рис. 3.

Прежде всего, все рисунки демонстрируют отражение волны от ближайшего берега, где реализовано полное отражение от вертикальной стенки на глубине пять метров. Вне берега, наблюдается сложная интерференционная структура волнового поля из-за взаимодействия падающей и отраженной волн. На небольших расстояниях от источника форма волны (ее гребень) практически симметричная и повторяет форму начального волнового возмущения с небольшим значением амплитуды волны. Эффект придонного трения на таких небольших расстояниях настолько мал, что им можно пренебречь. На больших расстояниях форма волны становится более нелинейной, с крутым передним

фронтом. Различие в крутизне для наших случаев именно этого переднего фронта очень заметно на небольших глубинах (рис. 3,б). Группа ударных волн формируется на относительно большой глубине приблизительно 40 м (рис. 3,а). Придонное трение, главным образом, влияет на отрицательные волны (впадины), как правило, из-за уменьшающейся общей глубины под впадиной (рис. 3,б). Приведенный численный пример ясно демонстрирует, что нелинейные эффекты проявляются на небольших глубинах на расстояниях 150 км и более, и такая ситуация реализуется в большинстве мелких морей.

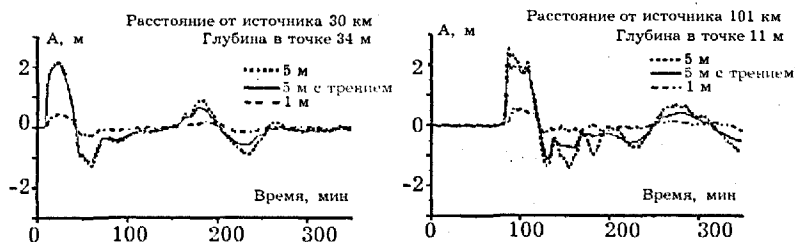


Рис. 2. Смещение поверхности моря в различные моменты времени к югу от источника (по вертикальной оси – амплитуда волны)

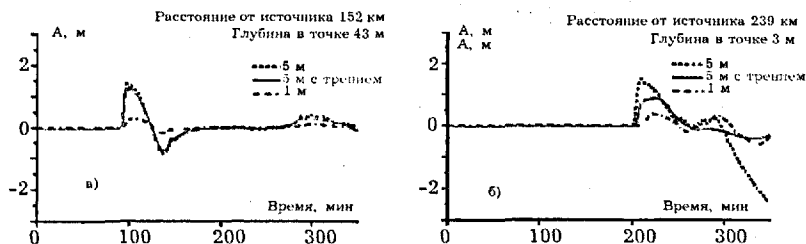


Рис. 3. Смещение поверхности моря в различные моменты времени к северу от источника (по вертикальной оси – амплитуда волны)

В параграфе 1.5 изучено влияние дисперсии волн цунами в рамках обобщенного уравнения Кортевега – де Вриза [Пелиновский, 1996]; показано, что на фронте волны цунами возникают мелкомасштабные ондуляции (солитоны). Основные результаты данной главы суммированы в параграфе 1.6.

Во второй главе основное внимание уделяется обсуждению проблемы волн цунами сейсмического происхождения для побережья бассейна Карибского моря, который является одной из самых сейсмически активных зон земного шара. В параграфе 2.1 приведены известные исторические данные о проявлениях волн цунами в Карибском бассейне. Результаты численного моделирования катастрофического цунами, произошедшего 18 ноября 1867 г. в районе Виргинских островов, обсуждаются в параграфе 2.2. Это цунами можно считать самым мощным и разрушительным в истории островов Карибского бассейна. На ост-

ровах, находящихся близко к эпицентральной зоне высота волн превышала 7 м (рис. 4)

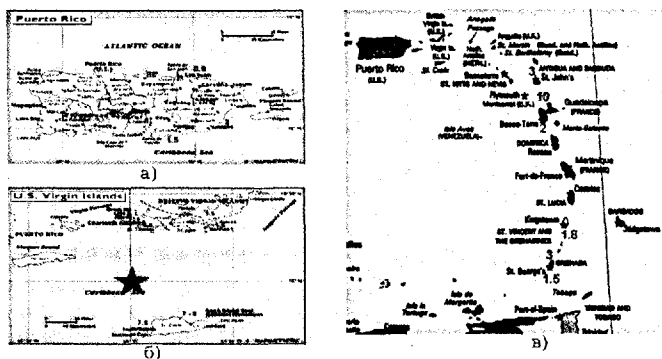


Рис. 4. Распределение высот волны цунами вдоль побережья о. Пуэрто-Рико во время прохождения цунами 1867 г. (а). Распределение высот волн вдоль берегов Виргинских островов во время цунами 18 ноября 1867 г. (звездой показан эпицентр землетрясения) (б). Распределение высот волн цунами вдоль побережий Малых Антильских островов во время прохождения цунами 1867 г. (в)

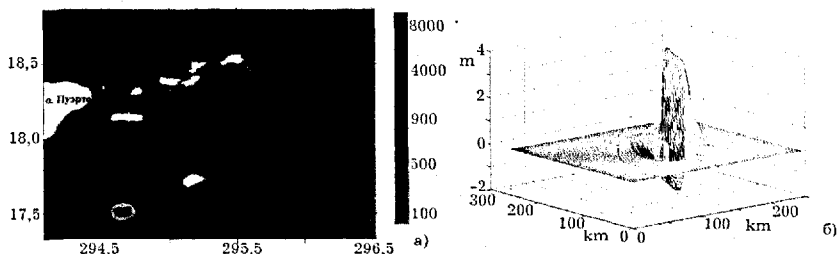


Рис. 5. Расположение разломов земной поверхности, используемых в численном моделировании, для распространения цунами 1867 г. (а). Смоделированная начальная волна цунами для события 1867 г. (б)

Эпицентр землетрясения взят с координатами 18° ш., 65° з.д. согласно NOAA/NESDIS/Национальному Геофизическому Центру Данных (рис. 4б). Поверхностная магнитуда цунамигенного землетрясения согласно ETDB/ATL равна 7,5, а глубина залегания точки фокуса – менее 30 км. Для моделирования этого исторического цунами мы решили рассмотреть несколько возможных расположений источника (рис. 5а). В работе [Reid and Taber, 1920] предполагали, что разлом земной коры ориентируется с запада на восток. Используя эту информацию, первую подвижку (S1) мы расположили по параллели перпенди-

кулярно широте. Другие три источника ($S2, S3, S4$) расположены под углами 15, 20, 25 градусов относительно географической параллели соответственно, близко к впадине Анегада Пассажа, около её наклонной плоскости. Очаг цунами (начальное смещение водной поверхности при землетрясении) рассчитывается по формулам Окады [Okada, 1985] (рис. 5б).

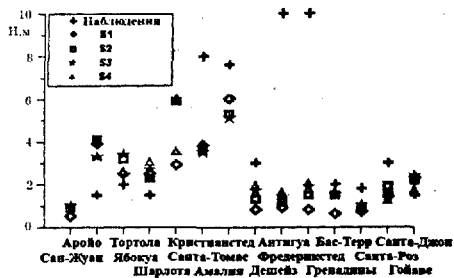


Рис. 6. Сравнение распределения максимальных амплитуд для наблюдаемых и расчетных данных события 1867 г.

Проведенное моделирование показало, что в среднем его результаты очень хорошо удовлетворяют данным наблюдения (рис. 6). Кроме того, показано, что ориентация разлома земной коры в очаге существенно влияет на диаграмму направленности волн цунами (рис. 7). В параграфе 2.3 приводятся данные полевого исследования цунами, произошедшего 21 ноября 2004 г. на о. Гваделупа, в котором автор принимал непо-

средственное участие. Собраны уникальные данные о проявлении цунами данного цунами на островах Гваделупа и Ле Сайнтес, составлена карта высот волн вдоль побережья о. Ле Сайнтес.

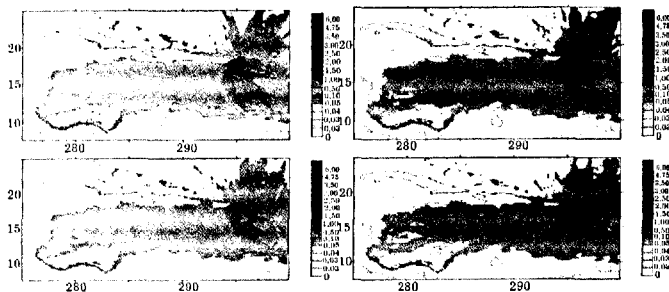


Рис. 7. Распределение максимальных амплитуд во время прохождения волны цунами для всех источников (по осям отложена долгота и широта в градусах)

В параграфе 2.4 приведены результаты прогностических расчетов высот волн цунами от возможных удаленных землетрясений. Выделены участки побережья, слабо подверженные воздействию цунами (рис. 8). Показано, что высота волн затухает на расстояниях порядка 1 000 км (рис. 9), и, следовательно, уровень опасности волн цунами для участков побережья снижается в зависимости от дальности расположения очага цунами. Этот важный вывод должен быть

принят во внимание при планировании защитных мероприятий, связанных с волнами цунами, в бассейне Карибского моря.



Рис. 8. Географическое положение зон с низким цунами риском (звездочки) в Карибском море

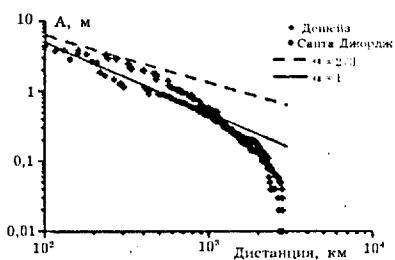


Рис. 9. Зависимость амплитуды волны цунами от пройденного расстояния. Амплитуда волны цунами в городах Дешейз (о. Гваделупа) и Санта Джордж (о. Гренада) в зависимости от расстояния расположения цунамигенного источника (α – коэффициент ослабления)

Опасность волн цунами для побережья о. Гваделупа оценивается в параграфе 2.5. Выделены опасные с точки зрения цунами участки побережья. Показано также, что шаг расчетной сетки не влияет на «количественную» оценку опасности волн цунами. Основные результаты данной главы суммированы в параграфе 2.6.

Третья глава посвящена исследованию волн цунами вулканического происхождения в бассейне Карибского моря. В параграфе 3.1 собраны данные о проявлении вулканических цунами в Мировом океане и Карибском море. Хроника извержений самого мощного из действующих вулканов в бассейне Карибского моря – вулкана Суфриер на о. Монтсеррат, который в результате нескольких извержений за последнее десятилетие неоднократно приводил к возникновению волн цунами, приведена в параграфе 3.2. Описание результатов полевого обследования цунами 12 июля 2003 г. на Малых Антильских островах, вызванного сходом пирокластического потока, образованного извержением вулкана Суфриер, представлено в параграфе 3.3. Главным результатом экспедиции является доказательство того, что вулканическое извержение на острове Монтсеррат, случившееся в ночь 12 – 13 июля 2003 г., вызвало волну цунами, зарегистрированную на островах Монтсеррат и Гваделупа. В параграфе 3.4 приведены результаты математического моделирования распространения волн цунами в окрестности острова Монтсеррат в рамках нелинейной теории мелкой воды. Результаты расчетов находятся в согласии с известными данными цунами 1997 г. и 2003 г. Рассчитанная диаграмма направленности иллюстрируется рис. 10. Отсюда видно, что заметное цунами можно ожидать только на островах Антигуа и Гваделупа, и более слабое – на островах Невис и Барбуда. Это соответствует сделанному ранее предсказанию в рамках более точных вычислений на мелкой сетке [Heinrich et al., 1998, 1999]. Нормализованные распределения

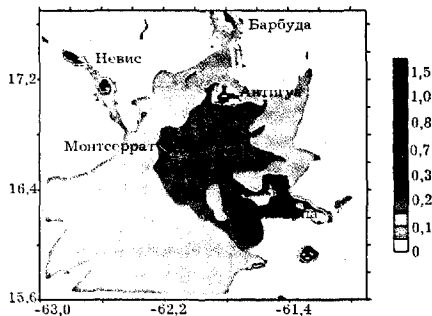


Рис. 10. Распределение рассчитанных максимальных значений амплитуды цунами

вычисленных амплитуд волн цунами представлены на рис. 11. Из рисунка видно, что согласно расчетам, максимальный эффект мог быть на западном берегу Антигуа, вблизи пункта Боланс, на севере и в центральной части западного побережья Гваделупы. В параграфе 3.5 приведены результаты математического моделирования распространения волн цунами в окрестности о. Монтсеррат в рамках нелинейно-дисперсионной теории. Рассчитанная направленная диаграмма направленности представлена рис. 12. Согласно полученным данным, максимальная амплитуда наблюдается в населенном пункте Дешейз, как это и было получено при моделировании в рамках теории мелкой воды, что также подтверждается наблюдаемыми данными. Для сравнения полученных результатов наложили мареграммы, полученные при моделировании в рамках теории мелкой воды и в рамках нелинейно-дисперсионной теории в соответствующих населенных пунктах, друг на друга (рис. 13). Из рисунка видно, что в Дешейз (Гваделупа) и Олд Род (Антигуа) головная волна одинаково описывается обеими теориями как по времени прихода и периоду, так и по амплитуде. Волновой пакет в рамках нелинейно-дисперсионной теории затухает существенно быстрее из-за дисперсии, чем в рамках теории мелкой воды. Что же касается, противоположного направления распространения волны цунами (о. Невис), то здесь расчеты по обеим моделям различаются между собой, хотя конечно времена прихода волны на побережье одинаковы. Характерные периоды волн примерно тоже одинаковые. К сожалению, нам не удалось обследовать цунами на этом острове, чтобы сравнить данные расчетов с наблюдениями. Основные результаты данной главы суммированы в параграфе 3.6.

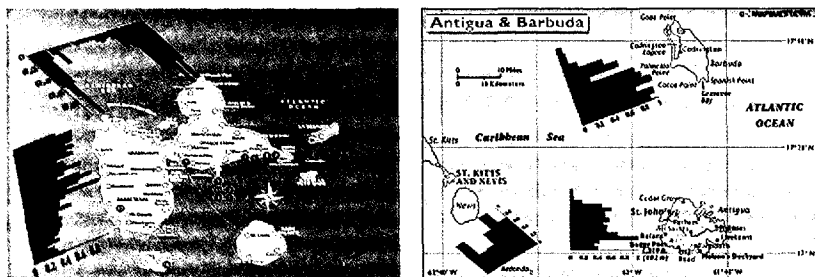


Рис. 11. Нормализованные распределения вычисленных амплитуд цунами

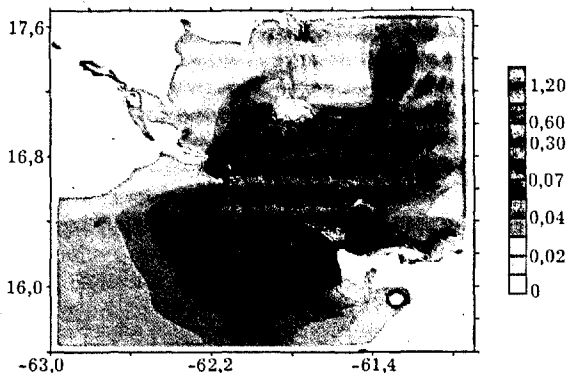


Рис. 12. Распределение рассчитанных максимальных значений амплитуды цунами, полученное в рамках нелинейно-дисперсионной теории

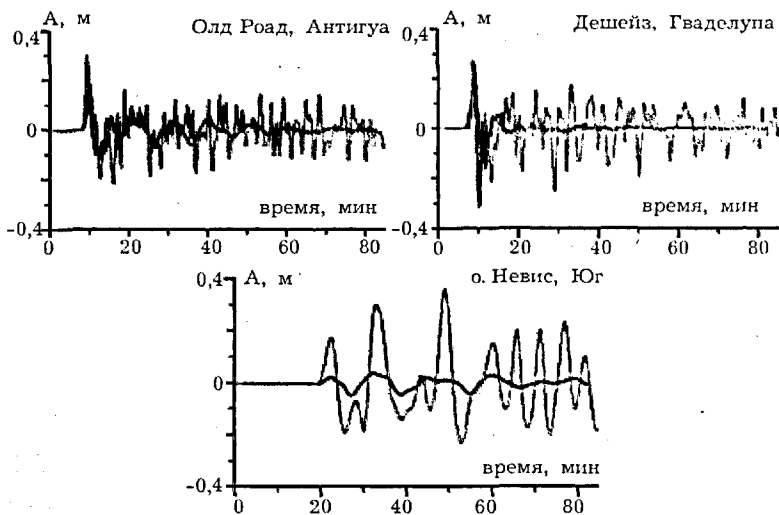


Рис. 13. Сопоставленные мареограммы для случаев моделирования в рамках теории мелкой воды ----- и в рамках нелинейно-дисперсионной теории -----

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

1. Изучены нелинейные и дисперсионные эффекты, возникающие при распространении этих волн, и показана важность их учета при распространении волн цунами в мелких морях. Исследована применимость точных и прибли-

женных решений нелинейной теории волн на воде для объяснения результатов численного моделирования. Показано, что в мелководных районах на фронте длинной волны возникают мелкомасштабные ондуляции (солитоны).

2. Выполнено численное моделирование цунами 18 ноября 1867 г., хорошо обеспеченного данными наблюдений. Рассчитанная диаграмма направленности и распределение высот волн цунами вдоль побережья находятся в хорошем согласии с данными наблюдений. Показан «двух лепестковый» характер распространения волн цунами вдоль Малых Антильских островов и его чувствительность к вариациям положения и ориентации очага.
3. В ходе экспедиционного обследования собраны уникальные данные о проявлении цунами 21 ноября 2004 г. на островах Гваделупа и Ле Сайнтес. Данное цунами вызвано слабым землетрясением (магнитуда 6,3), случившимся между островами Гваделупа и Доминика (Малые Антильские острова).
4. Проведена оценка цунамиопасности побережья бассейна Карибского моря и выделены зоны низкого риска. Эта оценка сделана на основе расчетов волн цунами от исторических и возможных сейсмических и гидродинамических очагов. Зонами низкого риска в Карибском море являются: южное побережье Кубы в районе городов Гуинес и Педро Бетанкурт, а также у побережья г. Флорида; восточное побережье Мексики, часть восточного побережья Никарагуа (в районе города Блуфилдс), а также побережье Венесуэлы в районе залива Маракайбо. Применительно к о. Гваделупа зонами пониженного риска являются населенные пункты северного побережья острова (Порт Луис, Петит Канал, Морне Руж, Монплэйсир). Установлено, что сделанный вывод о наличии зоны пониженного риска слабо зависит от степени подробности используемых батиметрических карт.
5. Представлены результаты экспедиции по обследованию следов цунами, вызванного извержением вулкана Суфрриер на о. Монтсеррат в ночь 12 – 13 июля 2003 г. Получены уникальные данные об этом событии на островах Монтсеррат, Гваделупа и Антигуа. Высота волны цунами по измерениям составляла 4 м на о. Монтсеррат и 1 м на о. Гваделупа.
6. Выполнено численное моделирование цунами 12 июля 2003 г. на о. Монтсеррат в рамках теории мелкой воды и ее дисперсионного обобщения. Результаты моделирования сопоставлены с результатами полевого обследования на близлежащих островах. Показано, что в Дешейз (Гваделупа) и Олд Родд (Антигуа) головная волна одинаково описывается обеими теориями как по времени прихода и периоду, так и по амплитуде. Волновой пакет в рамках нелинейно-дисперсионной теории затухает существенно быстрее из-за дисперсии, чем в рамках теории мелкой воды. На противоположной стороне от места извержения (о. Невис) расчеты амплитудных характеристик волн по обеим моделям различаются между собой. Предсказанные большие значения высоты волны на Гваделупе в районе Дешейз подтверждается сделанными измерениями.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Zahibo N., Pelinovsky E., Yalciner A., Kurkin A., Kozelkov A., Zaitsev A. Modelling the 1867 Virgin Island Tsunami // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2003. V. 3. № 5. P. 367 – 376.
2. Zahibo N., Pelinovsky E., Yalciner A., Kurkin A., Kozelkov A., Zaitsev A. The 1867 Virgin Island Tsunami: observations and modelling // *Oceanologica Acta*. 2003. V. 26. P. 609 – 621.
3. Zahibo N., Pelinovsky E., Kurkin A., Kozelkov A. Estimation of far-field tsunami potential for the Caribbean Coast based on numerical simulation // *Science Tsunami Hazards*. 2003. V. 21. № 4. P. 202 – 222.
4. Козелков А.С., Куркин А.А., Зайцев А.И., Заibo Н., Ялчинер А. Опасность волн цунами для побережья бассейна Карибского моря // *Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика*. 2003. Т. 4. С. 126 – 149.
5. Пелиновский Е.Н., Заibo Н., Данкли П., Талипова Т.Г., Козелков А.С., Куркин А.А., Николкина И.Ф., Самарина Н.М. Цунами, вызванные извержениями вулкана на острове Монтсеррат в Карибском море // *Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика*. 2004. Т. 6. С. 31 – 59.
6. Pelinovsky E., Kozelkov A., Zahibo N., Dunkly P., Edmonds M., Herd R., Talipova T., Nikolkina I. Tsunami generated by the volcano eruption on July 12-13, 2003 at Montserrat, Lesser Antilles // *Science of Tsunami Hazards*. 2004. V. 22. № 1. P. 44 – 57.
7. Talipova T., Pelinovsky E., Kozelkov A., Zahibo N., Okal E., Yalciner A., Kharif Ch., The earthquake and tsunami of November 21, 2004 at les Saintes, Guadeloupe, Lesser Antilles // *Science of Tsunami Hazards*. 2005. V.23. № 1. P.25 – 39.
8. Zahibo N., Pelinovsky E., Talipova T., Kozelkov A., Kurkin A. Analytical and numerical study of nonlinear effects at tsunami modelling // *Applied Mathematics and Computation*. 2005. (в печати)
9. Талипова Т.Г., Куркин А.А., Козелков А.С., Заibo Н. Нелинейно-дисперсионные эффекты при распространении волн цунами // *Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Юбилейный том*. 2005. Т. 14. С. 65 – 70.
10. Kozelkov A., Kurkin A., Pelinovsky E., Yalciner A., Zahibo N., Zaitsev A. Modelling historical tsunamis of 1867 and estimation of danger of a tsunami in basin of Caribbean Sea // *Advanced problems in mechanics. Proceedings of XXXI Summer School APM'2003. St. Petersburg, Russia*. 2004. P. 184 – 192.
11. Zahibo N., Pelinovsky E., Yalciner A., Kurkin A., Kozelkov A., Zaitsev A. The 1867 Virgin island tsunami: observations and modeling // *Proceedings of International Symposium Topical Problems of Nonlinear wave Physics. Nizhny Novgorod, Russia*. 2003. P. 317 – 318.
12. Pelinovsky E., Talipova T., Kurkin A., Kozelkov A., Zahibo N. Nonlinear and dispersion effects in the tsunami wave field // *Proc. 22nd Int. Tsunami Symposium (Chania, Crete, Greece, 27-29 June 2005)*. P. 241 – 246.

13. Zahibo N., Pelinovsky E., Yalciner A., Kurkin A., Kozelkov A., Zaitsev A. The 1867 tsunami at the Virgin islands: observations and simulations // *Geophysical research abstracts*. 2003. V. 5. P. 756.
14. Zahibo N., Pelinovsky E., Yalciner A., Kurkin A., Kozelkov A., Zaitsev A. Numerical simulation of the 1867 Virgin island tsunami propagation // XXXI Summer School – Conference “Advanced Problems in Mechanics”. Book of Abstracts. St. Petersburg. Russia. 2003. P. 60.
15. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Заibo Н., Монтсерратское цунами 12 июля 2003 г.: наблюдения и моделирование // Сборник тезисов 10 всероссийской научной конференции студентов – физиков и молодых ученых. Москва. 2004. Т.2. С. 896 – 897.
16. Kozelkov A., Kurkin A., Pelinovsky E., Zahibo N., Estimation of far-field tsunami for the coast of Caribbean basin // XXXII Summer School – Conference “Advanced Problems in Mechanics”. Book of Abstracts. St. Petersburg. Russia. 2004. P. 106 – 107.
17. Zahibo N., Pelinovsky E., Okal E., Yalciner A., Kharif C., Talipova T., Kozelkov A. Field survey of the 2004 tsunami occurred at Guadeloupe, Lesser Antilles // *Geophysical Research Abstracts*. 2005. V. 7. EGU05-A-00158.
18. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Заibo Н. Математическое моделирование волн цунами, вызванных извержениями вулканов // Десятая Нижегородская сессия молодых ученых. Математические науки. Тезисы докладов. Саров. Россия. 2005. С. 29 – 30.

ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРА

- Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В.** Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования Тихоокеанского побережья СССР // *Тихоокеанский ежегодник*. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 9 – 17.
- Пелиновский Е.Н.** Гидродинамика волн цунами. – Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1996. 276 с.
- Choi B.H., Hong S.J., Pelinovsky E.** Simulation of prognostic tsunamis on the Korean coast // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28. № 10. P. 2013 – 2016.
- Choi B.H., Pelinovsky E., Lee J.S., Woo S.B.** Estimation of tsunami risk zoning on the coasts adjacent to the East Coast from hypothetical earthquake // *J. Earthquake Engineering Society of Korea*. 2002. V. 6. P. 1 – 17.
- Choi B.H., Pelinovsky E., Hong S.J., Woo S.B.** Computation of tsunamis in the East (Japan) Sea using dynamically interfaced nested model // *Pure and Applied Geophysics*. 2003. V. 160. № 8. P. 1383 – 1414.
- Chung J.Y., Go Ch.N., Kaistrenko V.M.** Tsunami hazard estimation for eastern Korean Coast // *Proc. IUGG/IOC Int. Tsunami Symp. Wakayama. Japan*. 1993. P. 409 – 422.
- ETDB/ATL – Expert Tsunami Database for the Atlantics. Version 3.6 of March 15, 2002.** Tsunami Laboratory, Novosibirsk, Russia.
- Gobbi M.F., Kirby J.T., Wei G.** A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Extension to $O(kh)^4$ // *J. Fluid Mech*. 2000. V. 405. P. 181 – 210.

- Heinrich F., Mangeney A., Guibourg S., Roche R.** Simulation of water waves generated by a potential debris avalanche in Montserrat, Lesser Antilles // *Geophys. Research Letters*. 1998. V. 25. P. 3697 – 3700.
- Heinrich F., Guibourg S., Mangeney A., Roche R.** Numerical modelling of a landslide-generated tsunami following a potential explosion of the Montserrat Volcano // *Phys. Chem. Earth*. 1999. V. A24. P. 163 – 168.
- Kirby J., Wei G., Chen Q., Kennedy A., Dalrymple R.** Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and Users Manual // *Center for Applied Coastal Research Department of Civil Engineering University of Delaware, Newark DE 19716, Research Report NO. CACR-98-06, September 1998*
- Lander J.F., Whiteside L.S., Lockridge P.A.** A brief history of tsunami in the Caribbean Sea // *Science of Tsunami Hazards*. 2002. V. 20. № 2. P. 57 – 94.
- Mercado A., Grindlay N., Lynett P., Liu P.L.-F.** Investigation of the potential tsunami hazard on the north coast of Puerto Rico due to submarine landslides along the Puerto Rico trench. Puerto Rico State Emergency Management Agency. 2002. 245 p.
- Okada Y.** Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seism. Soc. America*. 1985. V. 75. P. 1135 – 1154.
- O’Loughlin K.F., Lander J.F.** Caribbean Tsunamis: A 500-Year History from 1498 – 1998 // *Advances in Natural and Technological Hazards Research*. 2003. V. 20.
- Reid H.F., Taber S.** The Virgin Islands Earthquakes of 1867 – 1868 // *Bull. Seismol. Soc. America*. 1920. V. 10. P. 9 – 30.
- Wei G., Kirby J.T., Grilli S.T., Subramanya R.** A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves // *J. Fluid Mech*. 1995. V. 294. P. 71 – 92.
- Wei G., Kirby J.** Time-Dependent Numerical Code for Extended Boussinesq Equations // *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, September/October. 1995. P. 252 – 261.
- Zahibo N., Pelinovsky E.** Evaluation of tsunami risk in the Lesser Antilles // *Natural Hazard and Earth Sciences*. 2001. V. 3. № 4. P. 221 – 231.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Нелинейные и дисперсионные эффекты при распространении волн цунами

- 1.1. Общие сведения о волнах цунами
- 1.2. Теория мелкой воды и ее численная реализация
- 1.3. Нелинейно-дисперсионная теория и ее численная реализация
- 1.4. Оценка нелинейных эффектов при распространении волн цунами
- 1.5. Возникновение солитонов в поле волн цунами
- 1.6. Выводы

Глава 2. Цунами сейсмического происхождения в бассейне Карибского моря

- 2.1. Исторические данные о цунами в Карибском море
- 2.2. Моделирование Виргинского цунами 18 ноября 1867 г.

2.3. Цунами 21 ноября 2004 г. на о. Ле Сайнтес

2.4. Прогностические распределения высот цунами вдоль побережья Карибского моря

2.5. Оценка опасности волн цунами для о. Гваделупа

2.6. Выводы

Глава 3. Цунами вулканического происхождения в бассейне Карибского моря

3.1. Цунами вулканического происхождения в Карибском море

3.2. Извержение вулкана Суфриер на о. Монтсеррат в 1995 – 2004 гг.

3.3. Полевое обследование следов цунами, вызванных извержением вулкана Суфриер 12 июля 2003 г.

3.4. Численное моделирование цунами 12 июля 2003 г. в рамках теории мелкой воды

3.5. Численное моделирование цунами 12 июля 2003 г. в рамках нелинейно-дисперсионной теории

3.6. Выводы

Заключение

Список литературы

Андрей Сергеевич Козелков

**ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ
ПОБЕРЕЖЬЯ КАРИБСКОГО МОРЯ**

Автореферат

Подписано в печать 07.02.2006. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная № 1. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 150 экз. Заказ 213

Типография ННГУ, Н. Новгород, ул. Б. Покровская. 37

