

Информационно-вычислительные аспекты совершенствования национальной системы предупреждения о цунами*

В. В. БАБАЙЛОВ, С. А. БЕЙЗЕЛЬ

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия
e-mail: ict@ict.nsc.ru

А. А. ГУСЕВ

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Россия*
e-mail: gusev@emsd.iks.ru

В. К. ГУСЯКОВ

*Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*
e-mail: gvk@sscc.ru

С. В. ЕЛЕЦКИЙ

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия
e-mail: ict@ict.nsc.ru

И. А. ЗЫСКИН, Д. А. КАМАЕВ

НПО "Тайфун", Обнинск, Россия
e-mail: kda@feerc.obninsk.org

З. И. ФЕДОТОВА, Л. Б. ЧУБАРОВ, Ю. И. ШОКИН

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия
e-mail: ict@ict.nsc.ru

This paper is devoted to information aspects of a system, which is intended for accumulation of the tsunami data along the eastern coast of Kamchatka. The authors present a set of methodological approaches, general principles, gained experience and the results obtained from their implementation.

Введение

Необходимость совершенствования национальных систем предупреждения о цунами осознана как научным, так и административным сообществом стран, побережье кото-

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 05-05-64460, № 06-05-72014, № 07-05-13583, № 08-07-00105), программы Интеграционных фундаментальных исследований СО РАН (проекты № 28 и № 113), программы Государственной поддержки научных исследований, проводимых ведущими научными школами Российской Федерации НШ-931.2008.9, проекта INTAS 06-1000013-9236.

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2008.

рых подвержено воздействию этих волн. Катастрофическое Суматранское цунами 26 декабря 2004 г. и последовавшие за ним аналогичные явления в других акваториях Мирового океана послужили поводом для создания коллективов, объединивших в своем составе ученых и практиков, давно и успешно работающих в указанной проблемной области. В России такая работа ведется в рамках Федеральной целевой программы “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года” и междисциплинарного проекта интеграционных фундаментальных исследований СО РАН и поддерживается Российским фондом фундаментальных исследований. Непосредственное руководство возложено на НПО “Тайфун” Росгидромета РФ.

В статье обсуждается применение современных информационно-вычислительных технологий для наполнения информационных баз о проявлениях цунами у побережья результатами специально организованных вычислительных экспериментов по моделированию трансформации волн цунами на трассах от источника начального возмущения до побережья Камчатки. Истоки этой технологии вплотную связаны с работой по конструированию локальной системы предупреждения о цунами, выполненной авторами на рубеже 1990-х гг. по заказу инженерных служб ВМФ. Впоследствии аналогичные принципы были реализованы специалистами ряда стран Тихоокеанского бассейна, в частности, для построения современных систем предупреждения о цунами в Японии и США.

1. Базовые технологические принципы

Рассмотрим основные положения предлагаемой технологии на примере реализации системы, основанной на базе данных о проявлениях цунами вблизи побережья Камчатки.

На первом этапе работы определяется перечень защищаемых пунктов и накапливается предварительная информация о расположении потенциально опасных очагов цунамигенных землетрясений. С учетом этих данных определяется акватория, прилегающая к защищаемому участку побережья (п-ов Камчатка) и утверждается расчетная область (“Камчатка”). Таким образом формируется основа возможных сценариев развития вероятных катастрофических событий. По результатам анализа исторических данных о цунами в акватории п-ва Камчатка и в соответствии с концепцией конструирования набора модельных источников в качестве базовой акватории выбран район, имеющий координаты от 150 до 177 град. в.д. и от 45 до 62 град. с.ш. (рис. 1).

Одновременно определяются точки установки расчетных мареографов. Эти мареографы размещаются в ближайших к защищаемым пунктам прибрежных точках, в этих точках определяются глубины, оцениваются отклонения их географических координат от координат реальных защищаемых пунктов. Как правило, такие отклонения вполне допустимы. Для оценки пространственной устойчивости рассчитываемых характеристик проявления волн в окрестности каждого мареографа устанавливаются дополнительные соседние датчики. Эта работа выполняется путем сопоставления экспертных оценок с применением “внешнего” программного обеспечения из класса геоинформационных систем.

На основе детального исследования сеймотектонической обстановки изучаемой акватории окончательно определяется и утверждается схема возможного размещения модельных землетрясений. При этом также привлекаются дополнительные экспертные оценки.

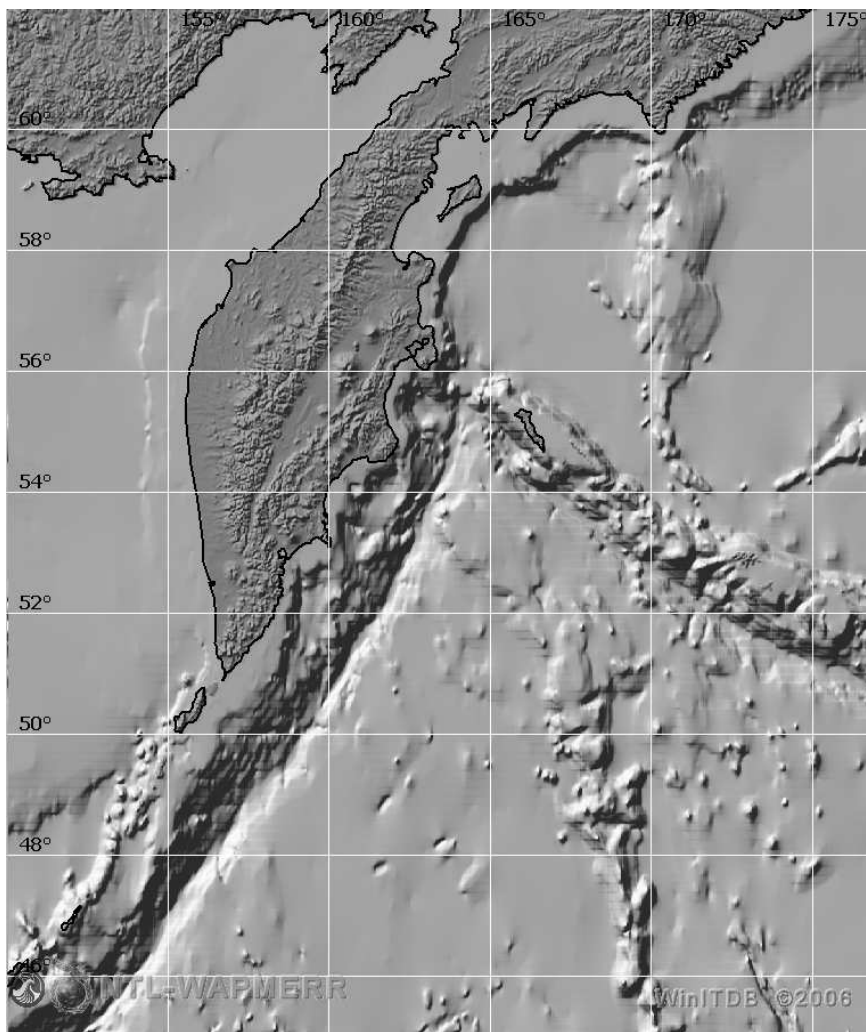


Рис. 1. Рельеф дна в расчетной области “Камчатка”. По осям отложены географические координаты в градусах

На этом же этапе проводится адаптация имеющегося программного обеспечения к задачам конкретного исследования — к особенностям рельефа дна и геометрии береговых границ. При необходимости создаются новые, оригинальные алгоритмы и программы. Так, в ходе настоящей работы разработана система вычислительных и общесистемных алгоритмов для серийного расчета начальных возмущений свободной поверхности, порожденных модельными землетрясениями, а также выполнена модификация вычислительных алгоритмов для расчета трансформации волн цунами от области источника возмущения вплоть до линии берега. Следует заметить, что используемая авторами совокупность вычислительных алгоритмов включает различные их версии, необходимые для оценки адекватности результатов моделирования и степени их устойчивости относительно учета донного и поверхностного трения, сферичности Земли, той или иной формы записи уравнений математической модели, учета нелинейных эффектов и т. п.

Система управляющих алгоритмов обеспечивает проведение серийных расчетов распространения волны цунами. Эти алгоритмы реализуют управление данными и обработку расчетных материалов (мареограмм), по которым для каждого модельного землетрясения в каждом защищаемом пункте определяют максимальные и минимальные

значения уровня свободной поверхности, а также размах волны — полусуммы максимальных и минимальных значений. Кроме того, для каждого землетрясения рассчитываются времена наступления максимума и минимума, а также “имя” (индекс) защищаемого пункта, в котором такие значения были определены. В свою очередь, для каждого защищаемого пункта вычисляются порожденные каждым модельным землетрясением максимальные и минимальные значения уровня свободной поверхности и размах волны, а также времена наступления максимума и минимума и “имя” (индекс) землетрясения, породившего эти экстремальные значения.

Накопленный авторами в результате достаточно трудоемких вычислительных экспериментов опыт позволил выявить основные проблемы вычислительного моделирования и наметить пути их разрешения. Так, было принято решение о целесообразности проведения двух независимых серий производственных расчетов — на основе линейной и нелинейной моделей мелкой воды с использованием недивергентной версии алгоритма, аппроксимирующего уравнения теории мелкой воды в сферической системе координат и обладающего большим запасом устойчивости.

Чрезвычайно важным представляется решение о создании информационно-вычислительной системы в двух реализациях — “пользовательской” и “исследовательской”. Первая характеризуется жесткой структурой и предназначена для поддержки безальтернативной стратегии вычислительного эксперимента. “Пользовательская” версия предназначена для персонала, не имеющего специальных знаний в областях вычислительной математики, гидродинамики, прикладного программирования. “Исследовательская” версия, напротив, будет наделена максимально возможной гибкостью, допускающей проведение расчетов для различных акваторий, различных наборов входных данных с использованием различных математических моделей, вычислительных алгоритмов, методик обработки данных.

Такое разделение функций соответствует принятой концепции развития алгоритмической и системной поддержки национальной системы предупреждения о цунами в РФ, согласно которой работа по численному моделированию цунами выполняется специалистами-вычислителями по заказу соответствующих служб, а результаты моделирования передаются заказчику в удобной для последующего использования форме. Разумность этого подхода подтверждается и результатами настоящей работы.

2. Моделирование потенциальных очагов цунамигенных землетрясений вблизи Камчатского побережья

На основе анализа доступных исторических сведений о проявлении цунами на восточном побережье Камчатки и результатов исследований, проведенных с привлечением специалистов-сейсмологов, хорошо знающих специфику рассматриваемого региона, выделены зоны вероятного расположения очагов цунамигенных землетрясений и предложены наиболее вероятные наборы их параметров.

2.1. Историческая сейсмичность Камчатки

Основную угрозу цунами для восточного побережья Камчатки несут очаги подводных землетрясений, располагающиеся в относительно узкой полосе между краем камчатского шельфа и осью глубоководного желоба (рис. 2), где расположена основная

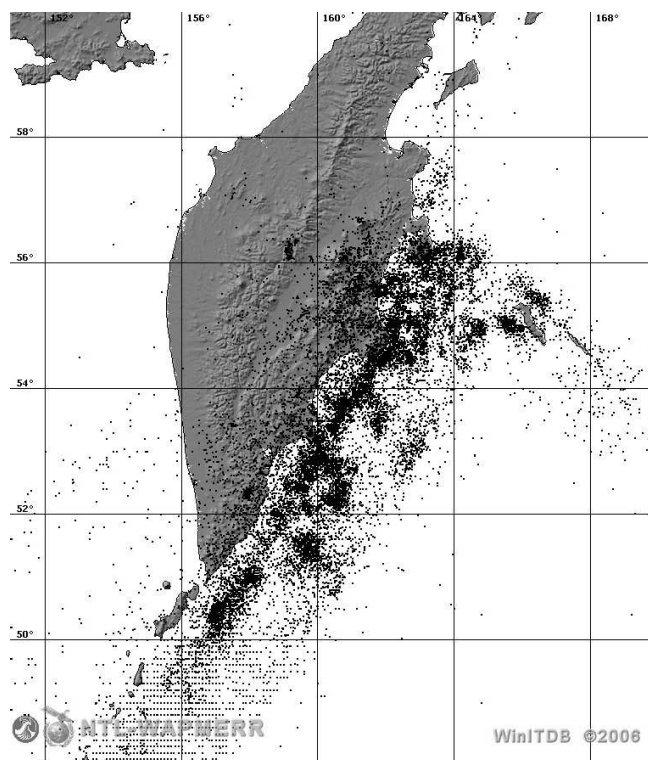


Рис. 2. Карта сейсмичности Камчатки. Показаны очаги землетрясений, происшедших в этом районе с 1737 по 2007 г. (по материалам интегрированной информационной системы ITDB/WLD [1])

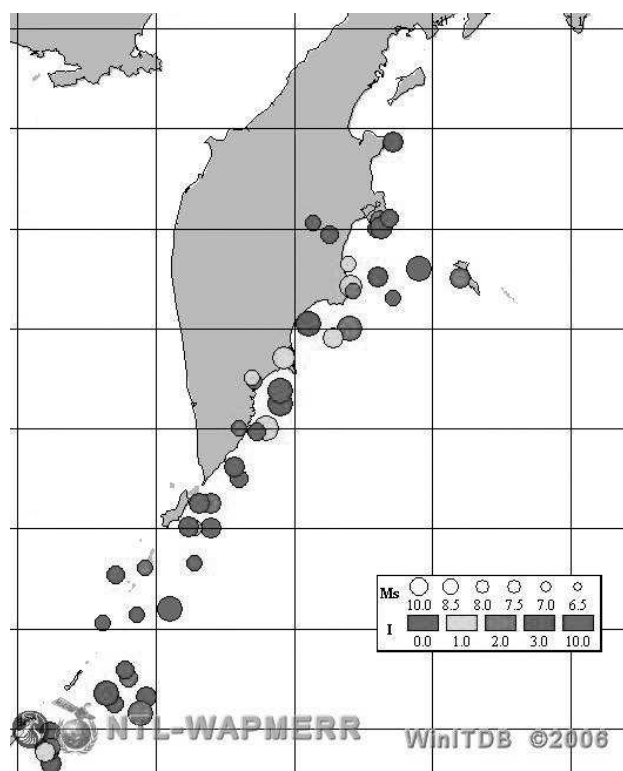


Рис. 3. Карта очагов цунамигенных землетрясений, происшедших вблизи Камчатки с 1737 по 2007 г.

сейсмическая зона Камчатки. В ней выделено несколько локальных максимумов, ассоциируемых с главными мысами на восточном побережье Камчатки. В пределах этой зоны располагаются очаги всех исторически известных цунамигенных землетрясений Камчатки (33 события с 1737 г. по настоящее время), в том числе очаги двух сильнейших землетрясений 1737 и 1952 гг., породивших наиболее разрушительные цунами на полуострове [2], волны от которых наблюдались также и в других регионах Тихого океана (рис. 3). Другие сильные цунамигенные землетрясения произошли в этой зоне в 1841, 1904, 1923 и 1969 гг., все они сопровождалась опасными цунами на ближайших к очагу участках Камчатского побережья. Сильные землетрясения имели место в центральной части Камчатки (например, землетрясение 1792 г. в районе Большерецка), однако их очаги располагаются целиком в пределах суши, а следовательно, не несут непосредственной угрозы цунами.

2.2. Модель очага землетрясения

Для изучения процесса возбуждения цунами наиболее адекватной математической моделью является решение замкнутой системы уравнений динамической теории упругости, описывающей колебания слоя сжимаемой жидкости (модель океана), залегающего на поверхности упругого полупространства (модель земной коры и верхней мантии). Такой подход к изучению цунами впервые был применен Г. Подъяпольским [3], затем использовался в работах [4–6]. В работе [7] показано, что в длинноволновом приближении решение такой системы эквивалентно последовательному решению двух отдельных задач:

- определения статических (остаточных) деформаций поверхности упругого полупространства, возникающих под действием внутреннего источника дислокационного типа (разрыва сплошности среды);

- вычисления колебаний однородной несжимаемой жидкости в рамках теории мелкой воды при использовании в качестве начальных условий деформаций дна, вычисленных при решении первой задачи.

Этот подход, получивший название “поршневой модели” возбуждения цунами, широко применяется в задачах численного моделирования цунами и в случаях, когда известны параметры очага землетрясения и детальная батиметрия дна океана, он позволяет получить достаточно точное соответствие расчетных мареограмм наблюдаемым.

При построении модели предполагается, что слой H (глубина океана) однородной сжимаемой жидкости (воды) залегает на однородном упругом полупространстве (поры земной коры) и находится в однородном поле силы тяжести. На глубине h под дном находится модельный источник, имеющий некоторые свойства реального очага землетрясения. Остаточные смещения дна океана вычисляются для пространственной дислокационной модели очага землетрясения, описываемой следующим набором параметров:

L — длина плоскости разлома;

W — ширина плоскости разлома;

δ — угол падения разлома (отсчитывается против часовой стрелки от горизонтальной плоскости);

λ — направление подвижки в плоскости разлома (отсчитывается против часовой стрелки от проекции горизонтальной линии на плоскость разлома);

D_0 — конечная амплитуда смещения противоположных берегов разрыва.

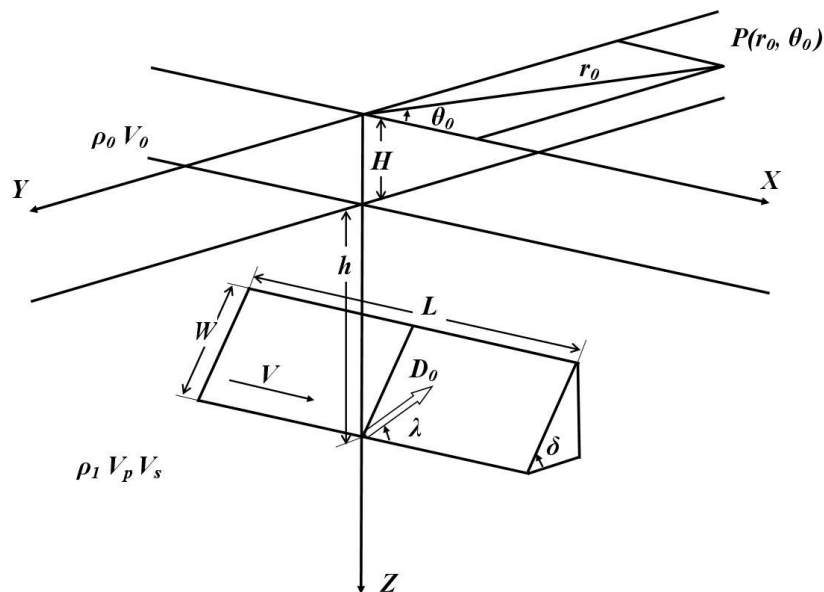


Рис. 4. Модель пространственного дислокационного очага землетрясения, используемая в расчетах остаточных смещений

На рис. 4 показана геометрия задачи, где кроме перечисленных использованы следующие обозначения: $P(r_0, \theta_0)$ — точка наблюдения с координатами (r_0, θ_0) , θ_0 — угол, определяющий ориентацию линии наблюдения относительно области простираения разрыва; ρ_0 — плотность воды; V_0 — скорость звука в воде; ρ_1 , V_p и V_s — плотность, скорость продольных и поперечных волн в упругом полупространстве соответственно; V — скорость распространения разрыва.

Создаваемый таким источником сейсмический момент вычисляется по формуле

$$M_0 = \mu L W,$$

где μ — модуль жесткости среды. Корреляционная формула Аки [8] дает связь сейсмического момента с моментом-магнитудой:

$$M_W = \frac{2}{3} (\lg M_0 - 9).$$

При построении численного алгоритма расчета остаточных смещений использовались расчетные формулы, полученные в работе [9]. Сравнение результатов с расчетами по формулам, приведенным в более поздней работе [10], показало, что они совпадают с точностью до различий в реализации численных алгоритмов на разных ЭВМ.

2.3. Система модельных очагов вблизи восточного побережья Камчатки

Сейсмотектоническая зона вблизи восточного побережья Камчатки, в пределах которой располагаются очаги исторических цунамигенных землетрясений, аппроксимировалась предложенной А. А. Гусевым [11] системой модельных очагов (рис. 5).

За основу здесь принято распределение модельных очагов землетрясений с магнитудой M_W , равной 7.8. Изучение исторических цунами этого региона показывает, что именно такая магнитуда землетрясений является пороговой для возбуждения опасных

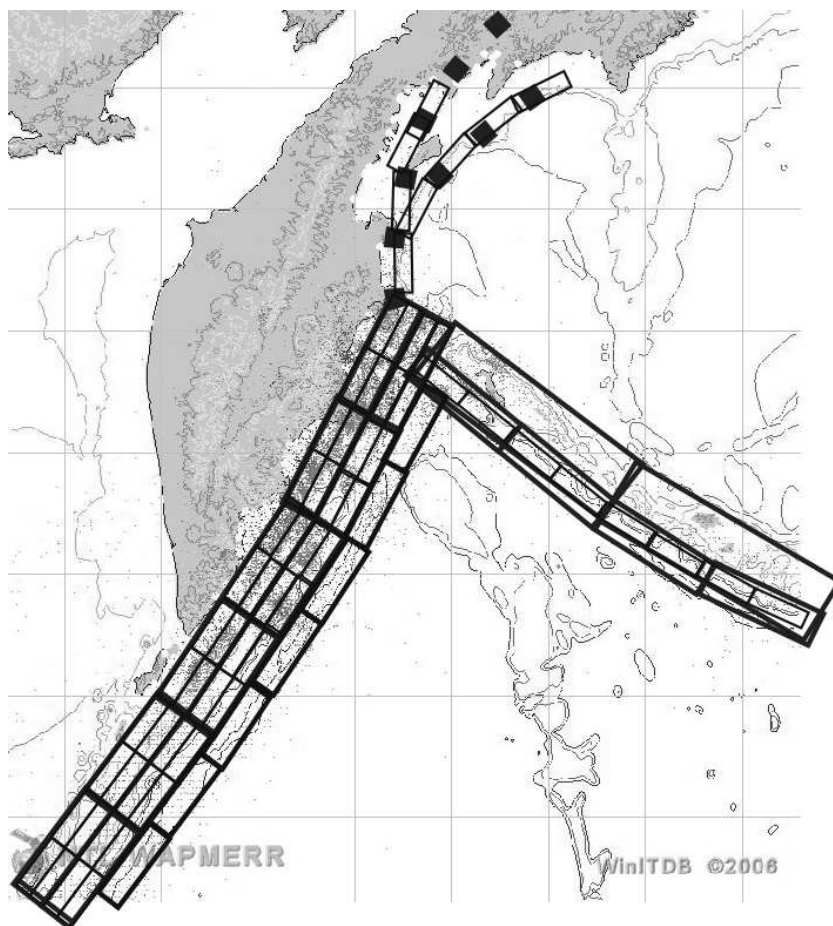


Рис. 5. Схематическое изображение системы модельных очагов землетрясений вблизи восточного побережья Камчатки

цунами. Размеры плоскости разрыва для очагов данной магнитуды были приняты равными $L = 108$ км, $W = 38$ км при величине подвижки $D_0 = 2.74$ м. В качестве основного механизма очагов принят пологий надвиг по главной литосферной границе раздела этой зоны, т. е. границе между поддвигаемой океанической корой и надвигающимся на нее островодужным выступом континентальной литосферы. Углы падения плоскости разлома приняты равными $\delta = 15^\circ$, направление подвижки $\lambda = 90^\circ$, что соответствует пологому надвигу. Четыре полосы таких модельных очагов равномерно располагаются в зоне субдукции тихоокеанской океанической плиты под азиатскую континентальную плиту. Глубина верхнего края разрыва каждой следующей полосы закономерно увеличивается (в соответствии с углом падения плоскости разрыва) по мере удаления от оси глубоководного желоба (рис. 6 и 7).

Для моделирования возможных землетрясений с очагами, целиком располагающимися в пределах тихоокеанской плиты (подобных Симуширскому землетрясению 13 января 2006 г.), была рассмотрена дополнительная полоса очагов с длиной $L = 130$ км, шириной $W = 38$ км и взбрособросовым типом механизма ($\lambda = 90^\circ$) по крутопадающим (в обоих возможных направлениях) плоскостям разрывов ($\delta = \pm 45^\circ$), проходящим вдоль океанического борта глубоководной впадины. Помимо этой основной системы очагов рассмотрены модельные очаги с расположением вдоль Алеутской гряды, а также очаги в западной части Берингова моря, представляющие угрозу цунами для восточного по-

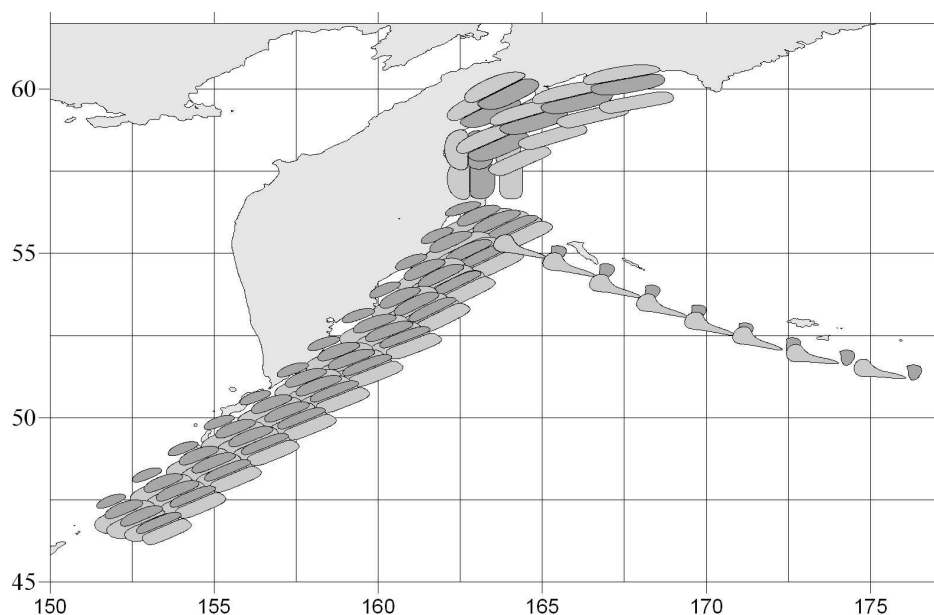


Рис. 6. Схема размещения начальных смещений в расчетной области “Камчатка” для землетрясений с магнитудой 7.8

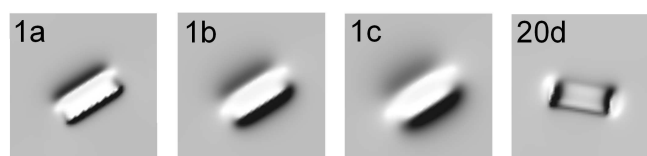


Рис. 7. Типичные смещения свободной поверхности океана над зоной подводных землетрясений с магнитудой 7.8. В поле каждого рисунка указан индекс соответствующего модельного очага землетрясения

бережья Корякии. Величина магнитуды и, соответственно, размеры плоскости разрыва для них приняты аналогичными в очагах вдоль восточного побережья Камчатки. Что касается наиболее вероятного механизма источников, то для системы Алеутских очагов он принят соответствующим косому поддвигу тихоокеанской плиты под берингоморскую. Угол падения δ был принят равным 10° , направление подвижки λ — равным 170° .

Очаги в западной части Берингова моря аппроксимировались системой взбросо-сбросовых подвижек ($\lambda = 90^\circ$) по крутопадающим (в обоих возможных направлениях) плоскостям разрывов ($\delta = \pm 45^\circ$), проходящим вдоль края берингоморского шельфа. Размеры плоскостей разрывов и величина подвижки по ним принимались такими же, как и для основной системы очагов, располагающихся вдоль глубоководного желоба, т. е. $L = 108$ км, $W = 38$ км, $D_0 = 2.74$ м.

Дополнительно к перечисленным выше очагам рассмотрены модели более сильных и предельно возможных в основной курило-камчатской и алеутской зонах землетрясений с магнитудами $M_W = 8.4$ и $M_W = 9.0$ (рис. 8 и 9, где $M_W = 9.0$). Размеры плоскостей разрывов для этих моделей приняты равными $L = 215$ км, $W = 75$ км и $L = 430$ км, $W = 150$ км соответственно. Их механизмы приняты аналогичными механизмам очагов с магнитудой 7.8, т. е. пологие надвиги для основной курило-камчатской зоны и косые

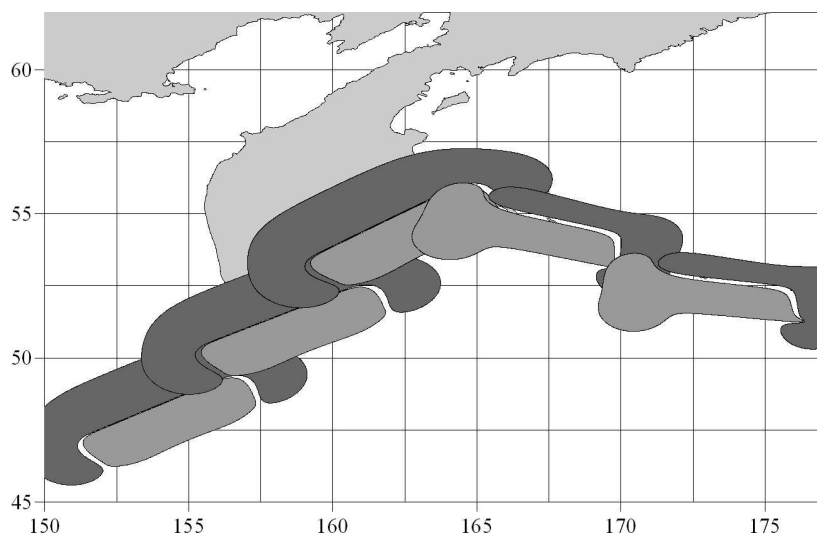


Рис. 8. Схема размещения начальных смещений в расчетной области “Камчатка” для землетрясений с магнитудой 9.0

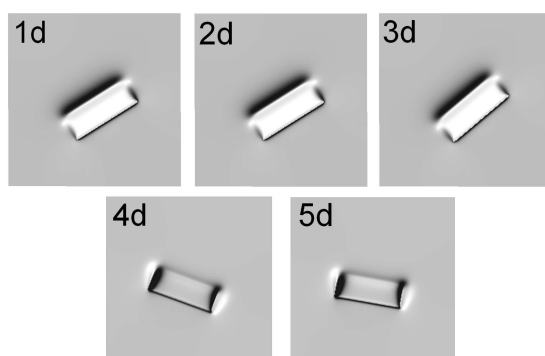


Рис. 9. Смещения свободной поверхности океана над зоной подводных землетрясений с магнитудой 9.0. В поле каждого рисунка указан индекс соответствующего модельного очага землетрясения

поддвиги для алеутской зоны. Землетрясений с аналогичными магнитудами в берингово-морской зоне Корякии не наблюдалось.

3. Алгоритмическое обеспечение

Совокупность вычислительных алгоритмов разбита на два модуля: модуль расчета начального возмущения свободной поверхности океана, порожденного модельным цунамигенным землетрясением, и модуль расчета распространения волны цунами от заданного начального возмущения.

Для выполнения серийных расчетов разработана специальная консольная утилита `serial_calc.exe`, не входящая в комплект программного обеспечения поддержки “пользовательского” режима. Эта утилита предназначена для запуска и управления серийными расчетами, она позволяет автоматизировать настройку алгоритмов и расположение результатов расчета в соответствии с необходимой структурой хранилища. Создание

производственной версии этой утилиты потребовало тщательной настройки вычислительных алгоритмов, и потому ее разработка началась заранее, на этапе, предшествующем проектированию и реализации структуры хранилища результатов. Такой подход оправдал себя еще и потому, что непосредственное проведение производственных расчетов оказалось весьма продолжительным процессом и структура хранилища уточнялась по ходу разработки системы.

Кроме того, разработаны специализированная вычислительная утилита `source.exe`, предназначенная для расчета начального поля смещения свободной поверхности океана, и утилита `MassGlobalCalcul.exe`, осуществляющая моделирование трансформации волны цунами от зоны начального возмущения к защищаемым пунктам на берегу. Установлено, что для определения максимальных высот волн в окрестности защищаемых пунктов (вплоть до пятиметровой изобаты) достаточно использовать классические уравнения мелкой воды. Построенная на основе этих уравнений численная модель обладает набором физических, географических и математических параметров. К физико-географическим параметрам относятся начальные данные (форма начального возмущения свободной поверхности), форма границ (очертания берегов и сооружений) и типы граничных условий, батиметрия, шероховатость донной поверхности и др. Математические параметры возникают в ходе построения вычислительных алгоритмов. Вычислительный модуль системы реализует алгоритм расчета распространения цунами, основанный на различных модификациях конечно-разностной схемы Мак-Кормака [12, 13], с учетом двух типов граничных условий: отражение от вертикальной непроницаемой границы и проход волн за границы расчетной области.

Нелинейные уравнения мелкой воды с учетом сил Кориолиса и донного трения на сфере имеют следующий вид (значительные размеры расчетной области потребовали использования географической системы координат):

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left(\frac{\partial hu}{\partial \lambda} + \frac{\partial hv \cos \varphi}{\partial \varphi} \right) &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{R} \left(\frac{1}{2 \cos \varphi} \frac{\partial u^2}{\partial \lambda} + v \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{g}{\cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} \right) &= f_1, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{R} \left(\frac{u}{\cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{1}{2} \frac{\partial v^2}{\partial \varphi} + g \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} \right) &= f_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь R — средний радиус Земли; φ — географическая широта; λ — географическая долгота; t — время; $h = H + \eta$ — полная глубина; H — глубина невозмущенного слоя жидкости; η — смещение свободной поверхности; g — ускорение силы тяжести; u и v — компоненты вектора скорости по направлениям λ и φ соответственно; $f_1 = lv - \frac{gk^2}{h^{4/3}}u\sqrt{u^2 + v^2}$, $f_2 = -lu - \frac{gk^2}{h^{4/3}}v\sqrt{u^2 + v^2}$, $l = 2\omega \sin \varphi$, ω — угловая скорость вращения Земли; k — коэффициент шероховатости.

Рассматривая область $\Omega(\lambda, \varphi) = \{(\lambda, \varphi) : \underline{\lambda} \leq \lambda \leq \bar{\lambda}, \underline{\varphi} \leq \varphi \leq \bar{\varphi}\}$ в плоскости географических координат λ и φ , введем в ней равномерную прямоугольную сетку $\bar{\Omega} = \{(\lambda_i, \varphi_j) : \underline{\lambda} \leq \lambda_i \leq \bar{\lambda}, \underline{\varphi} \leq \varphi_j \leq \bar{\varphi}, 0 \leq i \leq N_\lambda, 0 \leq j \leq N_\varphi\}$ с шагами $\Delta\lambda$ и $\Delta\varphi$ по пространственным переменным λ и φ соответственно. Пусть $\tau^n = t^{n+1} - t^n$ — шаг по времени. В терминах сеточных функций, зависящих от дискретных переменных λ_i, φ_j и t^n , явная двухшаговая конечно-разностная схема для аппроксимации нелинейной модели (1) во внутренних узлах сетки $\bar{\Omega}$ имеет следующий вид.

Шаг 1

$$\begin{aligned} \frac{\widehat{h}_{ij} - h_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{h_{ij}^n u_{ij}^n - h_{i-1j}^n u_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} + \frac{\cos \varphi_j h_{ij}^n v_{ij}^n - \cos \varphi_{j-1} h_{ij-1}^n v_{ij-1}^n}{\Delta \varphi} \right] &= 0, \\ \frac{\widehat{u}_{ij} - u_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{(u_{ij}^n)^2 - (u_{i-1j}^n)^2}{2\Delta \lambda} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} \right] + \frac{v_{ij}^n u_{ij}^n - u_{ij-1}^n}{R \Delta \varphi} &= f_{1ij}^n, \\ \frac{\widehat{v}_{ij} - v_{ij}^n}{\tau^n} + \frac{u_{ij}^n}{R \cos \varphi_j} \frac{v_{ij}^n - v_{i-1j}^n}{\Delta \lambda} + \frac{1}{R} \left[\frac{(v_{ij}^n)^2 - (v_{ij-1}^n)^2}{2\Delta \varphi} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{ij-1}^n}{\Delta \varphi} \right] &= f_{2ij}^n, \end{aligned} \quad (2)$$

где $f_{1ij}^n = l_j v_{ij}^n - gk^2 \frac{u_{ij}^n \sqrt{(u_{ij}^n)^2 + (v_{ij}^n)^2}}{(h_{ij}^n)^{4/3}}$, $f_{2ij}^n = -l_j u_{ij}^n - gk^2 \frac{u_{ij}^n \sqrt{(u_{ij}^n)^2 + (v_{ij}^n)^2}}{(h_{ij}^n)^{4/3}}$, $l_j = 2\omega \sin \varphi_j$.

Шаг 2

$$\begin{aligned} \frac{h_{ij}^{n+1} - \frac{1}{2}(h_{ij}^n + \widehat{h}_{ij})}{\tau^n/2} + \\ + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{\widehat{h}_{i+1j} \widehat{u}_{i+1j} - \widehat{h}_{ij} \widehat{u}_{ij}}{\Delta \lambda} + \frac{\cos \varphi_{j+1} \widehat{h}_{i+1j} \widehat{v}_{i+1j} - \cos \varphi_j \widehat{h}_{ij} \widehat{v}_{ij}}{\Delta \varphi} \right] &= 0, \\ \frac{u_{ij}^{n+1} - \frac{1}{2}(u_{ij}^n + \widehat{u}_{ij})}{\tau^n/2} + \\ + \frac{1}{R \cos \varphi_j} \left[\frac{(\widehat{u}_{i+1j})^2 - (\widehat{u}_{ij})^2}{2\Delta \lambda} + g \frac{\widehat{h}_{i+1j} - H_{i+1j}^n - \widehat{h}_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \lambda} \right] + \frac{\widehat{v}_{ij} \widehat{u}_{i+1j} - \widehat{u}_{ij}}{R \Delta \varphi} &= \widehat{f}_{1ij}, \\ \frac{v_{ij}^{n+1} - \frac{1}{2}(v_{ij}^n + \widehat{v}_{ij})}{\tau^n/2} + \\ + \frac{\widehat{u}_{ij}}{R \cos \varphi_j} \frac{\widehat{v}_{i+1j} - \widehat{v}_{ij}}{\Delta \lambda} + \frac{1}{R} \left[\frac{(\widehat{v}_{i+1j})^2 - (\widehat{v}_{ij})^2}{2\Delta \varphi} + g \frac{\widehat{h}_{i+1j} - H_{i+1j}^n - \widehat{h}_{ij} + H_{ij}^n}{\Delta \varphi} \right] &= \widehat{f}_{2ij}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\widehat{f}_{1ij} = l_j \widehat{v}_{ij} - gk^2 \frac{\widehat{u}_{ij} \sqrt{(\widehat{u}_{ij})^2 + (\widehat{v}_{ij})^2}}{(\widehat{h}_{ij})^{4/3}}$, $\widehat{f}_{2ij} = -l_j \widehat{u}_{ij} - gk^2 \frac{\widehat{v}_{ij} \sqrt{(\widehat{u}_{ij})^2 + (\widehat{v}_{ij})^2}}{(\widehat{h}_{ij})^{4/3}}$.

Для линейных уравнений мелкой воды применялась разностная схема, аналогичная (2) и (3). Верхняя и нижняя границы расчетной области параллельны экватору, а левая и правая проходят по меридианам. Звенья границы “вертикальная стенка” проходят через узлы равномерной прямоугольной сетки так, что всегда параллельны внешним сторонам прямоугольника $\Omega(\lambda, \varphi)$. На боковых фрагментах границы граничные условия для разностной схемы имеют вид $u = 0$, $\partial v / \partial \lambda = 0$, $\partial \eta / \partial \lambda = 0$, а на параллелях — соответственно $v = 0$, $\partial u / \partial \varphi = 0$, $\partial \eta / \partial \varphi = 0$. На внешних “открытых” границах области поставлены условия свободного прохода — условия Зоммерфельда. В используемой системе координат на параллелях они имеют вид

$$R \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm c \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} = 0, \quad R \frac{\partial u}{\partial t} \pm c \frac{\partial u}{\partial \varphi} = 0, \quad R \frac{\partial v}{\partial t} \pm c \frac{\partial v}{\partial \varphi} = 0,$$

а на меридианах

$$R \frac{\partial \eta}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = 0, \quad R \frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} = 0, \quad R \frac{\partial v}{\partial t} \pm \frac{c}{\cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} = 0,$$

где $c = \sqrt{gh}$ — скорость распространения сигнала, а выбор знака зависит от направления внешней нормали к соответствующей границе.

Батиметрия дна и топография суши являются фиксированными, хранятся в соответствующей базе данных и используются вычислительным модулем и модулем визуализации. Эти данные представляют собой сеточную функцию в узлах дискретной области $\bar{\Omega}$ и определяются как значения глубин и высот, заданных на равномерной одноминутной сетке.

Начальное возмущение свободной поверхности океана рассчитывается специальным вычислительным модулем, а начальные скорости полагаются нулевыми. Шаг разностной схемы по времени вычисляется на каждом временном слое при условии устойчивости. Алгоритм предусматривает возможность сглаживания решения через определенное число шагов. Параметры такого сглаживания задаются в специальном файле.

Первая версия программного обеспечения “пользовательского” режима работы предоставляет возможности просмотра распределений максимальных и минимальных амплитуд волн и их “размахов” в выбранном защищаемом пункте по всем цунамигенным землетрясениям, а также просмотра распределений максимальных и минимальных амплитуд волн и их “размахов” от выбранного цунамигенного землетрясения по всем защищаемым пунктам. Возможен экспорт этих распределений в текстовые файлы. В режиме просмотра для выбранного пункта и выбранного землетрясения в отдельном окне можно отрисовать соответствующую мареограмму.

4. Структура базы данных

В настоящей работе принята терминология, следуя которой под базой данных понимается совокупность таблиц (SQL-базы) и папок на диске. В качестве системы управления данными выбрана стандартная система MS Access, хорошо документированная и вполне удовлетворяющая требованиям скорости доступа к данным. Эта система проста в эксплуатации и поддерживает язык SQL-запросов, что позволит в дальнейшем при необходимости легко перейти на другую базу данных SQL. Использование стандартной системы управления базой данных обеспечивает высокую скорость доступа к хранимой информации посредством SQL-запросов.

Предложенная и реализованная авторами структура хранилища данных позволяет накапливать в базе данных информацию о модельных цунамигенных землетрясениях, защищаемых пунктах и других сущностях, а данные большого объема (мареограммы, массивы возмущений свободной поверхности и др.) хранятся на локальном диске. Это обеспечивает доступ к информации с использованием других “внешних” программных инструментов.

Как уже было отмечено, база данных включает в себя набор таблиц базы данных SQL и локальных хранилищ (папок). Таблица *dt_defended_points* содержит набор характеристик защищаемых пунктов, таблица *dt_points* — набор характеристик всех мареографов с их координатами, таблица *dt_sources* — набор характеристик модельных цунамигенных землетрясений с описаниями и ссылками на рассчитанные массивы соответствующих значений смещений свободной поверхности океана. Наборы параметров

вычислительных расчетных алгоритмов (параметров расчетов) содержатся в таблице *dt_calc_params*. Конструирование и наполнение последней таблицы не завершены, она будет дополняться полями. Таблица *dt_mareos* содержит список ссылок на рассчитанные мареограммы, таблица *dt_maxmin_val* — на характеристики проявления волн цунами в защищаемых пунктах. Ее содержание обновляется после каждого серийного расчета.

5. Структура папок проекта

Здесь и далее *проектом* будем называть совокупность расчетов с фиксированной расчетной областью, фиксированными наборами защищаемых пунктов и модельных цунамигенных землетрясений, фиксированной математической моделью и вычислительными алгоритмами, фиксированными наборами параметров всех алгоритмов.

Корневая папка проекта состоит из набора вложенных папок, содержащих данные. Папка **Bathymetry** содержит батиметрию расчетной области: файл *Bathymetry.grd* в бинарном варианте формата *.grd* системы Surfer (см. <http://www.goldensoftware.com>). В папке **Data_Base** находятся базы данных проекта: файл основной базы данных *main_db.mdb* (поддерживающей язык запросов SQL и создание нескольких таблиц, в настоящей версии это MS Access) содержит данные о параметрах расчета, расчетах и т. п.

Папка **Import** предназначена для переноса результатов вычислений, полученных с помощью консольной утилиты *serial_calc*, в базу данных *main_db.mdb*. Перед таким переносом эту папку необходимо наполнить следующими файлами и папками: **Input**, в которой содержатся файлы *mareographs.txt* и *sources.txt*, взятые из папки утилиты *serial_calc*, и **Calculation** для размещения файлов *xxx_MareogramsAddCalcul.dat*.

Папка **Export** предназначена для экспорта данных из *main_db.mdb* в форматы других программ. В ней создаются подпапки с именем в виде текущей даты.

Папка **Maxmin_Defended_Points** содержит распределения максимумов и минимумов для каждого защищаемого пункта, а папка **Maxmin_Sources** — распределения максимумов и минимумов для каждого модельного землетрясения.

Папка **Modules** содержит файлы модулей проекта. В ней, например, будут находиться модули для серийного расчета. Папка **Sources** содержит возмущения свободной поверхности океана, рассчитанные для модельных цунамигенных землетрясений, в ней находятся файлы в бинарном варианте формата *.grd*: *xxx_z.grd* — массив локальных возмущений в прямоугольных координатах и *xxx_etta.grd* — массив возмущений во всей области в сферических координатах (здесь *xxx* — кодовое название источника).

Папка **Mareograms** является хранилищем рассчитанных мареограмм и содержит файлы *xxx_mareograms.dat*. В папке **Addition_Calculations** находятся дополнительные расчетные характеристики. Пока это файлы *xxx_MareogramsAddCalcul.dat*, содержащие максимумы, минимумы и “размахи” колебания в защищаемом пункте.

6. Примеры представления результатов

На рис. 10 и 11 приведена последовательность рабочих экранов, возникающих на различных этапах “пользовательского” режима работы.

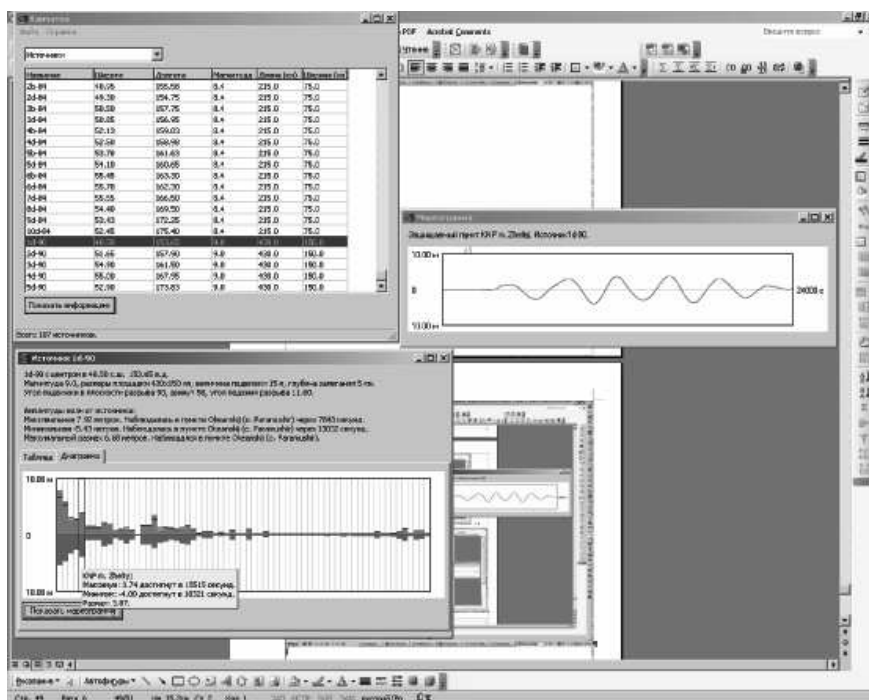


Рис. 10. Окно доступа к информации о проявлении цунами, порожденного конкретным модельным цунамигенным землетрясением в защищаемом пункте: справа — соответствующая мареограмма, внизу — распределение характеристик проявления волн, порожденных конкретным модельным землетрясением во всех защищаемых пунктах, в контекстном окне — информация о числовых значениях “от конкретного землетрясения в конкретном пункте”

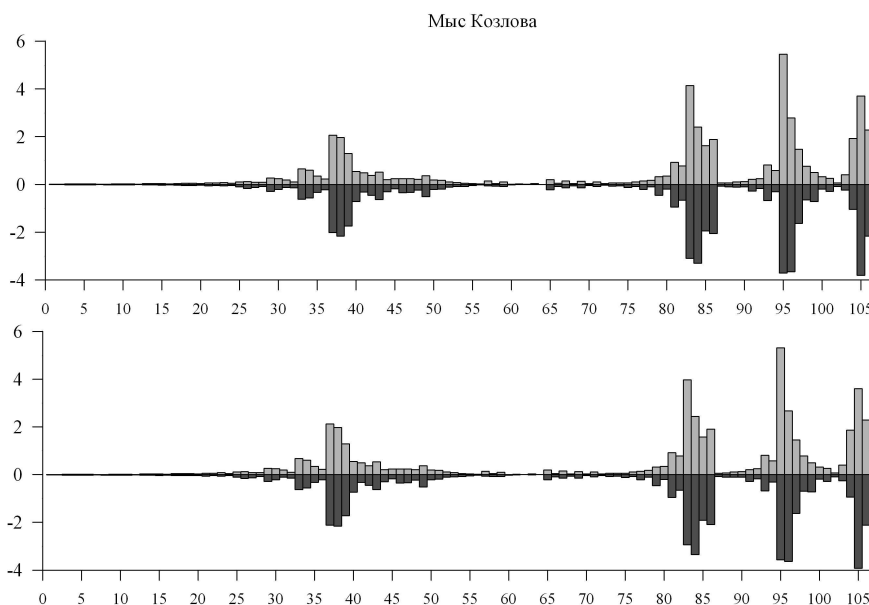


Рис. 11. Пример распределения характеристик проявлений волн цунами в защищаемом пункте “Мыс Козлова” (по землетрясениям): верхняя диаграмма соответствует расчетам, выполненным по линейным уравнениям мелкой воды, нижняя — нелинейным; по вертикальной оси отложена высота волны (м), по горизонтальной — условный номер модельного очага землетрясения.

Заключение

Суть разработанной и реализованной авторами технологии состоит в реализации ряда последовательных шагов. На предварительном этапе составляется и анализируется список защищаемых пунктов, исследуются доступные исторические сведения о землетрясениях и цунами, проявившихся вблизи защищаемых пунктов. Затем с использованием собранной информации определяются параметры “критических” очагов землетрясений, способных вызвать появление катастрофических волн на защищаемом побережье; выбирается геофизическая модель такого очага и рассчитываются начальные поля смещений поверхности океана, которые на заключительном этапе используются в ходе вычислительных экспериментов для построения мареограмм в каждом из защищаемых пунктов и в его окрестности.

С использованием предложенной технологии создана база данных “Цунамирайонирование Камчатки”, предназначенная для хранения, просмотра и экспорта в текстовом формате информации о проявлениях цунами, вызванных набором модельных цунамигенных землетрясений, в расчетных мареографах, привязанных к набору защищаемых пунктов. Эта база данных является фрагментом информационно-вычислительной системы и обеспечивает работу в “пользовательском” режиме, который предполагает фиксацию набора защищаемых пунктов, модельных землетрясений, расчетной области и вычислительного алгоритма. Проектируемая версия информационно-вычислительной поддержки “исследовательского” режима будет обеспечивать возможности варьирования компонентов системы.

Для получения оценок динамического воздействия волн цунами, выполняемых национальной системой предупреждения о цунами, будут использованы дополнительные алгоритмы аппроксимации данных, основанные на методах и приемах искусственного интеллекта. Предполагается сопряжение такого синтетического каталога с каталогом исторических сведений, а также с информацией, поступающей в оперативном режиме от датчиков системы гидрофизического мониторинга поверхности океана.

Список литературы

- [1] ITDB/WLD — Integrated Tsunami Database for the World Ocean, Version 5.16 of July 31, 2007. — 2007(CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMMG SB RAS, Novosibirsk).
- [2] JOHNSON J.M., SATAKE K. Asperity distribution of the 1952 Great Kamchatka earthquake and its relation to the future earthquake potential in Kamchatka // Pure and Applied Geophysics. 1999. Vol. 154. P. 541–553.
- [3] Подъяпольский Г.С. Генерация длинных волн в океане сейсмическим источником в пределах земной коры // Физика земли. 1999. Т. 1. С. 1123–1135.
- [4] Гусяков В.К. Взаимосвязь волн цунами с параметрами источника при подводных землетрясениях // Математические проблемы геофизики: Сб. науч. тр. / Вычисл. центр. Сиб. отд-ние АН СССР. 1974. Вып. 5, ч. 1. С. 118–140.
- [5] YAMASHITA T., SATO R. Generation of tsunami by a fault model // J. Phys. Earth. 1974. Vol. 22, N 4. P. 415–440.
- [6] WARD S. Relationships of tsunami generation and an earthquake source // J. Phys. Earth. 1980. Vol. 28, N 5. P. 441–474.

- [7] COMER R.P. Tsunami generation: a comparison of traditional and normal mode approaches // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1984. V. 77, N 4. P. 415–440.
- [8] АКИ К. Earthquake mechanism // Tectonophysics. 1972. Vol. 13, N 1–4. P. 423–446.
- [9] ГУСЯКОВ В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений. Вычисл. центр. Сиб. отд-ние АН СССР. Новосибирск, 1978. С. 23–51.
- [10] OKADA Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in the half-space // Bull. Seis. Soc. Am. 1985. Vol. 75. P. 1135–1154.
- [11] ГУСЕВ А.А. Схематическая карта размещения источников больших землетрясений Камчатки в индустриальную эпоху // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2005.
- [12] ЕЛЕЦКИЙ С.В. Программная система моделирования волн цунами NEREUS, опыт разработки: предназначение и реализация // Сб. матер. I (XIX) Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 60-летию ИМГГ ДВО РАН / Отв. ред. О.Н. Лихачева. Южно-Сахалинск, 2007. С. 230–236.
- [13] ФЕДОТОВА З.И. О применении разностной схемы Мак-Кормака для задач длинноволновой гидродинамики // Вычисл. технологии. 2006. Т. 11, ч. 2. Спец. вып. С. 53–63.

Поступила в редакцию 14 марта 2008 г.