

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ НА ПВС

Михаил Александрович Курако, аспирант, ассистент каф. ПМКБ ИКИТ СФУ

Тел.: 8 923 3306352, e-mail: mkurako@gmail.com

Алена Олеговна Диденко, аспирант каф. ПМКБ ИКИТ СФУ

Тел.: 8 923 2856712, e-mail: alena_didenko@list.ru

Сибирский федеральный университет

http://ikit.sfu-kras.ru

Константин Васильевич Симонов, д.т.н., в.н.с. ИВМ СО РАН

Тел.: 8 391 2432756, e-mail: simonovkv@icm.krasn.ru

Институт вычислительного моделирования СО РАН

http://icm.krasn.ru

В работе предлагаются подходы для анализа данных гео- и гидрофизического мониторинга с целью оперативной оценки опасности цунами. В ходе исследований разработаны вычислительные методики оценки параметров сильных землетрясений и восстановления формы источника по мареограммам на ближайших DART станциях. Осуществлена программная реализация параллельной версии вычислительного комплекса для различных типов ПВС.

Ключевые слова: наводнения цунами, цунамигенные землетрясения, очаг цунами, мониторинг цунами, мареограммы, вейвлет-анализ, параллельные алгоритмы анализа данных наблюдения, оценка опасности цунами.

Введение

Сильные цунамигенные землетрясения и возникающие в результате этих подводных землетрясений катастрофические цунами последних лет показали необходимость в разработке новых эффективных алгоритмов и методик оценки опасности морских катастроф сейсмической природы [1, 2]. В настоящее время даже при наличии достаточного количества времени для моделирования цунами и расчёта ожидаемых высот цунами на защищаемом побережье получаемые оценки степени опасности далеки от реальных.



М.А. Курако

Кроме этого, при формировании цунами недалеко от защищаемого побережья (например, Тохоку, Япония, 11 марта 2011 года) время реагирования и принятия решения очень ограничено, вследствие чего требуются быстрые параллельные алгоритмы и методы вычислений для оценки основных параметров волны цунами. Неоднозначность и неполнота в исходных данных гео- и гидрофизического мониторинга цунами приводят к необходимости расчёта нескольких сценариев развития катастрофического наводнения цунами [3].

Исследование посвящено разработке элементов системы поддержки моделирования и анализа данных гео- и гидрофизического мониторинга катастроф сейсмической природы с целью оперативной и адекватной оценки степени опасности цунами для конкретного защищаемого пункта на побережье [4-7].

В ходе исследований разработаны вычислительные методики оперативной оценки параметров сильных цунамигенных землетрясений, методики восстановления размеров очага цунами по данным о сейсмических проявлениях подводных землетрясений (форшоки и афтершоки), а также восстановления формы по



А.О. Диденко

мареограммам регистрации цунами на ближайших *DART* станциях гидрофизической системы наблюдений цунами в Тихом океане.

Осуществлена программная реализация параллельной версии разрабатываемого вычислительного комплекса и элементов информационной поддержки моделирования и оценки опасности цунами для различных типов параллельных вычислительных систем.

1. Элементы информационной системы

Целью информационной системы поддержки моделирования и оценки опасности цунами является генерация в кратчайший срок после разрушительного цунамигенного землетрясения в автоматическом или полуавтоматическом режиме рекомендаций для экстренных служб предупреждения об опасности цунами.



К.В. Симонов

В основу разрабатываемого вычислительного комплекса (ВК) входит *решение прямых, обратных и оптимизационных задач* гео- и гидрофизического мониторинга цунами в акватории Тихого океана на базе программного комплекса *MOST*:

1. решение обратной задачи – уточнение формы и размера очага цунами;

2. решение прямой задачи – моделирование распространения цунами на параллельных вычислительных архитектурах;

3. задача оптимизации расположения системы датчиков гидрофизической системы мониторинга цунами.

Расчётными элементами вычислительного комплекса являются:

- на основе данных геомониторинга цунамигенных областей – обнаружение и выделение зон повышенной сейсмической активности в изучаемых морских акваториях, а также построение прогностических признаков цунамигенности ожидаемого подводного землетрясения;

- оценка параметров регистрируемого сильного цунамигенного землетрясения на основе регрессионного моделирования данных геомониторинга;

- оценка размеров и параметров очага цунами путём выбора наилучшего приближения из предварительно рассчитанной базы данных о модельных источниках цунами;

- вычисление положения и расстояния до ближайших к выделенной сейсмоактивной цунамигенной области *DART* станций гидрофизического мониторинга цунами;

- обработка мареограмм с записями цунами с ближайших от очага цунами *DART* станций;

- на основе технологии вычислительного эксперимента построение передаточных функций вдоль трассы распространения волн цунами;

- обработка и анализ расчётных мареограмм цунами;

- оперативная оценка опасности цунами для заданного пункта береговой зоны от изучаемого сильного цунамигенного землетрясения;

- зонирование защищаемой береговой зоны в критериях «риск–ущерб».

Для решения поставленных задач в рамках разрабатываемой информационной системы предлагается следующие сценарии действий.

Сценарий 1 (мониторинг опасного явления):

- вычислительный комплекс, являющийся ядром разрабатываемой системы осуществляет сбор и анализ геодинамической информации о подводных землетрясениях в исследуемом регионе и выделяет местоположение наиболее вероятных областей сейсмической активности (*сейсмическая подсистема мониторинга*);

- для выделенных областей анализируется поступающая геодинамическая информация и выполняется оценка характерных параметров (формы и амплитуды) возможного очага цунами от вероятного очага подводного землетрясения;

- построенный вероятный очаг-источник цунами передаётся для численного моделирования распространения волн цунами в соответствующей акватории, при этом анализируются вре-

мя прихода волн и их высоты для различных участков защищаемого побережья (*гидрофизическая подсистема*).

Сценарий 2 (моделирование цунами):

- в случае возникновения сильного цунами (реализация цунамигенного землетрясения) из базы данных выбираются предвычисленные результаты моделирования цунами с наиболее подходящими параметрами источника цунами;

- при появлении первых данных от гидрофизических станций с наблюдениями о реальном цунами, промежуточные результаты вычислений распространения цунами (либо предвычисленные результаты) сравниваются с данными регистрируемых волн цунами и в случае расхождений оценки по данному сценарию пересчитываются;

- данные о характеристиках волн цунами, полученные от глубоководных станций, используются для уточнения параметров источника цунами, скорректированный источник цунами моделируется снова.

Сценарий 3 (оценка риска и вероятного ущерба для защищаемого побережья):

- на основе данных геодинамического мониторинга выполняется построение предварительных карт-схем времени добегания волны цунами от источника до указанного побережья;

- на основе данных глубоководных гидрофизических станций выполняется оценка параметров вероятной волны цунами для заданного пункта наблюдений в береговой зоне;

- на основе данных регистрации цунами в ближней зоне для защищаемой акватории выполняются уточнение параметров волны цунами, а также оценки границ вероятной зоны затопления изучаемого побережья, при этом осуществляется подготовка информации для объявления тревоги о степени опасности цунами.

Гибкость разрабатываемого ВК позволяет в дальнейшем расширять число сценариев и отдельных этапов работы по каждому сценарию. Для оперативной оценки параметров регистрируемого цунамигенного землетрясения и оценки опасности цунами разработан набор алгоритмов, включающий в себя алгоритмы по сбору и предобработке исходных данных геомониторинга, построение «энергетических» клиньев и аппроксимационных функций. Алгоритмы сбора и предобработки исходных данных геомониторинга предназначены для сбора данных из нескольких источников-служб наблюдений, таких как *USGS (ГС США), ГС ДВО РАН, ГС РАН*. Основная задача состоит в заполнении пробелов и согласовании данных путём указания различных временных интервалов, в течение которых записи о конкретном событии считаются эквивалентными.

После предобработки данных на следующем этапе результирующее множество точек наблюдений разбивается на подмножества на основе магнитудного критерия. Для каждого из подмножеств вычисляется выпуклая линейная оболочка, на точках которой строятся интерполяционные полиномы Лагранжа, узлами служат корни многочленов Чебышева первого рода. Также используется способ построения аппроксимационных функций для упорядоченных данных геомониторинга ожидаемого цунамигенного землетрясения на основе нейросетевого моделирования данных наблюдений.

2. Анализ записей мареограмм цунами

Для анализа данных гидрофизического мониторинга цунами применяется аппарат вейвлет-функций, позволяющий проводить глубокий анализ закономерностей в данных и оценивать параметры формы волны в источнике-очаге цунами. Применение различных типов материнских вейвлетов делает возможным эффективную визуализацию выявленных закономерностей и итерационное построение функции источника цунами.

В работе представлен метод быстрого построения вейвлет-диаграммы сигнала, полученного в рамках гидрофизического мониторинга морских катастроф сейсмической природы. Вычислительная технология построения вейвлет-диаграмм по данным гидрофизического мониторинга исследуемого процесса состоит из следующих этапов:

1. Получение и предобработка начальных данных (данные гидрофизического мониторинга), задание функции аналитически или набором значений, преобразование исходных данных в формат, пригодный для обработки.

2. Выбор начальных параметров, выбор функции материнского вейвлета, задание параметров вейвлет-преобразования (интервал масштабов и границы обрабатываемого отрезка функции).

3. Выполнение предвычислений, построение матрицы базисных вейвлетов, перереорганизация начальных данных.

4. Выполнение вейвлет-преобразования.

5. Визуализация результата расчётов.

Большой объем вычислительной работы, необходимой для построения пакета вейвлет-диаграмм с различными параметрами и по разным источникам данных приводит к необходимости создания параллельных алгоритмов обработки данных на всех указанных выше этапах. Авторами разработан набор алгоритмов по параллельной обработке на этапах предвычисления расчётных матриц и выполнении вейвлет-преобразования, также разработан программный модуль по визуализации результатов построения вейвлет-диаграмм.

В качестве примеров приведены расчёты вейвлет-диаграмм с использованием алгоритма быстрого вейвлет-преобразования для обработки мареграмм с записями цунами (рис. 1-4). Алгоритм реализован в виде отдельного вычислительного модуля. Визуализация данных, обработанных вычислительным модулем на языке C++, осуществляется в среде *Mathcad*.

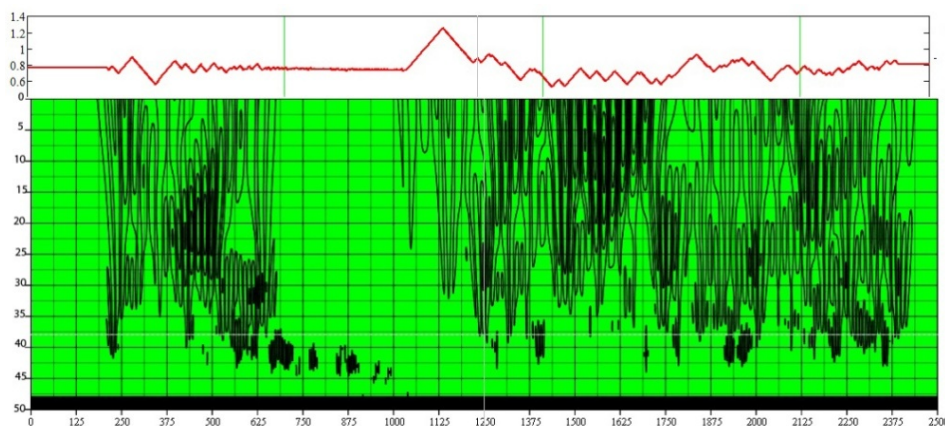


Рис. 1. Мареограмма цунами (вейвлет *Морле*)

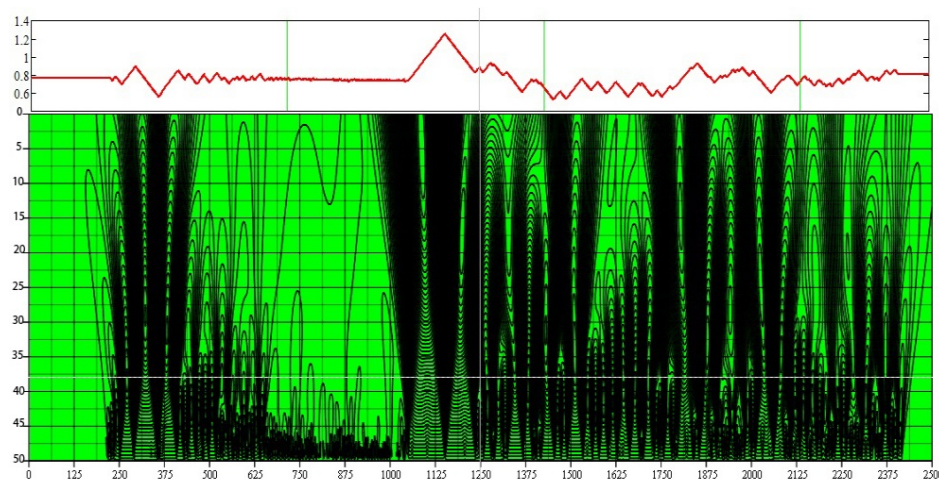


Рис. 2. Мареограмма цунами (вейвлет *Wave*)

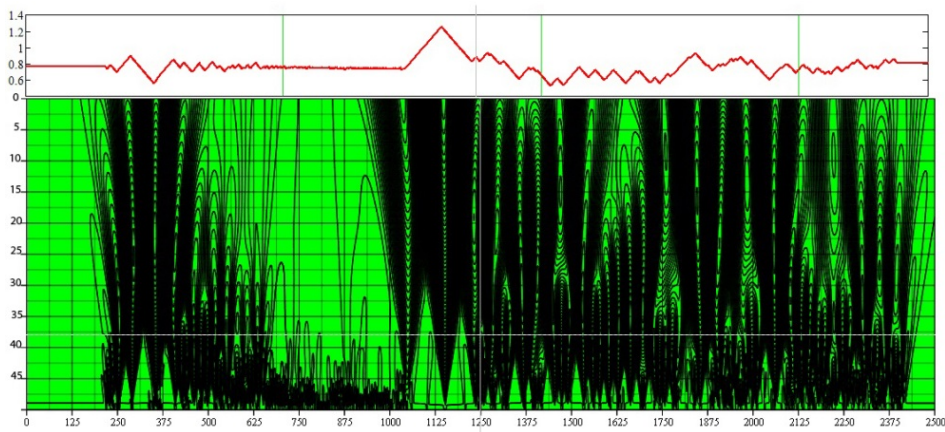


Рис. 3. Мареограмма цунами (вейвлет МНАТ)

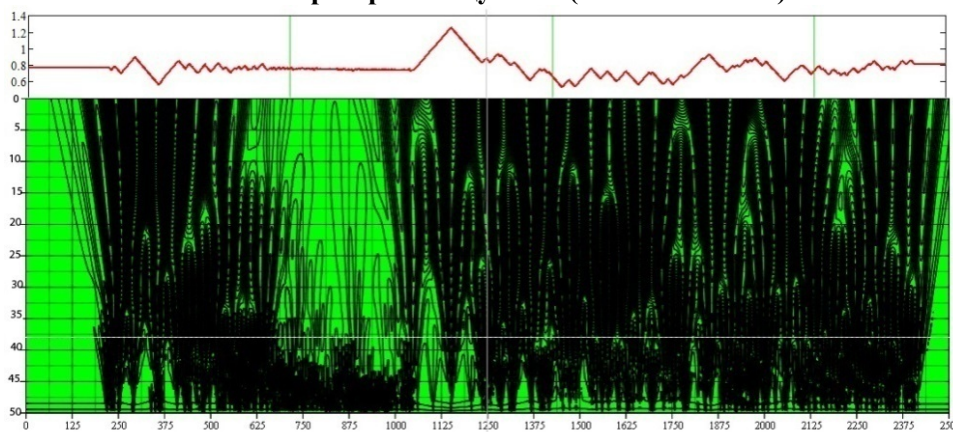


Рис. 4. Мареограмма цунами (полиномиальный вейвлет)

3. Параллельные алгоритмы моделирования и анализа данных гидрофизического мониторинга

Прямая задача гидрофизического мониторинга – распространение волн цунами в реальной акватории, решается методом расщепления по направлениям с использованием программного комплекса *MOST* (*Methods of splitting tsunamis*). Объединение вычислительной методики решения обратной задачи совместно с методикой решения прямой задачи позволяет производить моделирование на GPU.

Моделирование изучаемого явления состоит из двух этапов. На первом этапе происходит восстановление формы очага цунами путём решения обратной задачи, основываясь на данных ближайших *DART* станций. На втором этапе восстановленный очаг передаётся на вход процедуре численного моделирования распространения волн цунами на основе программного комплекса *MOST*.

В цикле работ С.Ю. Доброхотова и др. предложены новые эффективные асимптотические формулы решения линеаризованной системы уравнений мелкой воды над неровным дном. Решения локализованы в окрестности фронтов, на которых с течением времени вследствие переменности коэффициентов появляются фокальные точки и точки самопересечения. Полученные формулы для асимптотических решений задачи Коши с локализованными начальными данными волнового уравнения с переменной скоростью для линеаризованной системы уравнений мелкой воды позволяют восстанавливать форму очага цунами при решении обратной задачи. В соавторстве в данном исследовании разработаны элементы вычислительной методики восстановления формы очага-источника цунами по мареограммам зарегистрированных цунами на ближайших *DART* станциях.

Пакет программ *MOST* использует модель расчёта распространения волны цунами над глубоководной акваторией при помощи метода расщепления по пространственным переменным. Для численного расчёта распространения волны цунами используется не-

линейная система дифференциальных уравнений мелкой воды. Модель мелкой воды хорошо описывает процесс распространения волн цунами в открытом океане при условии, что горизонтальные размеры подвижки океанического дна, генерирующие эту волну, значительно превосходят глубину океана.

Алгоритм численного решения системы строится на основе метода расщепления по пространственным направлениям. Для этого рассматриваются две вспомогательные системы, каждая из которых зависит только от одной пространственной переменной. В дальнейшем для численного решения системы достаточно построить устойчивые разностные схемы.

Расчёт движения волны происходит в два этапа: на первом этапе производится вычисление смещения волны вдоль оси X , на втором – вдоль оси Y . При этом расчёт вдоль разных строк данных по оси X можно производить независимо, аналогичная ситуация и для расчёта вдоль оси Y . В численных экспериментах моделирования цунами размерность расчётного поля для акватории Тихого океана составляла 2581×2879 узлов координатной сетки.

Программная реализация параллельной версии. Для реализации расчётов использованы многоядерные вычислительные системы (*SMP*) и графические процессоры (*GPU*). При переносе вычислительных алгоритмов на *SMP* системы использована технология *OpenMP*, применяемая для распараллеливания внешних расчётных циклов. Такими циклами в программном комплексе *MOST* являются циклы расчётов смещения волны вдоль осей. Разработанный программный модуль интегрируется в исходные коды программы *MOST* путём замены вычислительной части.

Результаты модельных расчётов показали, что данный подход целесообразно применять для систем с количеством процессоров не более шести. Хорошая масштабируемость достигается для систем с числом вычислительных ядер до 4-х, после чего происходит падение производительности при использовании 8 и более вычислительных ядер. Это связано с тем, что итерации цикла выполняются очень быстро и ядрам требуется часто обращаться к общей области памяти, что приводит к частому вытеснению данных из кэша и необходимости производить синхронизацию кэшей, на что и тратится основное время.

Благодаря высокой степени параллелизма, заложенного в данном алгоритме (вычисления инвариантов и параметров волны вдоль осей могут производиться независимо для каждой строки/столбца данных), возможна его эффективная реализация для графических процессоров. Адаптация кода для *GPU* выполнена путем последовательного переноса участков кода на *GPU*. Все пространство моделирования разбито на равные блоки размером 16×16 . Как в дальнейшем показало профилирование и вычислительные эксперименты, именно такая конфигурация является оптимальной для загрузки потоковых мультипроцессоров *GPU*.

Наиболее сложной в плане реализации оказалась функция расчёта высоты волны. Внутри нее требовалось проводить большое количество проверок на граничные условия (наличие берегов, материков и островов) и вести интенсивное чтение данных из памяти. Для упрощения этой функции заранее выполнен расчёт некоторых условий, что позволило исключить вложенные проверки. Кроме того, все необходимые для расчёта данные перенесены в разделяемую память. В результате модификации кода поверхность океана перестала самопроизвольно раскачиваться.

Для выявления направлений дальнейшей оптимизации использовался профилировщик *CUDA*. Анализ показал, что несмотря на простой вид функций, вычисляющих инварианты вдоль осей, большую часть времени занимает непоследовательное (некогерентное) чтение и запись данных. Для того, чтобы получить последовательное чтение, произведена замена функции выделения памяти на их аналоги, производящие выделение выровненных участков памяти. В результате количество непоследовательных об-

ращений к памяти сократилось до нуля и время обработки одной итерации уменьшилось на порядок.

Для программ на *CPU* работа с памятью происходит эффективно, если данные в памяти расположены рядом друг с другом и легко помещаются в кэш или *CPU* может определить шаблон доступа к памяти, опять же заранее подгружая данные в кэш. В случае *GPU* для помещения данных в кэш можно использовать текстуры. При этом в кэш текстуры помещаются те данные, которые локализованы в двухмерном пространстве относительно данных, к которым идёт обращение. Данная оптимизация привела к использованию текстурной памяти и небольшой модификации вычислительных ядер. Выигрыш от такой оптимизации составил в среднем 10 % на каждую итерацию.

Таким образом, реализация программного комплекса *MOST* на параллельных архитектурах позволяет значительно увеличить производительность вычислений, уменьшая время вычислений с нескольких часов до нескольких минут. При этом применяемые оптимизации позволяют увеличить производительность *OpenMP* версии комплекса на порядок, а версии для графических процессоров – на 2 порядка.

В настоящее время на основе представленной выше модели и соответствующего алгоритмического обеспечения тестируется вычислительная технология решения прямых и обратных задач гидрофизического мониторинга (в том числе и на гибридных вычислительных системах) на примере распространения длинных гравитационных волн типа цунами от источников сейсмической природы до ближайших станций *DART*

в акватории Тихого океана, используются наблюдения о цунами за последние годы.

4. Алгоритмы распределения вычислительных задач

Рассмотрим алгоритмы распределения вычислительных задач. Данные геомониторинга хранятся в базе данных, где каждая таблица базы данных представляет собой каталог землетрясений для одной выделенной области. Каталог содержит записи о дате, времени, координатах и магнитуде землетрясения.

Основной задачей процессора-мастера является распределение вычислительной нагрузки между имеющимися вычислителями. В процессе работы вычислительного комплекса могут появляться новые данные, поэтому процессор-мастер отвечает за получение новых данных, определение очага, к которому относятся данные и

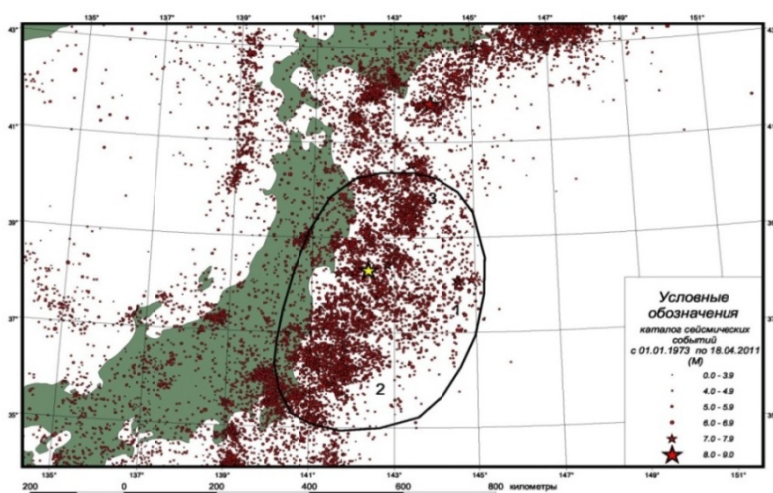


Рис. 5. Каталог землетрясений

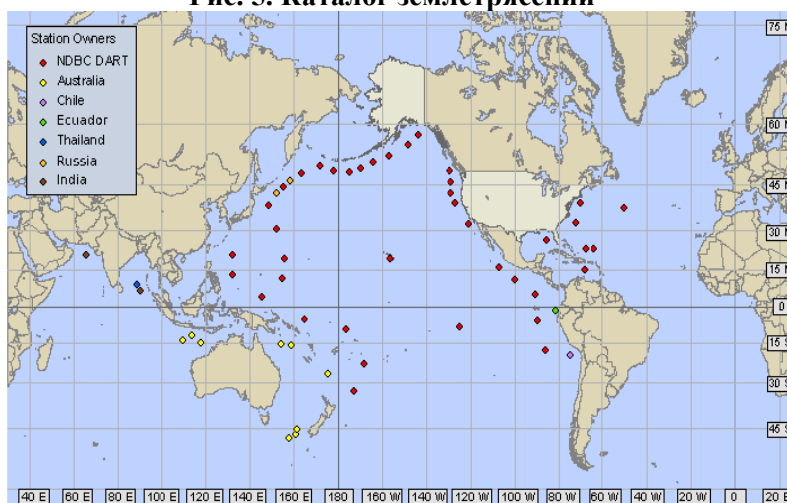


Рис. 6. Схема расположения *DART* станций

добавление их в соответствующую таблицу или же в случае отсутствия данного очага в базе данных создание новой таблицы для этого очага, а также за корректность и непротиворечивость с предыдущими данными.

Распределение работ состоит в определении количества очагов и объёмов данных для обработки. В зависимости от объёма вычислений могут применяться различные стратегии распределения нагрузки. В общем случае для расчётов каждого очага выделяется отдельный исполнитель (вычислительное ядро). После распределения работ каждый вычислитель обрабатывает свои данные и записывает их обратно в базу данных, что позволяет в дальнейшем на любом шаге работы системы просмотреть и отобразить результаты моделирования по каждому событию. На рис. 5 приведён пример каталога по землетрясению в Японии (11 марта 2011 года).

Процессор-мастер будет работать в синхронном режиме и через определённые промежутки времени опрашивает источник данных (сайт) на предмет возникновения новых данных для обработки. В случае поступления новых данных происходит обновление базы данных, в противном случае процессор-мастер засыпает на определённый промежуток времени до следующей проверки. При обработке данных гидрофизического мониторинга используются данные *DART*-станций, карта-план расположения

DART-станций в Тихом океане приведена на рис. 6. Общая схема работа процессора-мастера приведена на рис. 7.

Программная реализация подсистемы, реализующей описанные алгоритмы распределения вычислительной нагрузки, предназначена для симметричных *SMP* систем с общей памятью, в том числе для многоядерных процессоров. Исходный код программы написан на языке *C++* с использованием библиотеки потоков *pthread*. Результатом является многопоточный вычислительный модуль, в котором один поток является мастером и выполняет функции по диспетчеризации и следит за обновлением данных, а остальные потоки, количество которых определяется из объёмов данных, выполняют необходимые вычисления над данными из базы данных. Применение этой версии программного обеспечения на ноутбуке с двухъядерным процессором Intel Core 2 Duo T7300 2.0GHz (2 ядра) позволяет повысить производительность вычислений на 70-80% в сравнении с однопоточным вариантом.

Оценка опасности морских наводнений сейсмической природы и районирование-зонирование приморской территории по степени опасности цунами актуально практически для всей береговой линии мирового океана, включая те её участки, которые не имеют в непосредственной близости от себя подводных сейсмоактивных зон. Это обусловлено способностью волн типа цунами распространяться на большие расстояния, а также возможностью образования катастрофических волн при подводных оползнях и обвалах, которые могут возникать на любых участках акватории океана, имеющих даже незначительные уклоны дна и подчас вне всякой связи с сейсмичностью.

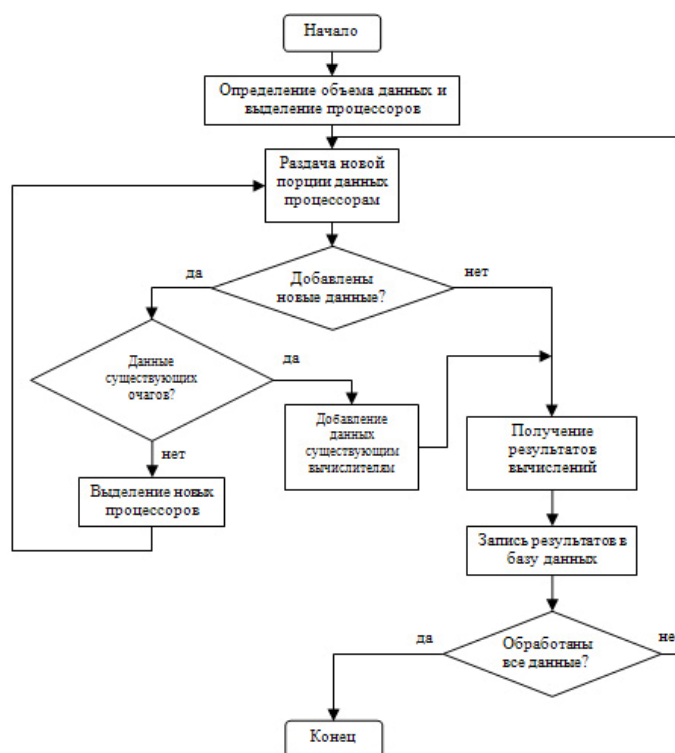


Рис. 7. Схема работы подсистемы сбора и анализа данных геомониторинга опасных процессов

5. Оценка опасности цунами и зонирование защищаемого побережья

Рассмотрим наиболее общую модель оценки риска наводнения цунами, поскольку понятие риска лежит в основе прикладной задачи зонирования прибрежной территории по степени опасности. Полагаем, что при выборе участка береговой территории для строительства гидротехнического объекта естественно рассматривать риск наводнения цунами для проектируемого объекта как один из критериев оптимизации:

$$R(x) = P_x(H) \cdot P_x(U/H) \rightarrow \min_x,$$

где x – условный порядковый номер участка береговой территории, $P_x(H)$ – вероятность опасности наводнений цунами для зоны x , $P_x(U/H)$ – вероятность ущерба при реализации опасности для проектируемого объекта расположенного в зоне x .

Анализ риска наводнений цунами, таким образом, начинается с оценки вероятности возникновения указанных природных опасностей и определения ущерба. Оценка ущерба от наводнений цунами производится на основе полной стоимости объектов, оказавшихся в зоне поражения, и степени их уязвимости. Под уязвимостью понимается свойство объектов полностью или частично утрачивать способность к выполнению своих функций в результате воздействия опасного природного процесса.

Уязвимость (или состояние повреждения) объекта оценивается по отношению затрат, необходимых для восстановления его прежних функций к полной стоимости объекта, и зависит от качества постройки, инженерно-геологических условий размещения объекта и интенсивности природного воздействия. Величину уязвимости находят исходя из практического опыта – анализа разрушений от имевших место природных катаклизмов или с помощью компьютерного моделирования. В работе предлагается методика оценки состояния повреждения объекта на основе теории нечётких множеств.

Различают две категории ущерба от наводнений: прямой и косвенный. Величину прямого ущерба получают умножением уязвимости на стоимость элементов риска в момент воздействия:

$$U_j = \sum_{i=1}^{n_j} v_i K_i,$$

где U_j – величина общего ущерба от событий (наводнений) j -го класса, n_j – количество элементов (объектов), подвергшихся воздействию, v_i – уязвимость i -го элемента по отношению к природной опасности j -го класса, K_i – стоимость i -го элемента.

Косвенные потери определяются главным образом нарушением экономической деятельности в связи с прекращением энергоснабжения, работы транспорта, водоснабжения, поставки продуктов питания и т.д. В отличие от оценки прямого ущерба расчёт косвенного ущерба более сложная задача и в ряде случаев он может превышать прямой. Снижение уровня риска наводнений цунами можно добиться путём мониторинга опасности наводнений и оценки уязвимости в материальной сфере.

Отметим, что приведённая модель риска наводнений цунами не может быть единственным критерием, который надо учитывать при решении задачи зонирования территории по степени опасности. Оценка риска может стать лишь одним (хотя возможно основным) критерием, который учитывается при зонировании. Для выбора оптимального местоположения объекта, в каждом конкретном случае, необходимо выделение дополнительных критериев.

Предлагается подход – вычислительная технология для зонирования береговой территории по степени опасности от наводнений цунами на основе выделения по критериям «риск-стоимость» отдельных участков побережья, что позволит повысить уровень её защищённости. Зонирование и моделирование данных для оптимального районирования защищаемой территории по степени опасности цунами в критериях «риск-стоимость» выполняется на основе оптимизации границ по множеству Парето.

В качестве основного элемента вычислительной технологии предлагается методика оценки состояния гидротехнического объекта, подверженного воздействию наводнений различной природы с использованием теории нечётких множеств. Предложенную методику можно рассматривать как элемент экспертных систем зонирования прибрежных территорий, предназначенный для оценки ожидаемого ущерба от наводнения цунами, и, следовательно, риска. Результатом является количественная оценка общего повреждения гидротехнического объекта. Методика может составить основу систем принятия решения в службах контроля опасных природных процессов. Получаемые оценки состояния гидротехнического объекта можно использовать для моделирования риска цунами с целью решения задачи зонирования прибрежной территории.

Рассмотрим основные понятия, используемые в решении задачи зонирования-районирования побережья:

зонирование, районирование – оценка риска наводнения цунами и его картирование на определённой территории.

риск – вероятность потерь от воздействия наводнений цунами за определённый промежуток времени в соответствии с расчётной опасностью и уязвимостью объектов (число жертв, материальные потери, экологический ущерб).

опасность – вероятность превышения (или не превышения) определённой высоты волны h метров в данном пункте побережья в течение интервала времени T лет.

уязвимость – отношение ожидаемых затрат по восстановлению объекта, подверженного воздействию цунами к его полной стоимости (измеряется числовым коэффициентом от 0.0 до 1.0).

Расчётная формула для оценки риска наводнений цунами представляется в виде:

$$R = H * V * S,$$

где R – риск, H – опасность, V – уязвимость, S – стоимость восстановления повреждённых объектов. В соответствии с этой формулой риск становится нулевым в случае равенства нулю любого из множителей, т.е. опасности (отсутствия волн типа цунами), уязвимости (например, все сооружения обеспечены специальной инженерной защитой), или отсутствия строений и вообще материальных ценностей на побережье.

Получение количественных оценок опасности наводнений подразделяется на два этапа. Сначала на основе натурного материала о рядах заплесков волн типа цунами в нескольких базовых пунктах строится региональная функция повторяемости. Функция повторяемости $\varphi(h)$ высот волн равна по определению средней частоте событий с высотой волны в данном месте, равной или превышающей заданное пороговое значение h , то есть

$$\varphi(h) = \frac{N(\text{высота_цунами} \geq h)}{T}.$$

Эта функция является монотонно убывающей и при $h > 0.5$ метра хорошо аппроксимируется экспонентой:

$$\varphi(h) = f \cdot e^{-\frac{h}{H^*}},$$

где f имеет физический смысл частоты сильных наводнений и является региональным, медленно изменяющимся от одной до другой точки побережья, поскольку все сильные наводнения проявляются во всех пунктах региона; H^* – так называемая характеристическая высота волны, имеющая размерность длины. Она характерна для каждого конкретного пункта побережья, и имеет сильную вдольбереговую изменчивость.

Второй этап – численное моделирование волн типа цунами с наиболее значительными проявлениями, которые, согласно натурному материалу определяют опасность наводнений в регионе. При хорошей сопоставимости натуральных и численных высот волн в базовых пунктах (как правило, коэффициенты корреляции принимают значения

вблизи 0.9), результаты численного моделирования можно распространить на весь регион и использовать их для построения функций повторяемости в каждом пункте численной модели при известной из натуральных данных частоте сильных наводнений f в регионе.

Для карт зонирования-районирования побережья полезно наряду с H^* , или вместо неё использовать уровень h_{100} , который высота волны превышает в среднем 1 раз в столетие:

$$h_{100} = H * \ln(100 \cdot f) .$$

Данная характеристика связана с серьезным риском, поскольку этот уровень будет превзойдён цунами примерно в 63% столетних периодов. Можно исходить из допустимого уровня опасности R для данного периода t , и по нему оценивать соответствующий «безопасный» уровень. Прогнозы по оценке риска подтверждаются данными наблюдений и расчётов высот цунами на Курилах для реальных событий (землетрясение и цунами 11 марта 2011 в районе Хонсю). Для этого региона произведены расчёты величин h_{100} и $H_{100; 0,1}$ для допустимого риска $R=0,1$.

Рассмотрим следующую задачу зонирования побережья от катастрофических наводнений в критериях «риск-стоимость». Пусть на определённой территории заданы две точки: начальное и конечное положение границы безопасности, требуется найти в некотором смысле оптимальный маршрут из начального положения в конечное. При этом изучаемая территория неоднородна, т.е. различные её подобласти различаются по рельефу, типу экосистем и другим параметрам.

Пусть множество полученных пикселей (основа разбиения изучаемой территории) можно представить в виде графа, в котором вершины соответствуют пикселям, а дуги соединяют соседние пиксели. В каждой вершине графа задан вектор параметров. Следовательно, предлагается заменить исходную задачу задачей дискретной оптимизации на графе. При этом искомому маршруту будет соответствовать оптимальный путь в графе. Для простоты вектор параметров сводится к двум характеристикам пикселя – стоимости проведения маршрута через данный пиксель и стоимостной оценке риска связанного с данным пикселем. Любой путь в графе может быть охарактеризован двумя величинами: стоимостью границы зонирования, определяемой как сумма стоимостей всех вершин входящих в путь, и риском, определяемым как сумма стоимостных оценок рисков всех составляющих границу зонирования вершин.

Рассмотрим два пути в графе – p и q . Пусть стоимость маршрута p равна $s1$ а стоимость маршрута q – $s2$, риск маршрута p равен $r1$ а риск маршрута q – $r2$. Будем говорить, что маршрут p доминирует маршрут q , если выполняются следующие условия:

$$s1 \leq s2 \text{ и } r1 \leq r2 \text{ причём } s1 \neq s2 \text{ или } r1 \neq r2$$

т.е. маршрут p доминирует маршрут q , если он лучше по одному из параметров и не хуже по другому параметру.

В реальной ситуации существование единственного оптимального маршрута (границы) – самого дешёвого и одновременно самого безопасного крайне маловероятно. Вместо этого будет существовать множество недоминируемых маршрутов – так называемое множество Парето. Маршрут принадлежит множеству Парето, если не существует маршрута его доминирующего. Предлагаемая методика зонирования береговой территории по степени опасности ориентирована на работу с квалифицированным специалистом-экспертом и должна включать в себя:

– структурирование береговой зоны (разделения береговой зоны на отдельные элементарные ячейки – пиксели), предполагается, что процедура выделения пикселя будет производиться с участием эксперта (экспертов) и при этом предоставляется возможность реализации различных вариантов структурирования береговой зоны и выделения пикселей различных масштабов в зависимости от стоящих перед экспертами задач, наличной экологических и технической информации;

– заполнение баз данных по отдельным пикселям, используя это эксперт сможет занести в базу всю необходимую ему информацию и определить, какая дополнительная информация необходима для того, чтобы продолжать анализ с помощью предлагаемой экспертной системы, и для каждого такого пикселя в специальную встроенную базу данных заносятся данные, характеризующие этот пиксель, которые могут включать в себя характеристики геологических условий, ландшафтные характеристики, показатели, характеризующие растительные и животные сообщества, оценки состояния атмосферы и гидросферы, оценку существующего состояния территории и геологической среды, характеристики промышленного и сельскохозяйственного использования территории, общую характеристику уже существующей техногенной нагрузки на окружающую среду района расположения проектируемого объекта и другие необходимые для анализа характеристики;

– описание технологического воздействия проектируемого объекта на окружающую среду, которая включает в себя базу данных (по каждому пикселю), куда будут заноситься характеристики воздействия техногенного объекта в ходе его строительства и функционирования в штатном режиме на природные системы – лесные, почвы, поверхностные воды, животный и растительный мир, эти воздействия могут заключаться в вырубке просек в лесу при строительстве дорог, выравнивании почвы, строительстве мостов, в специальную базу при этом заносится стоимость конкретных технологических воздействий в зависимости от того, на какие объекты природной среды это воздействие направлено.

– определение сценариев чрезвычайных ситуаций (ЧС) для экологических и технических объектов по отдельным пикселям. Список сценариев ЧС может включать в себя все характерные для данных условий ЧС. Так как рассматривается прибрежная территория, то основную опасность представляют морские наводнения сейсмической природы. Но в базу данных могут быть также внесены и другие природные риски: пожары, землетрясения, ураганы и т.п.

– выделение оптимальных пикселей для строительства объектов по различным целевым показателям – стоимости инженерных работ, экологической безопасности, мультипликативной экономической эффективности и т.д.

В итоге, для решения многокритериальной задачи используется процедура выделения Парето–оптимальных решений и метод обобщённого критерия. При этом эксперт может работать в рамках итеративной процедуры, включающей в себя оптимизацию с использованием различных методов и разных целевых функций с тем, чтобы сравнить участки побережья, оптимальные по различным критериям.

Последовательные этапы работы в соответствии с предложенной вычислительной технологии включают:

- этап структурирования зоны исследований и выделения пикселей;
- этап наполнения модели данными натурных обследований;
- этап определения сценариев техногенных воздействий анализируемого объекта в ходе его строительства и дальнейшего функционирования;
- этап определения сценариев ЧС и вероятностей их возникновения;
- этап анализа альтернативных вариантов и выбора оптимального (оптимальных) по заданным критериям пикселя (участка) для строительства объекта.

Эксперт также может использовать последовательную процедуру скейлинга (разбиения территории на пиксели все меньшей и меньшей площади), проводить анализ рисков и определение оптимальных пикселей на каждом масштабе и оценивать устойчивость решений на разных пространственных масштабах. Таким образом, предложенная методика для зонирования береговой территории по степени опасности позволяет выделять по нескольким критериям оптимальные участки побережья для строительства гидротехнического объекта и, следовательно, позволяет повысить уровень защищённости исследуемой территории.

В качестве *модельного примера* рассмотрим вариант зонирования береговой территории по степени опасности. Пусть имеется некоторая исследуемая береговая территория. Необходимо выделить оптимальные зоны для расположения (строительства) некоторых гидротехнических объектов, например объектов рыбного промысла.

Традиционный подход заключается в сопоставлении каждой точке территории некоторого набора измеримых либо экспертно оценённых параметров. Далее будем называть этот набор вектором параметров. Однако возможность определения вектора параметров в каждой точке исследуемой области затруднительно. Во-первых, произвести измерения (оценку) в каждой точке физически затруднительно, во-вторых, задание многих параметров в точке лишено смысла – так, если высота над уровнем моря принципиально может характеризовать каждую точку территории, то, например, тип экосистемы характеризует некоторую окрестность точки.

Изложенные соображения позволяют перейти от решения поставленной непрерывной задачи к решению дискретной задачи. Дискретизация задачи производится следующим образом – исследуемая область разбивается на одинаковые пиксели, каждому из которых сопоставляется определённое значение вектора параметров. В случае, если распределение некоторого параметра внутри пикселя известно, то пикселю сопоставляется среднее по площади значение параметра, если же параметр определяется экспертно, то он определяется для всего пикселя сразу. Геометрия пикселей может влиять на точность решения, но принципиальной роли не играет. В данном случае используются квадратные пиксели, соседи пикселя – его окрестность фон Неймана.

Задачу выбора оптимального местоположения некоторого технического объекта можно заменить расчётом множества Парето и выбором экспертом одного или нескольких элементов множества, число пикселей конечно, следовательно, и множество Парето конечно. В этом случае элементы множества Парето можно выделить, используя простой перебор и сравнение решений по определению. В случае, когда пиксель можно охарактеризовать двумя параметрами, данная задача может быть решена графически. После расчёта множества Парето эксперт выделяет те пиксели, которые оптимальны для использования, например пиксели, значения параметров которых попадают в некоторый определённый экспертом интервал.

Для расчёта множества Парето разработана программа на языке C++, осуществляющая перебор и сравнение всех возможных решений. В результате выполнения алгоритма происходит не более n^n сравнений решений, где n – число пикселей. Данные организованы в виде списка. Если при сравнении получается доминируемое решение, то оно удаляется из списка и в дальнейшем в сравнении не участвует, что приводит к сокращению числа операций.

На рис. 8 представлены значения параметров для каждого пикселя – в первой строке: номер пикселя (для наглядности выделен светло-серым цветом) и оценка риска наводнения, вторая строка – стоимость. Для выделения оптимальных пикселей минимизируется риск и стоимость. С помощью программы выделены решения, являющиеся Парето оптимальными (на рисунке представлены темно серым цветом). Итак, в качестве практического предложения, на рис. 8 пиксель с номером 3 пригоден, например, для строительства цехов по переработке рыбы, где используется более дорогое холодильное оборудование (здесь возможна заморозка и складирование). Пиксели с номерами 1, 2, 13 характеризуются высокой степенью безопасности, поэтому они пригодны, например, для

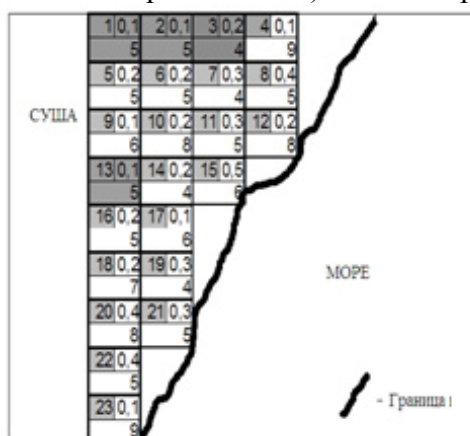


Рис. 8. Карта модели защищаемой береговой зоны

строительства крупных цехов с использованием автоматизированных линий изготовления продукции.

Таким образом, ядром разработанной методики зонирования прибрежной терри-

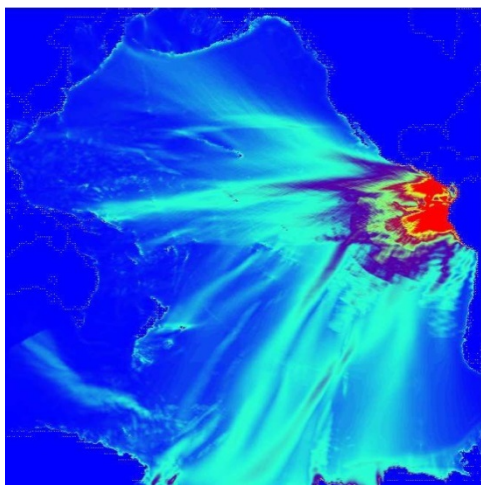


Рис. 9. Карта-схема максимальных высот волн цунами (очаг цунами в районе Коста-Рика, 05.09.12)

тории по степени опасности наводнений является расчёт множества Парето.

В работе рассмотрены модели оценки риска наводнений сейсмической природы (типа цунами) и предложена вычислительная технология для зонирования береговой территории по степени опасности от наводнений на основе выделения по критериям «риск-стоимость» отдельных участков побережья. Зонирование и моделирование данных для оптимального районирования защищаемой территории по степени опасности в критериях «риск-стоимость» выполняется на основе оптимизации границ по множеству Парето.

Разработанную вычислительную технологию оценки опасности цунами (на рис. 9 представлена карта-схема максимальных высот цунами, которая служит основой для оценки

опасности цунами) можно рассматривать как элемент экспертной системы, предназначенной для оценки ожидаемого ущерба от наводнения различной природы и оценки риска ЧС природно-техногенного характера.

Заключение

Авторы считают, что в представленной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- разработанные алгоритмы анализа данных геомониторинга сильных подводных землетрясений для построения прогностических признаков и оценки параметров ожидаемого цунамигенного землетрясения;
- разработанный алгоритм быстрого вейвлет-преобразования пространственно-временных данных гидрофизического мониторинга цунами, что позволяет эффективно решать актуальные задачи обработки данных наблюдений и оценки опасности цунами;
- разработанная методика решения обратной задачи восстановления источника цунами по данным гидрофизических *DART* станций и решения прямой задачи распространения волн цунами в акватории Тихого океана на основе технологии *MOST*.

Таким образом, в ходе работы вычислительного комплекса анализируется информация о подводном цунамигенном землетрясении в исследуемом регионе и выявляется местоположение наиболее вероятных источников цунами, оцениваются параметры возможного источника-очага цунами и осуществляется поиск оптимального набора гидрофизических станций. Затем анализируется информация о регистрации волны цунами на указанных станциях и выполняется моделирование распространения волн цунами в рамках выделенной локальной системы станций. Важный этап – процедура построения распределения энергии волнового процесса для прогнозирования опасности цунами конкретных областей исследуемой акватории. Получаемые при решении задач гео- и гидрофизического мониторинга карты-схемы распределения максимальной энергии волны цунами, являющиеся результатом расчётов распространения цунами, с хорошей точностью и заблаговременностью решают задачу оценки опасности цунами и зонирования берега для выделенных очаговых зон цунамигенных землетрясений и источников-очагов цунами.

На основе разработанной вычислительной методики выполнены численные эксперименты по моделированию распространения волн цунами в акватории Тихого океана последних цунамигенных землетрясений и цунами за период 2012-2013 гг. (очаги цунами в районе Коста-Рики (05.09.2012), Канады (28.10.2012) и Японии (07.12.2012)).

Литература

1. *Pelinovski E.N.* Hydrodynamics of Tsunami Waves.–Nizhnii Novgorod, 1996.
2. *Titov V.V.* Numerical modeling of tsunami propagation by using variable grid. Proceedings of the IUGG/IOC International Tsunami Symposium,–Novosibirsk:Computing center Siberian Division USSR Academy of Sciences, 1989.P. 46-51.
3. *Gica E.* Development of the forecast propagation database for NOAA's short-term inundation forecast for tsunamis (SIFT) / E.Gica, M.C. Spillane, V.V. Titov at el. – NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-139, PMEL, Seattle, WA, 2008. – 95p.
4. *Курако М.А., Симонов К.В., Диденко А.О.* Информационная поддержка системы мониторинга цунами на параллельных вычислительных архитектурах // Информатизация и связь:матер. IV междун. научно-техническая конфер. 2013. № 2. С. 77-79.
5. *Доброхотов С.Ю., Симонов К.В., Курако М.А., Ложников Д.А.* Решение задач гидрофизического мониторинга на основе асимптотических формул // Международная конференция, посвящённой 105-летию со дня рождения С.Л. Соболева «Дифференциальные уравнения. Функциональные пространства. Теория приближений(Новосибирск, 18-24 августа 2013г.): тез.докладов.–Новосибирск: Ин-т математики СО РАН, 2013. С. 129.
6. *Доброхотов С.Ю., Симонов К.В., Курако М.А., Ложников Д.А.* Вычислительная технология решения задач гидрофизического мониторинга // III Всероссийская конференция«Математическое моделирование и вычислительно-информационные технологии в междисциплинарных научных исследованиях»(Иркутск (Россия), 23-26 июня 2013г.):тезисы докладов. – Иркутск: РИО ИДСТУ СО РАН, 2013. С. 23.
7. *Марчук Ан.Г., Курако М.А., Симонов К.В., Диденко А.О.* Информационная система поддержки решения задач гео- и гидрофизического мониторинга // Всероссийская конференция «Индустриальные информационные системыИИС-2013» (г. Новосибирск, 25-27 сентября 2013 г.):сборник тезисов докладов. – Новосибирск: КТИ ВТ СО РАН, С. 42-43.

Elements of information support system for tsunami modelling and tsunami hazard assessment on parallel computing systems

Mikhail Alexandrovich Kurako, graduate student, assistant of Department of Applied Mathematics and Computer Security of the Siberian Federal University.

Alena Olegovna Didenko, graduate student of Department of Applied Mathematics and Computer Security of the Siberian Federal University.

Konstantin Vasil'evich Simonov, leader researcher of Institute of Computational modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

This paper proposes an approach for the analysis of data of geo- and hydrophysical monitoring for operational tsunami hazard assessment. Computational methods for estimating the parameters of earthquakes and recovering the form of tsunami source by mareogramms at the nearest DART stations were developed. Parallel version of the computational system for different types of parallel computing systems was implemented.

Keywords: tsunami inundation, tsunamigenic earthquakes, tsunami center, tsunami monitoring, mareogramms, wavelet analysis, parallel algorithms for observation data analysis, tsunami hazard assessment.

УДК 634.0.43

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКИХ РЕШАЮЩИХ ФУНКЦИЙ

Ирина Александровна Милькова, аспирант,

Тел.: 8 913 5833008, e-mail: i.milkova@yandex.ru

Андрей Александрович Бурцев, аспирант

Тел.: 8 913 5094043, e-mail: burtsevandreya@mail.ru

Институт космических и информационных технологий СФУ

http://ikit.sfu-kras.ru