

DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-2

**УСКОРЕНИЕ РАСЧЕТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ ЦУНАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
FPGA****М. М. Лаврентьев^{1,2}, К. Ф. Лысаков^{1,2}, Ан. Г. Марчук^{2,3}, К. К. Облаухов²**¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация³ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,

г. Новосибирск, Российская Федерация

lavrentiev@iae.nsk.su

Аннотация: в данной статье рассматривается решение задачи быстрой численной оценки высоты волн цунами от гипотетического очага вдоль тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и Курильских островов. Мы фокусируемся на очень быстром (практически в режиме поступления данных) численном моделировании распространения волны цунами на основе ПК в соответствии с классическим приближением теории мелкой воды. Существенный прирост производительности достигается за счет использования преимуществ современных компьютерных архитектур, а именно вентильных матриц, программируемых пользователем (Field Programmable Gate Array — FPGA). Разностная схема Мак-Кормака второго порядка аппроксимации для решения системы дифференциальных уравнений мелкой воды [1] реализована на чипе FPGA в составе платы, специально разработанной авторами для решения этой задачи [2, 3].

Численные тесты показывают, что для расчета 3600 шагов по времени распространения волны цунами в расчетной области размером приблизительно 2000x2000 км (3120x2400 расчетных узлов) требуется всего несколько секунд для моделирования цунами от модельного источника волны цунами на сетке с пространственным шагом около 900 м. Созданный на базе FPGA специализированный вычислитель был также протестирован по точности сравнением с аналитическими решениями, полученными Ан. Марчуком [4, 5] для некоторых модельных топографий дна.

Ключевые слова: моделирование цунами, компьютерные архитектуры, обработка данных в режиме поступления.

Для цитирования: Лаврентьев М. М., Лысаков К. Ф., Марчук Ан. Г., Облаухов К. К. Ускорение расчетов распространения волны цунами с использованием FPGA. *Успехи кибернетики*. 2021;2(1):14–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-2.

FPGA FAST SIMULATION OF TSUNAMI WAVE PROPAGATION**M. M. Lavrentiev^{1,2}, K. F. Lysakov^{1,2}, An. G. Marchuk^{2,3}, K. K. Oblaukhov²**¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation² Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,

Novosibirsk, Russian Federation

³ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

lavrentiev@iae.nsk.su

Abstract: the study offers a fast quantitative estimation of tsunami wave heights coming from a hypothetical source along the Pacific coast of the Kamchatka Peninsula and the Kuril Islands. We focus on a very fast (virtually real-time) PC simulation of tsunami wave propagation using the classical approximation of the shallow water theory. Significant performance gains are achieved by taking advantage of modern computer architectures, namely Field Programmable Gate Arrays (FPGAs). The McCormack difference scheme of the second order of approximation for solving the system of shallow water differential equations [1] is implemented with an FPGA chip on a custom PCB designed by the authors [2, 3].

Numerical tests indicate that it takes only a few seconds to simulate a tsunami wave from a simulated source on a 900 m spacing grid to analyze 3,600 time increments of propagation of the tsunami wave propagation in about 2000x2000 km area (3,120x2,400 nodes.) The customized FPGA computer was

also tested for accuracy by comparing with the analytical solutions obtained by Marchuk [4, 5] for some reference bottom topographies.

Keywords: tsunami simulation, computer architectures, real-time data processing.

Cite this article: Lavrentiev M. M., Lysakov K. F., Marchuk An. G., Oblaukhov K. K. FPGA Fast Simulation of Tsunami Wave Propagation. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(1):14–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-2.

Введение

События сейсмического характера, вызвавшие катастрофические затопления берега вследствие возникновения волны цунами (число которых за последние десятилетия возросло), сильно влияют на население таких прибрежных районов. В данной статье представлены результаты численного моделирования с целью нахождения распределения высот волн цунами с использованием реальной батиметрии вокруг полуострова Камчатка и Курильских островов. Характеристики источника, используемого для численных экспериментов, близки к параметрам источника катастрофического цунами 11 марта 2011 года у побережья Японии (Великое восточно-японское землетрясение). Наша цель — сократить время, необходимое для численного моделирования распространения волны цунами, используя предлагаемое аппаратно-программное решение, основанное на вентильных матрицах, программируемых пользователем (FPGA). Сопроцессор на основе FPGA в виде печатной платы, называемой Calculator, может работать в составе современного ПК.

Как хорошо известно, глубоководные регистраторы уровня океана серии DART — Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis [6] или любая другая система датчиков давления, такая как система DONET (Dense Oceanfloor Network для землетрясений и цунами [7]), обеспечивают измерения проходящей над датчиком волны цунами в режиме реального времени с одновременной передачей данных. Таким образом, измеренный волновой профиль доступен в реальном времени (даже когда волна проходит над датчиком) по каналам спутниковой сети. Имея эти измеренные данные, сначала необходимо по зарегистрированной форме волны определить форму начального смещения водной поверхности в зоне очага цунами. Для этого существуют разные подходы, см., например, [8, 9].

Одним из перспективных методов восстановления источника является подход, основанный на применении «ортогонального разложения», см. [10]. Соответствующий алгоритм работает очень быстро, давая начальное смещение поверхности воды в очаге за несколько секунд с помощью обычного ПК.

Быстрая оценка распределения высот волн цунами по всей исследуемой прибрежной линии была бы действительно полезна для местных властей, чтобы своевременно принять решение о необходимых мерах безопасности, избежать жертв и уменьшить экономические потери. Расчет распространения волны в заданной акватории в настоящее время можно реализовать с помощью одного из общепризнанных численных методов, базирующихся на численном решении линейных или нелинейных дифференциальных уравнений мелкой воды. В частности, центры предупреждения цунами Национальной администрации атмосферы и океана США (NOAA USA) используют так называемый программный пакет MOST (Method Of Splitting Tsunamis), который моделирует все фазы цунами: генерацию, распространение и затопление сухого берега, см. [1]. Здесь рассматривается работа модуля программного обеспечения MOST, отвечающего только за расчет распространения волны. Как известно из теории и практики разностных методов, результатам численных расчетов задач для эволюционных дифференциальных уравнений в частных производных можно доверять только в том случае, если временной шаг находится в определенной зависимости от длины шага пространственной сетки. Поэтому расчет с достаточно детальной расчетной пространственной сеткой может потребовать слишком много времени даже при использовании мощного компьютера или суперкомпьютера. Так, одним из возможных способов сокращения времени численного моделирования распространения волны от источника до береговой линии являются алгоритмы с применением вложенных сеток [11]. Второй способ — аппаратное ускорение расчетов за счет использования современных компьютерных архитектур, таких как графический процессор (GPU) или микрочип FPGA.

В настоящее время основной способ повышения производительности расчетов состоит в параллельной реализации заданных алгоритмов обработки данных. Такие параллельные вычисления требуют соответствующих аппаратных средств, а именно многоядерных кластеров ЦП (довольно дорогих в суперкомпьютерных блоках), гибридных систем на базе GPU или специальных процессоров на основе

микрочипа FPGA. Авторами с использованием особенностей архитектуры микрочипа FPGA достигнуто ускорение численного решения системы уравнений мелкой воды. Показанная производительность на обычном ПК с предлагаемым калькулятором на базе FPGA почти в 250 раз выше по сравнению с распространением реальной волны (за 6 сек процессорного времени моделируется 1600 сек распространения цунами в области из 10^7 расчетных узлов).

Статья имеет следующую структуру. Представлен вариант системы дифференциальных уравнений мелкой воды, используемой для численного расчета по разностной схеме типа Мак-Кормака [12]. Далее приводится сравнение численного решения с точным аналитическим решением для модельной батиметрии. В следующем разделе кратко описывается структура предлагаемого спецвычислителя – аппаратного устройства для ускорения выполнения кода. Затем представлены результаты ряда вычислительных экспериментов, выполненных на реальной цифровой батиметрии с шагом 0.5 углового градуса (порядка 900 м). В расчетах используется начальное смещение водной поверхности, аналогичное по размерам очагу цунами 11.03.2011 у восточного побережья Японии. В заключение полученные численные результаты кратко обсуждаются.

Математическая постановка задачи

В упомянутом программном пакете MOST (как и во многих других инструментах по исследованию цунами) используется следующая эквивалентная форма системы уравнений мелкой воды (которая в данном случае не учитывает такие внешние силы, как трение морского дна, сила Кориолиса и другие) [1]:

$$\begin{aligned} H_t + (uH)_x + (vH)_y &= 0, \\ u_t + uu_x + vu_y + gH_x &= gD_x, \\ v_t + uv_x + vv_y + gH_y &= gD_y, \end{aligned} \quad (1)$$

где $H(x, y, t) = \eta(x, y, t) + D(x, y, t)$ – полная толщина водного слоя, $\eta(x, y, t)$ – вертикальное смещение водной поверхности относительно невозмущенного состояния (высота волны), $D(x, y)$ – глубина (значение которой, как предполагается, известно во всех узлах расчетной сетки), u и v – компоненты вектора скорости водного потока, g – ускорение силы тяжести.

Для численного решения системы уравнений (1) использовалась так называемая схема Мак-Кормака [12]. Алгоритм Мак-Кормака является явной разностной схемой, использующей трехточечный шаблон типа «крест». Предполагается, что область моделирования является фиксированным прямоугольником (в соответствии с географическими координатами), не зависящим от времени:

$$\Omega(x, y) = \{(x, y) : X_1 \leq x \leq X_2, Y_1 \leq y \leq Y_2, X_i, Y_j - \text{const}\}.$$

В этой области рассматривается равномерная сетка с прямоугольными ячейками:

$$\bar{\Omega}(x, y) = \{(x_i, y_j) : X_1 \leq x_i \leq X_2, Y_1 \leq y_j \leq Y_2, 0 \leq i \leq N_x, 0 \leq j \leq N_y\},$$

где $\Delta x = x_{i+1} - x_i$, $\Delta y = y_{j+1} - y_j$ – шаги сетки относительно переменных x и y соответственно. Рассмотрим множество шагов по времени для распространения волны:

$\bar{\gamma} = \{(t^n) : 0 \leq n \leq N_t\}$. Таким образом, $\tau^n = t^{n+1} - t^n$ – временные шаги. Для простоты в данном случае мы используем равномерный шаг $\tau^n = \tau$, в то время как в случае необходимости не составляет проблемы использование переменных временных шагов. Мы будем использовать стандартные обозначения для переменных сетки Φ в узле (i, j) : $\Phi_{ij}^n = \Phi(x_i, y_j, t^n)$.

Уравнения мелкой воды (1) в узлах сетки на n -м временном шаге будут аппроксимированы с помощью явной двухступенчатой конечно-разностной схемы Мак-Кормака со вторым порядком аппроксимации (типа «предиктор-корректор»):

1-й шаг:

$$\begin{aligned} \frac{\widehat{H}_{ij}^{n+1} - H_{ij}^n}{\tau} + \frac{H_{ij}^n u_{ij}^n - H_{i-1j}^n u_{i-1j}^n}{\Delta x} + \frac{H_{ij}^n v_{ij}^n - H_{ij-1}^n v_{ij-1}^n}{\Delta y} &= 0, \\ \frac{\widehat{u}_{ij}^{n+1} - u_{ij}^n}{\tau} + u_{ij}^n \frac{u_{ij}^n - u_{i-1j}^n}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{u_{ij}^n - u_{ij-1}^n}{\Delta y} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{i-1j}^n}{\Delta x} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\widehat{v}_{ij}^{n+1} - v_{ij}^n}{\tau} + u_{ij}^n \frac{v_{ij}^n - v_{i-1j}^n}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{v_{ij}^n - v_{ij-1}^n}{\Delta y} + g \frac{\eta_{ij}^n - \eta_{ij-1}^n}{\Delta y} = 0.$$

2-й шаг:

$$\begin{aligned} & \frac{H_{ij}^{n+1} - \left(\widehat{H}_{ij}^{n+1} + H_{ij}^n \right) / 2}{\tau/2} + \frac{\widehat{H}_{i+1j}^{n+1} \widehat{u}_{i+1j}^{n+1} - \widehat{H}_{ij}^{n+1} \widehat{u}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\widehat{H}_{ij+1}^{n+1} \widehat{v}_{ij+1}^{n+1} - \widehat{H}_{ij}^{n+1} \widehat{v}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = 0, \\ & \frac{u_{ij}^{n+1} - \left(\widehat{u}_{ij}^{n+1} + u_{ij}^n \right) / 2}{\tau/2} + u_{ij}^n \frac{\widehat{u}_{i+1j}^{n+1} - \widehat{u}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{\widehat{u}_{ij+1}^{n+1} - \widehat{u}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} + g \frac{\widehat{\eta}_{i+1j}^{n+1} - \widehat{\eta}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = 0, \\ & \frac{v_{ij}^{n+1} - \left(\widehat{v}_{ij}^{n+1} + v_{ij}^n \right) / 2}{\tau/2} + u_{ij}^n \frac{\widehat{v}_{i+1j}^{n+1} - \widehat{v}_{ij}^{n+1}}{\Delta x} + v_{ij}^n \frac{\widehat{v}_{ij+1}^{n+1} - \widehat{v}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} + g \frac{\widehat{\eta}_{ij+1}^{n+1} - \widehat{\eta}_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Обычно имитация реальной волны цунами выполняется в сферической или геодезической системе координат (λ, ϕ) , где λ — долгота, а ϕ — широта в географических градусах. Соответственно, для вычисления пространственных шагов Δx и Δy используются следующие соотношения:

$$\Delta x_{ij} = \frac{\pi(\lambda_{i+1} - \lambda_i)}{180^\circ} R_E \cos(\varphi_j), \quad (4)$$

$$\Delta y_{ij} = \frac{\pi(\varphi_{i+1} - \varphi_i)}{180^\circ} R_E, \quad (5)$$

где R_E обозначает радиус Земли. Эта схема выглядит аналогично методу расщепления (относительно пространственных переменных), который используется в программном пакете MOST. Действительно, для вычисления значений искомых функций в узле сетки $(i, j, n+1)$ значения параметров течения в трех точках предыдущего временного шага (i, j, n) , $(i-1, j, n)$, $(i, j-1, n)$ используются на первом полушаге в разностной схеме (2), а значения в точках (i, j, n) , $(i+1, j, n)$, $(i, j+1, n)$ — на втором. Сравнение известных аналитических решений с численно полученными показывает, что предлагаемая реализация трехточечного вычислительного шаблона (схема Мак-Кормака) представляется предпочтительной по сравнению с той, что реализуется в программном пакете MOST [2, 3].

Спецвычислитель на базе FPGA

Современные микросхемы FPGA обеспечивают возможность параллельной реализации сотен тысяч одновременных вычислительных потоков; их внутренняя память достигает десятков мегабайт. FPGA являются конфигурируемыми процессорами, т.е. одно и то же аппаратное устройство может служить специальным процессором для различных задач, в зависимости от конкретного запрограммированного алгоритма. Эта платформа позволяет настроить вычислительную архитектуру наиболее подходящим образом для реализуемых алгоритмов. Кроме того, микрочипы FPGA могут быть переконфигурированы неограниченное количество раз для решения различных задач или изменения алгоритма обработки данных.

По разностной схеме (2), (3) в каждой точке сетки необходимо вычислить значения трех сеточных переменных: H_{ij}^{n+1} , u_{ij}^{n+1} и v_{ij}^{n+1} . Для реализации алгоритма FPGA была предложена архитектура потокового процессора. Он состоит из процессорных элементов (ПЭ). Каждый ПЭ выполняет вычисления всех параметров для одного временного шага и одной точки сетки в конвейерном режиме. Данные обрабатываются в поточном режиме, представляющем собой последовательный обход узлов сетки. Для расчета в каждом узле (i, j) требуются значения в соседних 4 узлах. Архитектура FPGA позволяет использовать быструю внутреннюю память (BRAM) для реализации такого трафаретного буфера.

Поток входных данных представляет собой последовательный построчный обход всех точек сетки. Предлагаемая архитектура ПЭ позволяет либо обрабатывать несколько точек одновременно, либо соединять последовательно несколько ПЭ для реализации нескольких итераций в виде одного конвейера. Это дает возможность оптимизировать набор ПЭ в соответствии с особенностями данной

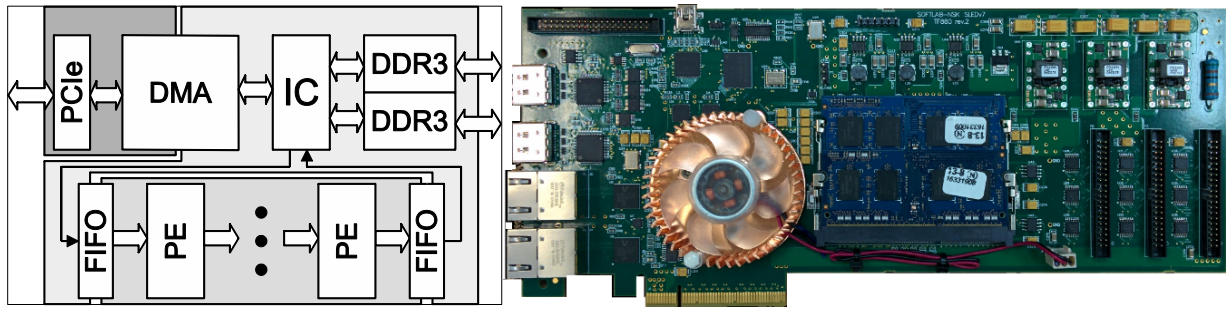


Рис. 1. Операционная схема и внешний вид FPGA-платы Xilinx Virtex-7 VC709

аппаратной платформы. Математические операции в (2), (3) разностной схемы Мак-Кормака реализуются в виде конвейера вычислений, с выполнением обработки 1 узла за один процессорный такт.

Блок-схема калькулятора, используемого при численных расчетах распространения цунами, и его внешний вид представлены на рис. 1. Помимо элементов обработки (ПЭ), которые выполняют вычисления в параллельном режиме, калькулятор имеет контроллеры памяти DDR3, PCIe-контроллер и модуль DMA, ответственный за прямой доступ к памяти хост-компьютера. Калькулятор принимает входные данные из памяти через память FIFO (First In, First Out), что позволяет перенять частоту отдельных вычислительных модулей, настраивающих ее на конкретный микрочип FPGA, а также внешние характеристики памяти и интерфейса. Калькулятор может содержать несколько ПЭ, в зависимости от характеристик конкретной используемой FPGA-платы. Блок-схема калькулятора, основанная на микрочипе FPGA Xilinx Virtex-7 VC709, приводится в [2, 3].

Приведем некоторые пояснения о конвейере вычислений, реализованном в этом калькуляторе на основе FPGA. Последняя версия содержит 16 процессорных элементов. Последовательность задач устроена следующим образом. Первая пара ПЭ работает над расчетом параметров цунами, соответствующих временному слою $n+1$. Оба ПЭ используют значения массива значений глубины цифровой батиметрии и волновые параметры на предыдущем временном слое только вдоль 3 строк массива узлов расчетной области, которых достаточно для получения значений ($i = 1, \dots, N_x$) вдоль одной строки (например, с индексом j) прямоугольного массива узлов сетки. Первый ПЭ получает значения на промежуточном временном слое $n+1/2$, которые используются вторым ПЭ для почти одновременного вычисления волновых параметров для временного слоя $n+1$. Затем эта пара ПЭ учитывает волновые параметры $H_{ij}^n, u_{ij}^n, v_{ij}^n (i=1, \dots, N_x), (i = 1, \dots, N_x)$ и глубину вдоль следующей линии $j+2$ вычислительной области, где должны быть вычислены значения для временного слоя $n+1$ вдоль линии сетки $j+1$. Таким образом, поочередно первая пара ПЭ вычисляет и посылает в DMA параметры волны на $(n+1)$ -м шаге по времени. Когда эти параметры цунами уже получены (с помощью первой пары ПЭ) для первых 3 линий (строк) сетки области, то вторая пара ПЭ начинает вычисление параметров волн для временного слоя $n+2$. После того, как обработка первых 3-х строк завершена второй парой ПЭ, третья пара начинает работать на временном слое $n+3$ и так далее. После завершения временного уровня $n+1$ первой парой ПЭ он начинает обработку переменных сетки для временного уровня $n+9$ (при наличии 16 ПЭ на FPGA-плате). Этот цикл вычислительного конвейера продолжается до достижения заданного лимита шагов по времени. Спецвычислитель на базе FPGA одновременно работает над волновыми параметрами в 8 временных слоях с задержкой 3 линий сетки каждый.

Тестирование численного метода

Сравнение известных аналитических решений с численно полученными показывает, что предлагаемая реализация трехточечного вычислительного шаблона (схема Мак-Кормака) представляется предпочтительной по сравнению с той, что реализуется в программном пакете MOST [2, 3]. Действительно, точность реализации схемы Мак-Кормака была проверена сравнением результатов расчетов с известными аналитическими решениями для модельных случаев наклонной и параболической топографий дна, см. [4, 5]. Рассматривалась прибрежная расчетная область 1000×1000 км с пространственными шагами Δx и Δy , равными 1 км. В первом тесте глубина увеличивается по формуле:

$$D(x, y) = 0.01 \cdot y, \quad (6)$$

где ордината y означает расстояние до береговой линии. На рис. 2 визуализированы результаты численного моделирования распространения волны цунами, генерированной круглым источником радиусом 50 км с центром в точке с координатами (500 км, 300 км), где изначально находится максимум начального поднятия водной поверхности, равный +2,0 м.

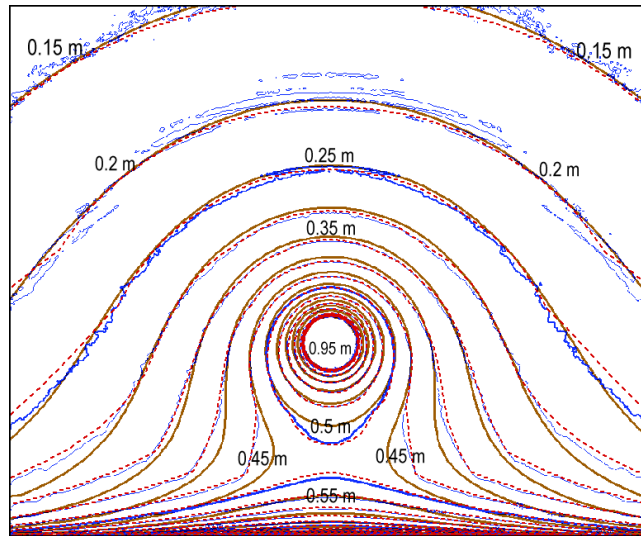


Рис. 2. Сравнение распределений максимумов высоты волны цунами, генерированной модельным очагом в области с наклонным дном, с точным решением в рамках лучевого приближения [4] (коричневые изолинии). Красным цветом визуализированы изолинии, полученные по схеме Мак-Кормака на FPGA. Синим цветом — по методу MOST

Как видно из рис. 2, распределения максимумов высот цунами, рассчитанных методом MOST [1] и с использованием схемы Мак-Кормака [12], реализованной на FPGA, достаточно хорошо соответствуют точному решению в рамках лучевого приближения на глубинах, превышающих 1000 м. При этом решение, полученное с использованием FPGA, ближе по амплитудам к точному решению, чем результаты моделирования программным пакетом MOST.

Другим тестом для предлагаемого численного метода может служить распространение волны цунами от круглого источника в области с параболическим рельефом дна. Для этого случая также получена формула для высоты волны в рамках лучевого приближения [4]. Пусть в прибрежной расчетной области 1000 км x 1000 км глубина D увеличивается по формуле:

$$D(x, y) = 10^{-8} \cdot y^2, \quad (7)$$

где y означает расстояние до берега (нижняя граница области). Пространственные шаги расчетной сетки Δx и Δy одинаковы и равны 1 км. Здесь, как и в задаче с наклонным рельефом дна, имеется круглый источник радиусом 50 км с центром в точке (500 км, 300 км).

Рис. 3 показывает, что, как и в случае наклонного дна, результаты расчета распространения цунами в области с параболическим рельефом дна, генерированного круглым источником радиусом 50 км, неплохо согласуются с точным решением [5]. При этом, как и в случае наклонного дна (рис. 2), результаты расчета с использованием FPGA ближе к точному решению, по сравнению с результатами моделирования методом MOST. Некоторое несоответствие FPGA-результатов в прибрежной части области с точным решением и изолиниями, отражающими результаты моделирования по алгоритму MOST, объясняется слишком большим временем прихода волны до берега при используемом здесь рельефе дна. Поэтому времени моделирования попросту не хватило, чтобы цунами дошло (и отразилось) до всей береговой линии. В любом случае результаты численного моделирования вблизи берега не вполне корректно сравнивать с оценками высоты волны в лучевом приближении, дающем правильные результаты при глубинах не менее 100–200 м.

И, наконец, во время третьего теста сравнивалась скорость движения волнового фронта в процессе расчета по разностной схеме Мак-Кормака (с применением архитектуры FPGA) с точным значением, определяемым формулой Лагранжа [13] $c = \sqrt{gD}$. Рассматривалась задача, описанная, как тест

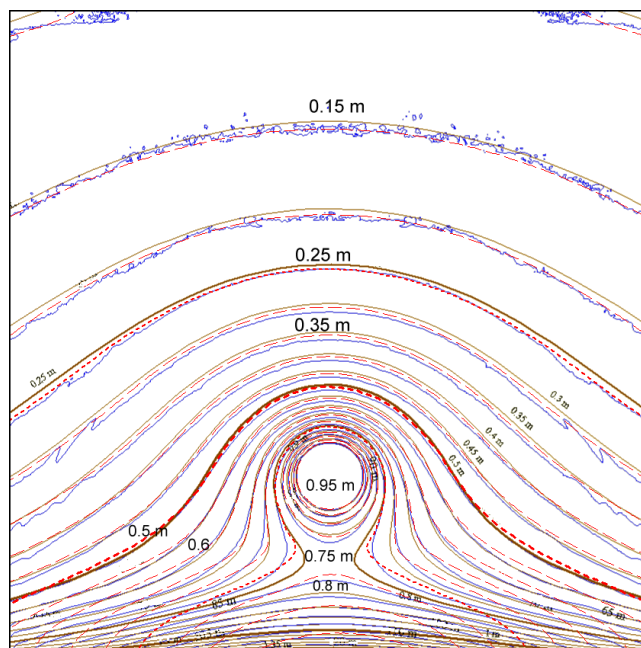


Рис. 3. Сравнение распределений максимумов высоты волны цунами, генерированной модельным очагом в области с параболическим рельефом дна, с точным решением в рамках лучевого приближения (коричневые изолинии). Красным цветом визуализированы изолинии, полученные по схеме Мак-Кормака на FPGA. Синим цветом — по методу MOST

1 (равномерный склон дна). Точное решение для кинематики волнового фронта взято из [4]. На рис. 4 приводятся положения фронта волны, полученные в процессе численного моделирования по схеме Мак-Кормака с применением FPGA. Для сравнения там же нарисованы положения точек вдоль волновых фронтов через каждые 300 сек, полученные в соответствии с точными формулами для кинематики цунами в этом случае.

Рис. 4 показывает идеальное совпадение сравниваемых линий и точек, с учетом того, что их положение соответствует моментам времени, различающимся на 3 сек. Это сделано специально, чтобы точки, соответствующие точным положениям фронта, не сливались на рисунке с рассчитанными изохронами цунами.

Численные эксперименты

С использованием цифровой батиметрии на регулярной сетке вокруг Камчатского полуострова и Курильских островов (рис. 5) были проведены численные эксперименты по распространению волны цунами. Эта сеточная батиметрия с разрешением 30 географических секунд (порядка 1 км) была разработана в [14] на основе большого количества замеров глубины, выполненных судном «Вулканолог». Для дополнения массива глубин океана в угловые области были добавлены сегменты глобальной цифровой базы батиметрических данных, разработанной в [15]. Эта цифровая батиметрия и вычислительная сетка имеют следующие характеристики:

- размер сетки 3120x2400 точек;
- шаг сетки составляет 30 географических секунд в обоих направлениях (что означает приблизительно 584 и 928 метров соответственно);
- массив занимает площадь между 144 ° и 170 ° E, 41 ° и 61 ° N;
- временной шаг, используемый в вычислениях, равен 1,0 с.

Спецвычислителю на основе FPGA в составе обычного современного ПК требуется 24 сек для моделирования первых 90 минут распространения волны от модельного источника дипольного типа. Вертикальное смещение водной поверхности в источнике похоже на «базисный» источник, используемый для прогноза цунами NOAA [16], но значительно растянутый в одном направлении. Форма и профиль типичного источника цунами в этой зоне основаны на имеющейся геолого-геофизической информации. В связи с этим типичная для зоны субдукции площадка смещения морского дна при

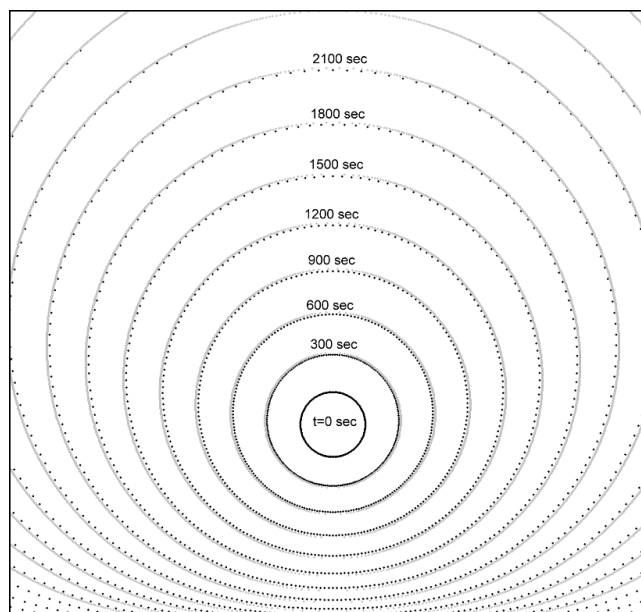


Рис. 4. Сравнение рассчитанных (сплошные линии) и теоретических положений с интервалом 300 сек волнового фронта цунами (черные точки) от круглого источника над наклонным дном

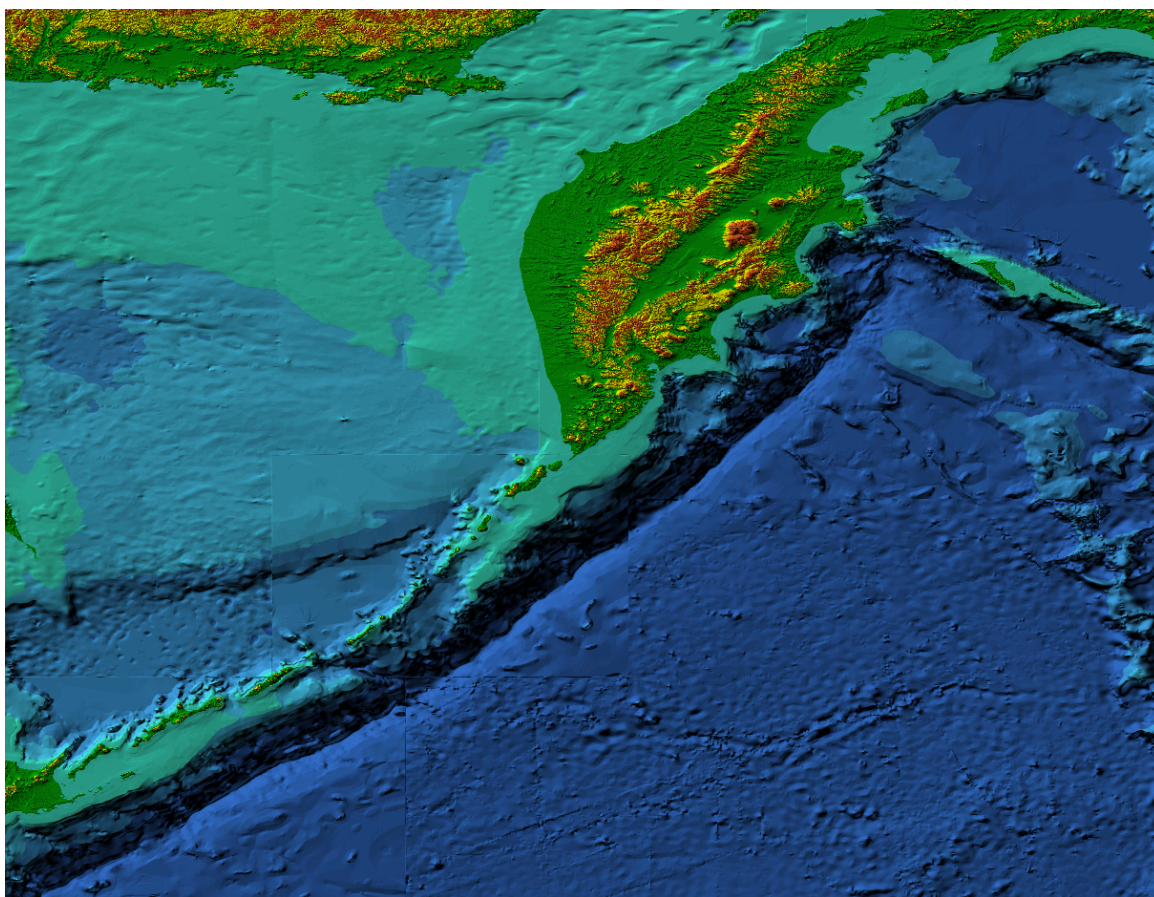


Рис. 5. Цифровая батиметрия вокруг Курильских островов и Камчатки

землетрясении 7,5 М была аппроксимирована прямоугольником 50x100 км, имеющим максимальную высоту смещения поверхности, равную +57 см. Начальное смещение морского дна у такого источника показано на рис. 6.

В численном эксперименте использовался модельный источник цунами протяженностью 500 км. Размер источника имеет тот же порядок, что и очаги цунами 1952 года у берегов Камчатки и 2011



Рис. 6. Тонированные 2D- и 3D-изображения «базисного» источника, используемого для численного моделирования

года у северо-восточного побережья Японии, но максимальная начальная отметка поверхности воды у этого модельного источника принимается равной +200 см, что существенно меньше, чем максимальные значения начального вертикального смещения дна в очаге цунами 2011 г. Там оно превысило +10 м. Географическое положение этого источника показано на рис. 7 в виде двух эллипсов. Часть очага с начальной поверхностной впадиной -100 см расположена ближе к побережью, чем часть очага с положительным смещением. «Реальное» время распространения волны в этом случае оценивается в 6000 сек. Это включает в себя процессы приближения волны к берегу и ее отражения от него.

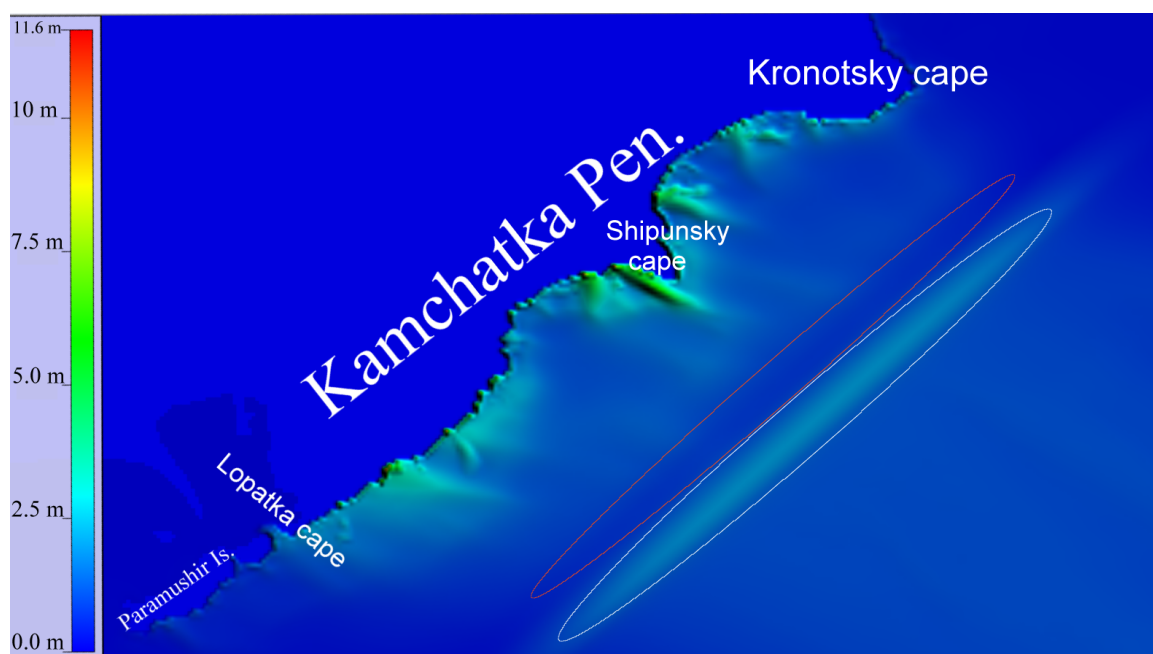


Рис. 7. Положение модельного источника цунами в сегменте расчетной области к востоку от полуострова Камчатка и распределение максимумов волны вблизи Северо-Курильска и побережья Камчатки

Численное моделирование на расчетной сетке 3120x2400 узлов показывает, что основная волна приближается к ближайшему берегу приблизительно через 1600 секунд после землетрясения. С помощью предлагаемого спецвычислителя на базе FPGA расчет распределения максимальной высоты вдоль всей рассматриваемой береговой линии занимает всего несколько секунд. А именно это занимает 29,95 сек для калькулятора на основе Virtex-6 микрочипа (SLEDv7 печатная плата) и всего лишь 5,98 сек для VC709 микрочипа. Аналогичный вычислительный эксперимент проводился с использованием программного обеспечения MOST. Для расчета каждого временного шага на ПК среднего класса (2,5-3,0 ГГц) требуется не менее 1,0 с. Другими словами, необходимо приблизительно 1800 секунд для вычисления распространения цунами вплоть до ближайшего побережья при использовании программного пакета MOST. Таким образом, прирост производительности, достигаемый предлагаемым калькулятором FPGA, увеличился почти в 250 раз по сравнению с программным обеспечением MOST. Это означает, что моделирование осуществляется по меньшей мере в 250 раз быстрее, чем распространение реальной волны (6 с против 1600 с).

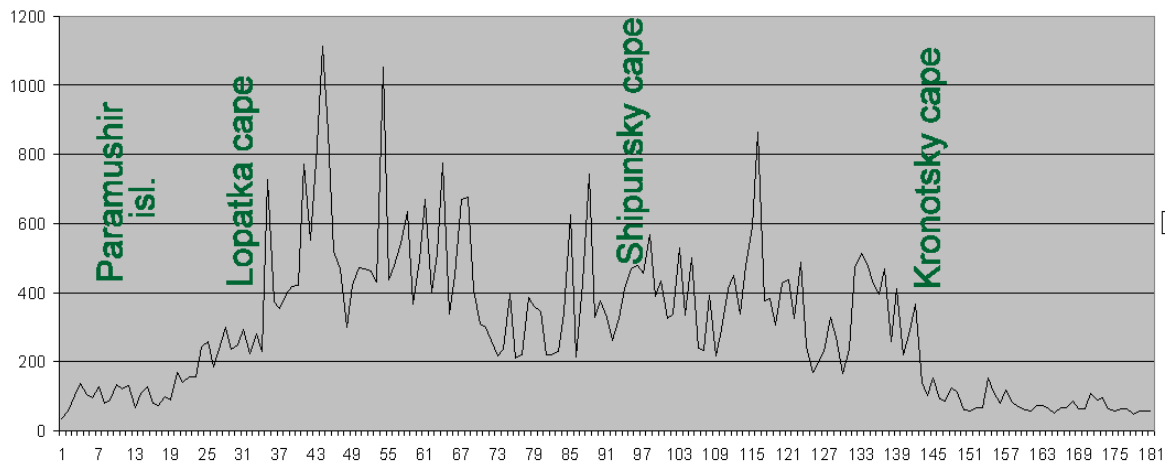


Рис. 8. Распределение максимумов волн цунами (в сантиметрах) вдоль побережий Северных Курил и Камчатки, полученное с помощью специализированного вычислителя на базе FPGA

Приведенное на рис. 8 распределение максимумов высоты волны показывает, что для такого расположения начального смещения поверхности океана (рис. 6) наиболее высокие волны цунами (до 12 м) ожидаются лишь у некоторых бухт в южной части полуострова Камчатка. На участках береговой линии, которые не находятся напротив описанного модельного источника, высота цунами значительно ниже (только 100-200 см). Это сопоставимо с максимальным вертикальным смещением в очаге цунами. Для проверки численных результатов, полученных с помощью описанного специализированного вычислителя на базе FPGA, был проведен тот же самый численный эксперимент с использованием программного обеспечения MOST. На рис. 9 ниже представлены вычисленные максимальные высоты волны цунами, генерируемой одним и тем же вытянутым источником, который показан на рис. 6.

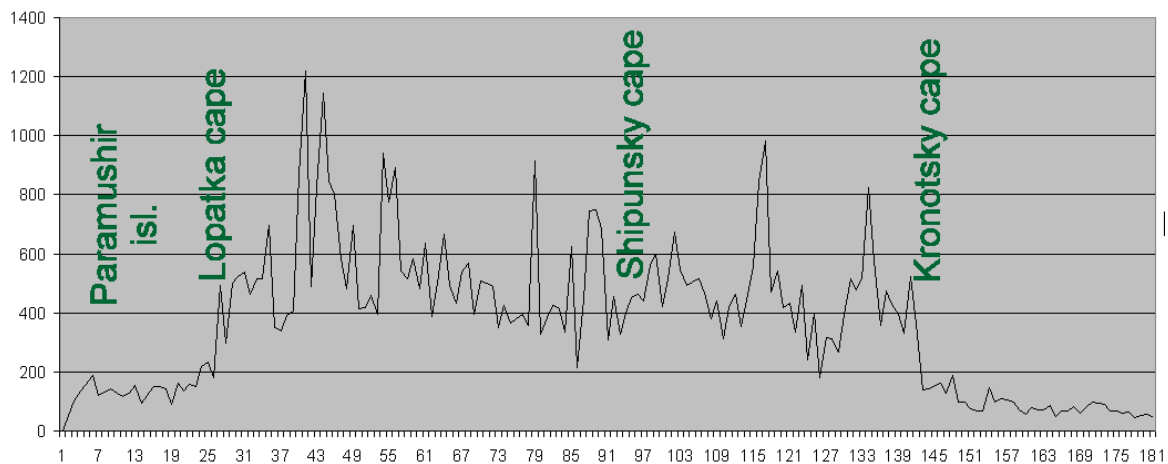


Рис. 9. Распределение максимумов волн цунами (в сантиметрах) вдоль побережий Северных Курил и Камчатки, полученное с помощью программного пакета MOST

Как видно из рис. 9, максимальное распределение высот цунами вдоль побережий Северных Курильских островов и Камчатки аналогично рассчитанным с помощью специализированного вычислителя на базе FPGA. Это сравнение доказывает достоверность численных результатов, полученных с помощью специализированного вычислителя на базе FPGA, которые могут быть получены в течение нескольких секунд после начала вычислений. Сравните это время расчета с десятками минут, необходимыми для вычислений с помощью программного обеспечения MOST.

Несколько слов о цифровой батиметрии, используемой для вычислительных экспериментов. Обычно шаг сетки определяется доступными батиметрическими базами данных, учитывающими цели численного моделирования. В настоящее время такой шаг сетки (около 900 м) считается слишком большим. Однако это зависит от целей моделирования. Когда требуется детальная оценка ожидаемых

высот волн по всей береговой линии, необходимо провести численное моделирование с соответствующим детальным шагом пространственной сетки в прибрежных районах. Это можно сделать, выбрав «правильный» достаточно малый шаг сетки во всей акватории. Однако число вычислительных узлов увеличится на 2–3 порядка, что приведет к значительному увеличению объема вычислений и, соответственно, к резкому увеличению времени ЦП, необходимого для моделирования. Что касается предлагаемого спецвычислителя на базе FPGA, то доступные ресурсы памяти диктуют предел приблизительно 50 миллионов для количества узлов расчетной сетки.

Существует еще более важная проблема расчетных сеток. Улучшение детальности сетки с использованием интерполяции значений глубины до разрешения 10–20 м упустит тонкие детали реальной батиметрии, которые не отражены в исходной базе батиметрических данных с разрешением 900 м. Поэтому результаты численного моделирования могут быть довольно далеки от реальности. Естественное решение этой проблемы может быть реализовано применением метода вложенных сеток, где разрешение зависит, грубо говоря, от расстояния до берега. Конечно, детальная цифровая батиметрия в прибрежной зоне необходима для получения подробного распределения высоты волны вдоль береговой линии. Комбинация подхода вложенных сеток с аппаратным ускорением кода (с использованием графических ускорителей — GPU) была протестирована авторами, моделирующими распространение волны цунами от очагов в глубоком океане до северо-восточного побережья японского острова Хонсю, см. [11].

Когда имеется детальная цифровая батиметрия в прибрежной зоне, не является проблемой передача полученных волновых параметров из исходной области с «грубой сеткой» в область с детальной сеткой. Используемый алгоритм допускает одновременные вычисления в нескольких областях вблизи побережья. Таким образом, применяя только несколько из предложенных калькуляторов на основе FPGA, даже не очень мощные ПК дают возможность локальным центрам (службам) предупреждения цунами получить надежную оценку максимальных высот волн цунами по всему прибрежному региону за достаточно короткое время, гораздо меньшее по сравнению со временем распространения волны от источника к побережью.

Заключение

Имея такой инструмент, как разработанный спецвычислитель для моделирования волн цунами, работающий с обычным ПК в качестве сопроцессора, можно перейти к оценке опасности цунами в любой конкретной части побережья в режиме реального времени. Действительно, вскоре после сильного подводного сейсмического события вблизи берега становится известна его магнитуда и местоположение эпицентра. В случае если событие может быть опасным, специальная служба (муниципальная, например) может принять в обработку волновые формы волны цунами, измеренные имеющейся сенсорной системой (DONET, S-NET, DART или любой другой). Довольно простой алгоритм, см. [9, 17], восстанавливает на основе этих данных начальное смещение водной поверхности в очаге цунами всего за несколько секунд. Затем, используя спецвычислитель, любой эксперт может сделать оценку ожидаемого распределения высот волны вдоль значительной части побережья. Поскольку вычисление занимает менее минуты, может быть обработано несколько сценариев (отличающихся друг от друга небольшими сдвигами начальной области смещения водной поверхности в очаге). Короткое время вычисления дает возможность использовать более длинные записи волн для восстановления источника цунами, что должно улучшить окончательный прогноз высоты. Это послужит прочной основой для принятия директивными органами мер по эвакуации населения и производств.

Разработан и протестирован ряд алгоритмов реального времени, охватывающих весь процесс, а именно: автоматизированная очередность вступления волны цунами в разные регистраторы, автоматизированный учет приливной составляющей, расчет профиля исходного смещения водной поверхности в очаге, формирование адаптивной цифровой батиметрии, расчет распространения волны цунами, картирование зон затопления берега, возможность создания программного обеспечения поддержки принятия решений в режиме реального времени для служб предупреждения цунами.

В качестве шага к оценке опасности цунами в реальном времени был разработан и протестирован специализированный калькулятор FPGA. Он использует микрочип FPGA, который резко сокращает время численного моделирования распространения волны цунами. Расчет распространения волны цунами от модельного источника вплоть до береговой линии в зоне Курильских островов и Камчатки

в расчетной области 3120x2400 узлов занимает всего несколько секунд. Так, распределение высоты волны вдоль берега можно определить практически сразу после восстановления начального смещения водной поверхности в районе очага цунами. Как было показано ранее, точность численных результатов та же, что и в случае применения программного обеспечения MOST, официального инструмента центров предупреждения о цунами NOAA (США). Эти результаты показывают возможность прогноза опасности цунами в режиме реального времени. Авторы вскоре предложат версию программного обеспечения, которая использует подход вложенных сеток для получения характеристик волны цунами вдоль береговой линии с высокой детальностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Titov V. V., Gonzalez F. I. Implementation and Testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) Model. *NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112*, 1997.
2. Lavrentiev M. M., Romanenko A. A., Oblaukhov K. K., Marchuk An. G., Lysakov K. F., Shadrin M. Yu. FPGA Based Solution for Fast Tsunami Wave Propagation Modeling. *The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2017, 25-30 June, San Francisco, California, USA*. 2017;924–929.
3. Lysakov K. F., Lavrentiev M. M., Oblaukhov K. K., Marchuk An. G., Shadrin M. Yu. FPGA-Based Modelling of the Tsunami Wave Propagation at South Japan Water Area. *Oceans'18 MTS/IEEE, Kobe, Japan, May 28–31, 2018*.
4. Марчук Ан. Г. Вычисление высоты цунами, распространяющейся над наклонным дном, в лучевом приближении. *Сиб. журн. вычисл. математики*. 2015;18(4):377–388.
5. Марчук Ан. Г. Оценка высоты цунами, распространяющейся над параболическим дном, в лучевом приближении. *Сиб. журн. вычисл. математики*. 2017;20(1):23–35.
6. DART® (*Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis*). Режим доступа: <https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/>.
7. DONET (*Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis*). Режим доступа: <https://www.jamstec.go.jp/donet/e/>.
8. Hiroaki T., Yusaku O. Review on Near-Field Tsunami Forecasting from Offshore Tsunami Data and Onshore GNSS Data for Tsunami Early Warning. *Journal of Disaster Research*. 2014;9(3):339–357.
9. Voronina T. A. Recovering a Tsunami Source and Designing an Observational System Based on an *R*-Solution Method. *Numerical Analysis and Applications*. 2016;9(4):267–276.
10. Lavrentiev M. M., Kuzakov D. E., Romanenko A. A., Vazhenin A. P. Determination of Initial Tsunami Wave Shape at Sea Surface. *Oceans'17 MTS/IEEE, Aberdeen, June 19–22, 2017*.
11. Hayashi K., Vazhenin A. P., Marchuk An. G. Trans-Boundary Realization of the Nested-Grid Method for Tsunami Propagation Modeling. *Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference*. Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21–26, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). 2015;3:741–747.
12. MacCormack R. W., Paullay A. J. Computational Efficiency Achieved by Time Splitting of Finite-Difference Operators. *AIAA paper*. 1972;72–154.
13. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. М.: ИЛ, 1959. 617 с.
14. Marchuk An. G., Bezhaev A. Yu., Seliverstov N. I. New Gridded Digital Bathymetry for the Kuril-Kamchatka Region. *Recent Advances in Marine Science and Technology' 2002, USA, Honolulu, 2002*. Режим доступа: <http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2002/00223/contents/044.htm>.
15. Smith W. H. F., Sandwell D. Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*. 1997;277:1956–1962.
16. Gica E., Spillane M. C., Titov V. V., Chamberlin C. D., Newman J. C. Development of the Forecast Propagation Database for NOAA's Short-Term Inundation Forecast for Tsunamis (SIFT). *NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-139, Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, WA, March 2008*.
17. Lavrentiev M. M., Kuzakov D. E., Marchuk An. G. Determination of Initial Sea Surface Displacement at Tsunami Source by a Part of Wave Profile. *Oceans'18 MTS/IEEE, Kobe, Japan, May 28–31, 2018*.