

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ НА БАЗЕ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА

М. М. Лаврентьев^{1,2,a}, Ан. Г. Марчук^{3,b}, К. К. Облаухов^{1,c}, М. Ю. Шадрин^{1,d}¹ Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация² Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация³ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1574-0629>,  mmlavrentiev@gmail.com^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3401-1982>, mag@omzg.sgcc.ru^c ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-8540-7616>, oblaukhov@sl.iae.nsk.su^d ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-6870-9971>, miksha@sl.iae.nsk.su

Аннотация: в работе представлены архитектуры аппаратных ускорителей для численного решения нелинейной системы уравнений мелкой воды для работы в составе персонального компьютера или автономно. Достигнутая производительность расчетов позволила провести численные эксперименты по изучению трансокеанских цунами. Предложена концепция корректировки параметров источника после получения данных о профиле волны с глубоководного датчика давления. За счет оптимизации вычислительного конвейера (реализация конечно-разностной схемы МакКормака, имеющей второй порядок аппроксимации) за один такт получаются значения искомых величин в узлах сетки на семи последовательных шагах по времени. При использовании микросхемы Xilinx Virtex-7 VC709 в качестве со-процессора персонального компьютера на расчетной сетке из 9601×6781 узлов для выполнения 36 тысяч шагов по времени с интервалом в 3 сек (то есть для моделирования 30 часов распространения волны) требуется всего 1352 сек (то есть 22.5 минуты). Приводятся результаты сравнения получаемого численного решения с известными точными решениями, исследование зависимости расчетов от используемых глобальных батиметрических банков данных и обосновывается возможность применения метода вложенных сеток. Применение предложенной технологии предоставляет исследователям новые возможности в изучении явления цунами.

Ключевые слова: моделирование цунами, аппаратное ускорение, трансокеанское цунами.

Благодарности: работа выполнена при поддержке проектов FWNG-2024-0014 ИАиЭ СО РАН и FWNM-2022-0004 ИВМиМГ СО РАН.

Для цитирования: Лаврентьев М. М., Марчук Ан. Г., Облаухов К. К., Шадрин М. Ю. Моделирование цунами на базе персонального компьютера. *Успехи кибернетики*. 2025;6(1):23–34.

Поступила в редакцию: 07.12.2024.

В окончательном варианте: 28.12.2024.

TSUNAMI SIMULATION ON A PC

М. М. Lavrentiev^{1,2,a}, An. G. Marchuk^{3,b}, K. K. Oblaukhov^{1,c}, M. Yu. Shadrin^{1,d}¹ Institute of Automation and Electrometry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation² Sobolev Institute of Mathematics, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation³ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation^a ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1574-0629>,  mmlavrentiev@gmail.com^b ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3401-1982>, mag@omzg.sgcc.ru^c ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-8540-7616>, oblaukhov@sl.iae.nsk.su^d ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-6870-9971>, miksha@sl.iae.nsk.su

Abstract: we designed hardware code acceleration architectures for solving the nonlinear system of shallow water equations, enabling to run it on a PC or other device. We achieved sufficient computational performance to conduct numerical experiments on transoceanic tsunamis. We proposed a method to adjust source parameters based on wave profile data from deep-sea pressure sensors. By optimizing the computational pipeline and implementing the McCormack finite-difference scheme with second-order approximation, we computed values at seven consecutive time steps within a single clock cycle. Using a Xilinx Virtex-7

VC709 chip as a co-processor on a computational grid of $9,601 \times 6,781$ nodes, we performed 36,000 time steps with a 3-second interval, simulating 30 hours of wave propagation in just 1,352 seconds (22.5 minutes). We validated our numerical solution against known exact solutions, analyzed how global bathymetric data affect calculations, and justified the use of the nested grid method. The proposed technology enhances our ability to study tsunamis.

Keywords: tsunami simulation, hardware acceleration, transoceanic tsunami.

Acknowledgements: this study is supported by the government contract FWNM-2022-0004 with the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, and FWNG-2024-0014 with the Institute of Automation and Electrometry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences.

Cite this article: Lavrentiev M. M., Marchuk An. G., Oblaukhov K. K., Shadrin M. Yu. Tsunami Simulation on a PC. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(1):23–34.

Original article submitted: 07.12.2024.

Revision submitted: 28.12.2024.

Введение

Высокопроизводительные вычисления (High Performance Computing — HPC) часто рассматриваются как способ решения любых технических и даже этических проблем (искусственный интеллект, ChatGPT и так далее). Однако за последние годы энергопотребление таких систем резко возросло. Помимо списков Top 500 (см. <http://top500.org>) самых мощных суперкомпьютеров, регулярно публикуются списки Green-500 (см. <http://green500.org>) самых энергоэффективных компьютерных систем. Суперкомпьютер (скажем, HPC-система) — это вычислительная система, производительность которой на порядки выше производительности компьютера общего назначения.

Как отмечается в [1], в начале 2000-ых по параметру производительность графические процессоры (Graphic Processing Unit — GPU) превосходили центральный процессор (Central Processing Unit — CPU) примерно на порядок (естественно, в зависимости от решаемой задачи), а вентиляционные матрицы, программируемые пользователем (Field Programmable Gates Array — FPGA) — примерно в 30 раз. Примерно также, на порядок, авторы оценивают преимущество GPU по сравнению с CPU по параметру энергоэффективности — отношения производительности к энергопотреблению. В случае же FPGA, эта архитектура превосходит энергоэффективность CPU в 175 раз, а GPU — в 18 раз. Примерно такие же соотношения сохраняются и у современных вычислительных платформ.

Платформа FPGA обладает этими преимуществами поскольку предоставляет возможность (с помощью программных средств) проектировать вычислительные конвейеры, оптимизированные для реализации того или иного алгоритма. Другими словами, это возможность создать «суперкомпьютер на столе» с помощью программных средств. Печатная плата с микрочипом FPGA, работающая в составе персонального компьютера в качестве сопроцессора или самостоятельно, способна решить конкретную вычислительную задачу с очень высокой производительностью. При наличии соответствующей программной библиотеки та же аппаратная конфигурация может стать высокопроизводительной вычислительной системой для решения целого набора задач.

В данной работе возможности этой технологии демонстрируются на примере решения задачи распространения волны цунами.

Катастрофическая волна цунами 11 марта 2011 года у побережья Японии, возникшая после сильнейшего землетрясения (The Great Tohoku Earthquake) с магнитудой более 9, показала необходимость совершенствования методов оценки параметров волны с целью своевременного применения (в случае необходимости) эвакуационных мер и снижения последствий для инженерной инфраструктуры. В работе [2] проводится предварительный анализ возможностей существующей системы предупреждения об опасности цунами, обсуждаются нерешенные проблемы для случаев событий так называемой ближней зоны, когда между сейсмическим событием и приходом волны цунами к ближайшему побережью проходит совсем немного времени, что составляет около 20 минут в случае землетрясения 11 марта 2011 года.

Современные средства компьютерного и математического моделирования позволяют с достаточной точностью рассчитать распространения волны цунами по заданной акватории при доступности корректной информации о начальном возмущении (деформации морского дна или водной поверхности в источнике цунами), цифровой сеточной батиметрии и наличии достаточного времени для проведения расчетов. Для решения задачи об определении параметров начального возмущения в источнике

активно развиваются системы глубоководных донных датчиков давления, позволяющих в режиме реального времени получать данные о профиле волны, проходящей над местом расположения датчика, см., например, [3–7].

Существует целый набор пакетов программ для численного моделирования генерации и распространения волны цунами. Среди наиболее известных из них мы отметим следующие: MOST (Method of Splitting Tsunamis, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, WA, USA) [8, 9]; COMCOT (Cornell University, Ithaca, NY, USA; NS Science, New Zealand) [10]; TUNAMI-N1/TUNAMI-N2 (Tohoku University, Sendai, Japan) [11, 12]; VOLNA and NAMI-DANCE (TSUNAMI Modeling Software by Special Bureau of Sakhalin, Russia and METU Turkey) [13].

Время расчетов зависит как от характеристик используемой аппаратной платформы, так и от размеров шагов расчетной сетки, которые не могут выбираться произвольно. Критерий устойчивости численного решения [14] устанавливает зависимость между шагами по пространственным переменным и времени. Так, в областях с глубинами до 1–3 км использование шагов по пространственным переменным порядка 5–10 м, что необходимо для адекватной оценки зон затопления, требует шага по времени не более 0.05 сек. Это приводит к значительному увеличению времени счета для областей размером 1000×1000 км даже при использовании суперкомпьютерных систем. В случае действительно катастрофических событий масштаба The Great Tohoku Earthquake возможны отключения электроэнергии, что препятствует применению суперкомпьютеров. Поэтому, в частности, развивается концепция использования вложенных сеток, см., например, [15].

В настоящее время разрабатывается технология быстрой оценки максимальных значений амплитуды волны цунами вдоль выделенных участков побережья. Начальным моментом времени считаем приход волны в место расположения одного из глубоководных датчиков давления. Ориентиром является расчет максимальных значений амплитуды волны за несколько минут.

В качестве элементов технологии быстрой (в пределах нескольких минут) оценки параметров волны цунами вдоль защищаемого участка побережья без применения ресурсов суперкомпьютерных центров предложены: метод ортогонального разложения для определения параметров источника цунами по части волнового профиля, записанного в одной точке и метод ускорения численного решения нелинейной системы уравнений мелкой воды за счет аппаратного ускорения (специализированный вычислитель на базе FPGA) [16]. В работе кратко описан метод ортогонального разложения и суммированы результаты исследования качества предложенного метода аппаратного ускорения расчетов.

Математическая постановка задачи

Распространение волны цунами в акваториях с переменной глубиной при отсутствии внешних сил кроме гравитации корректно описывается нелинейной системой уравнений мелкой воды [17, 18]:

$$\begin{aligned}\eta_t + (u(D + \eta))_x + (v(D + \eta))_y &= 0, \\ u_t + uu_x + vu_y + g\eta_x &= 0, \\ v_t + uv_x + vv_y + g\eta_y &= 0.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь $u(x, y, t)$ и $v(x, y, t)$ — компоненты горизонтальной скорости водного потока, постоянные во всем слое от поверхности до дна, $\eta(x, y, t)$ — смещение водной поверхности относительно нулевого уровня (искомая высота волны), g — ускорение свободного падения, $D(x, y)$ — считающийся известным профиль глубин. Обычно для этой системы уравнений ставится задача Коши с начальными условиями, когда в некоторой подобласти в начальный момент времени задается начальное вертикальное смещение водной поверхности при нулевой скорости водного потока. Эта подобласть называется очагом цунами.

Результатом численного решения системы уравнений мелкой воды (хорошо описывающей процесс распространения волны цунами) являются параметры волны (смещение водной поверхности и компоненты скорости водного потока) в узлах расчетной сетки через определенные интервалы времени (шаги по времени). В работе проводится сравнение точности расчетов распространения волны цунами на модельной и реальной батиметрии, полученные с применением трех различных алгоритмов численного решения системы уравнений мелкой воды.

Для численного решения нелинейной системы уравнений мелкой воды (1) использована конечно-разностная схема МакКормака [19], имеющая второй порядок аппроксимации по всем

переменным:

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

Здесь H_{ij}^n , u_{ij}^n , и v_{ij}^n — сеточные значения переменных, соответствующие функциям $H(x, y, t)$, $u(x, y, t)$ и $v(x, y, t)$ в дифференциальной системе (1). Параметры τ , Δx и Δy — это шаги расчетной сетки по времени и по пространственным переменным. Для учета сферической формы Земли использовался уменьшающийся шаг сетки по долготе при больших значениях широты. Обозначения F_{ij}^n представляют переменные на временном слое n , знак волны сверху соответствует промежуточным значениям, а F_{ij}^{n+1} соответствует переменным на временном слое $n+1$.

Удобный вычислительный шаблон позволил реализовать эффективный параллельный вычислительный конвейер, оптимизированный для архитектуры FPGA. При использовании микросхемы Xilinx Virtex-7 VC709 в качестве сопроцессора персонального компьютера за один такт вычисляются значения искоемых функций на 7 последовательных шагах по времени [20].

Быстрый расчет распространения волны по акватории

Аппаратная архитектура

Для реализации эффективного параллельного конвейера вычислений по схеме МакКормака были предложены архитектуры аппаратного ускорителя расчетов на базе FPGA [21], схемы которых показаны на рис. 1.

Предложенная реализация схемы МакКормака была протестирована. Высокая производительность достигается в случае, когда все данные решаемой задачи находятся во внутренней памяти устройства, и отсутствуют обращения к внешней памяти. Это является ограничением предлагаемой технологии. В случае решения системы уравнений мелкой воды (1) и использования микросхемы Xilinx Virtex-7 VC709 в качестве со-процессора персонального компьютера достигнуты следующие параметры: на расчетной сетке из 9601×6781 узлов для выполнения 36 тысяч шагов по времени с интервалом в 3 сек (то есть для моделирования 30 часов распространения волны) требуется всего 1352 сек (то есть 22.5 минуты).

Тестирование по точности решения

Сравнение получаемого численного решения как с известными точными решениями [22], так и с результатами применения программного пакета MOST [8, 9], показало их хорошее соответствие [23].

Рассмотрим распространение волны цунами от круглого источника в модельной области с наклонным профилем дна. Рассматривалась область размером 1000×1000 км с расчетной сеткой, имеющей пространственный шаг $\Delta x = \Delta y = 1000$ м. Центр кругового источника цунами радиусом 50 км располагался в центре области на расстоянии 300 км от нижней границы, где $y = 0$, на которой глубина обращается в нуль. В остальной части расчетной области глубина линейно увеличивалась по формуле

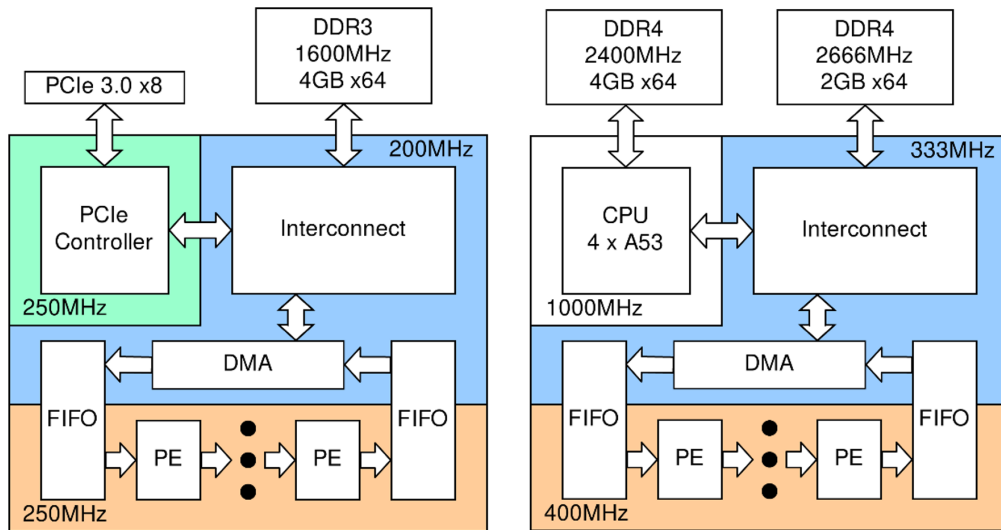


Рис. 1. Архитектура специализированного вычислителя в составе персонального компьютера (слева) и в качестве независимого устройства (справа)

$D(x, y) = 0.01 y$, где y — расстояние до нижней границы расчетной области. Начальное вертикальное смещение h в фокусе определяется по формуле

$$h(r) = 1 + \cos\left(\frac{\pi \cdot r}{r_0}\right), \quad 0 \leq r \leq r_0. \quad (2)$$

Здесь параметр r представляет собой расстояние до центра источника. Так, в центре очага начальное смещение водной поверхности составило +2 м. Такой очаг породил круговую волну высотой 0,95 м на расстоянии 50 км от центра. Именно такая высота волны на гребне начальной круговой волны радиусом 50 км использовалась при оценке амплитуды волны во всех точках региона по лучевому приближению [22]. Это распределение амплитуды волн цунами (полученное аналитическим методом) сравнивалось с аналогичными распределениями, полученными при численном моделировании распространения цунами с помощью алгоритмов MOST и MacCormack (рис. 2).

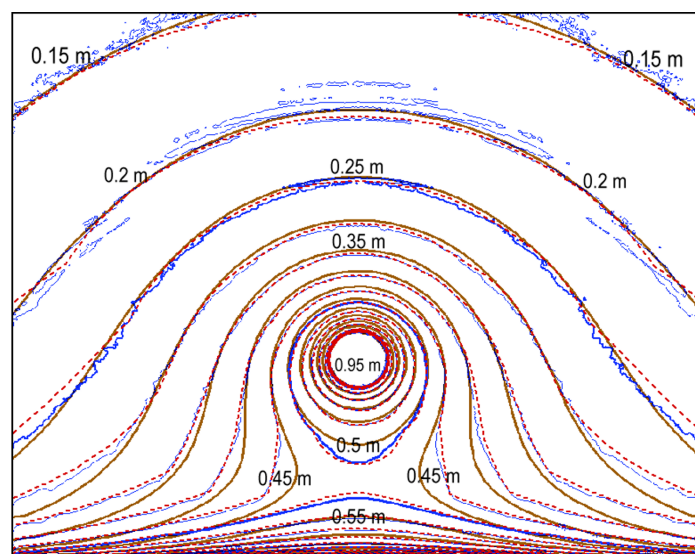


Рис. 2. Изолинии распределения максимальных высот волн в области с наклонным дном, полученные: точным решением системы уравнений мелкой воды (1) (коричневые линии), численным решением на FPGA Calculator (красные пунктирные линии) и с помощью пакета MOST (синие линии). Расстояние до берега измеряется по вертикальной оси относительно нижней границы рисунка

Исследование зависимости численного решения от цифровой батиметрии

Было исследовано также влияние данных батиметрии на результаты расчетов. Для расчета распространения волн цунами необходимо использовать доступную цифровую батиметрию. В настоящее время существует как минимум 3 глобальных батиметрических банка данных с детальностью 0,5 географических градуса (около 1 км в направлении север-юг). К ним относятся: GEBCO-30 [24], ETOPO-30 [25] и батиметрия Смита и Сандвелла [26, 27]. Кроме того, существуют региональные и местные цифровые наборы батиметрических данных с более высокой детализацией. В частности, Центр океанографических данных Японии (JODC) создал цифровой рельеф дна вокруг Японии [28] с разрешением 500 м на основе данных эхолокации. Эта цифровая батиметрия является наиболее достоверной, так как была разработана японскими специалистами с использованием огромного количества измерений глубин различными приборами. Поэтому батиметрия JODC используется в качестве эталона, с которым сравниваются другие батиметрии и результаты расчетов с их использованием.

Для проведения вычислительных экспериментов, связанных с батиметрией, была выбрана акватория, прилегающая к северо-восточному побережью острова Хонсю (Япония). В расчетах использовались цифровые батиметрические наборы данных детальностью 30 географических секунд из глобальных баз данных, перечисленных во введении. Сетка батиметрии размером 961x841 расчетных узлов охватывала регион, простирающийся от 140° до 148° восточной долготы и от 34° до 41° северной широты. Набор батиметрических данных, разработанный Японским центром океанографических данных (JODC) на основе эхолокационных данных вокруг Японских островов, представляется наиболее надежным для численных расчетов на шельфе Японии, поскольку он основан на расширенных данных зондирования. Поэтому в качестве справочных данных будут рассматриваться как сама цифровая батиметрия, так и результаты численного моделирования с ее использованием. Численные результаты, полученные с использованием альтернативных наборов батиметрических данных, будут сравниваться с этими данными. На рис. 3 представлена визуализация батиметрических данных JODC, дополненных рельефом суши. На средних широтах выбранного района длина пространственных шагов составляет 927 м в направлении юг-север и 740 м в направлении запад-восток.

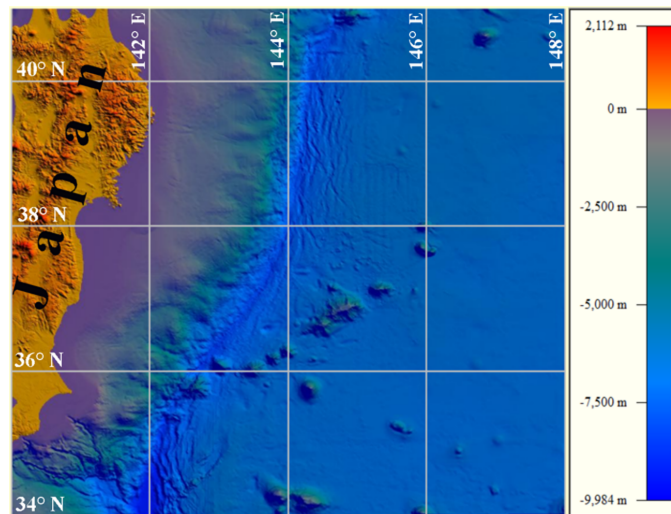


Рис. 3. Рельеф дна рассматриваемой акватории, визуализированный на основе цифровой батиметрии, созданной JODC. Шкала в правой части показывает цветовое соответствие глубине

Для численного моделирования возникновения и распространения цунами в выбранном регионе был выбран модельный источник в форме эллипса с длинами осей 180 и 80 км и максимальной высотой смещения водной поверхности в его центре, равной 1 м. На рис. 4 показано распределение максимумов высоты цунами во всем регионе по результатам расчета с использованием цифровой батиметрии JODC с разрешением 0,5 географических градусов.

На рис. 5а — 5б показано распределение разницы глубин (в процентах) между цифровыми батиметриями GEBCO и JODC (оконтурено темно-синим цветом) и относительная разница максимальных высот, рассчитанных по этим батиметриям, во всей расчетной области (оконтурено белым цветом). Изолинии очерчивают только те места, где эта разница превышает 10 %.

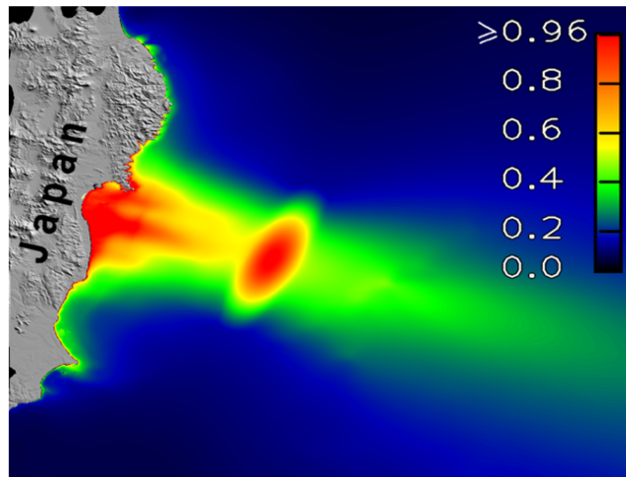


Рис. 4. Распределение расчетных максимумов волны цунами, полученных с использованием батиметрии JODC

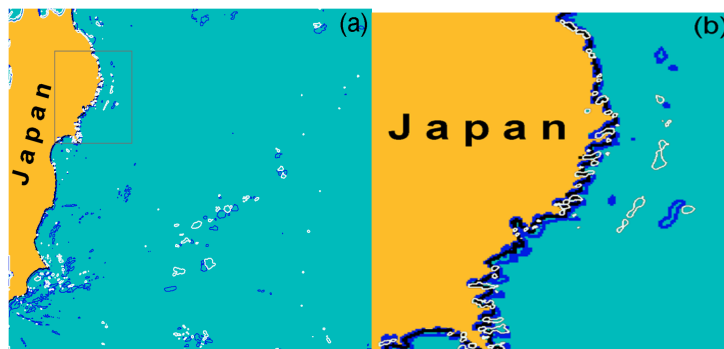


Рис. 5. Изолинии окрашены в темно-синий цвет и ограничивают области, где разница между глубинами по данным батиметрии GEBCO и JODC превышает 10 %. Белые изолинии ограничивают области, где максимумы рассчитанных волновых форм по этим батиметриям также отличаются на 10 %. На рис. 5(b) более подробно показана подобласть, ограниченная прямоугольником на рис. 5(a)

Применение метода вложенных сеток

Даже предложенная технология аппаратного ускорения расчетов не позволяет быстро получать результаты при использовании шагов сетки порядка 10 м, что требуется для более корректной оценки ожидаемых зон затопления. Поэтому была проведена проверка возможности применения метода вложенных сеток [29].

Расчетная область, представленная на рис. 6, охватывает географическую область от 137° до 143° восточной долготы и от 34° до 38° северной широты. Размерность расчетной сетки составляет 3000×2000 узлов с разрешением $0,002$ угловых градуса (180 м в направлении запад-восток и $222,6$ м в направлении юг-север). Для реализации метода вложенных сеток в численных экспериментах рассматриваются три уточняющие сетки: B1, B2 и B3. Углы подобласти B2 размером 1481×2401 узлов имеют следующие координаты по отношению к узлам исходной сетки: $(1780, 380)$, $(2150, 380)$, $(1780, 980)$, $(2150, 980)$. Отсчет вертикальных положений узлов сетки начинается с верхней границы B1. Шаг сетки в подобласти B2 в 4 раза меньше по сравнению с B1, что составляет 45 м по горизонтали и $55,6$ м по вертикали.

Расчетная область B3 — это область 1302×871 узлов с разрешением сетки $0,000075$ угловых градусов в обоих направлениях (примерно $8,35$ м в направлении север-юг и $6,68$ м в направлении запад-восток). Она охватывает район порта Онахама в префектуре Фукусима. Эта батиметрия была создана путем оцифровки бумажной морской карты Онахамы, выпущенной Японской гидрографической ассоциацией.

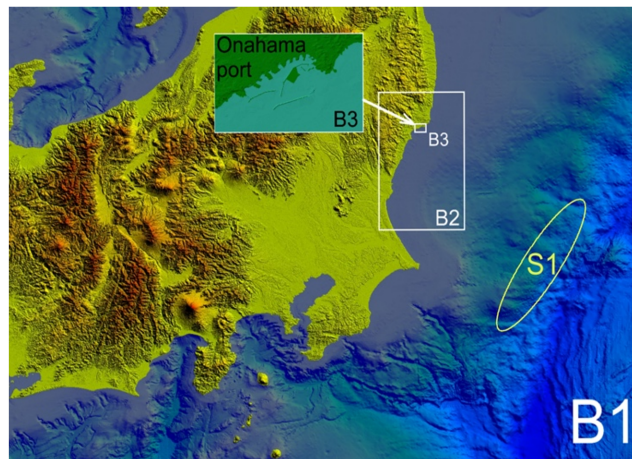


Рис. 6. Рельеф дна расчетной области B1 к востоку от Японии. Эллипс S1 показывает примерное положение модельного источника цунами, использованного для численных экспериментов. Также указаны вложенные подобласти B2 и B3

На рис. 7 (левая часть) показана расчетная поверхность океана (волна цунами) во всей расчетной области B1, включая подобласть B2, после 1200 секунд генерации волны.

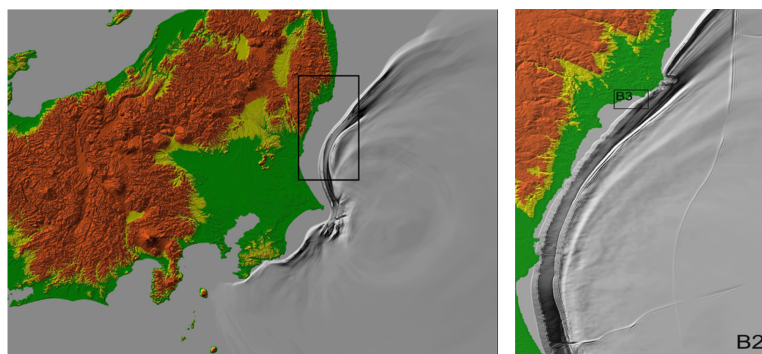


Рис. 7. Морская поверхность через 1200 с после возникновения цунами как результат моделирования распространения волн в расчетной области B1 (левая часть). Поверхность океана через 2100 с после возникновения цунами как результат второго этапа моделирования распространения волн в расчетном домене B2 (правая часть)

На рис. 7 (правая часть) представлена поверхность океана через 2100 с после начала процесса распространения. Здесь черный прямоугольник обозначает географическое положение расчетной области B3.

На последнем этапе численного эксперимента расчеты выполняются в районе B3 на оригинальной сетке, привязанной к цифровой батиметрии, разработанной авторами, с наименьшей длиной шага пространственной сетки (0,000075 углового градуса). Это примерно 8,35 м в направлении север-юг и 6,68 м в направлении запад-восток. Конечной целью данного исследования является получение распределения максимумов высоты цунами внутри подрайона B3 и вдоль береговой линии, рис. 8. Таким образом, продемонстрирована возможность вести расчет практически до береговой линии. На настоящий момент не решен вопрос о возможности проведения расчетов по трем ступающим сеткам на одной микросхеме, чтобы не тратить время на перезагрузку данных.

Коррекция параметров источника по мере поступления новых данных

Наличие инструмента быстрого расчета распространения волны цунами на базе персонального компьютера позволило предложить концепцию корректировки в режиме реального времени параметров источника по мере поступления новых данных от глубоководных датчиков гидростатического давления [21].

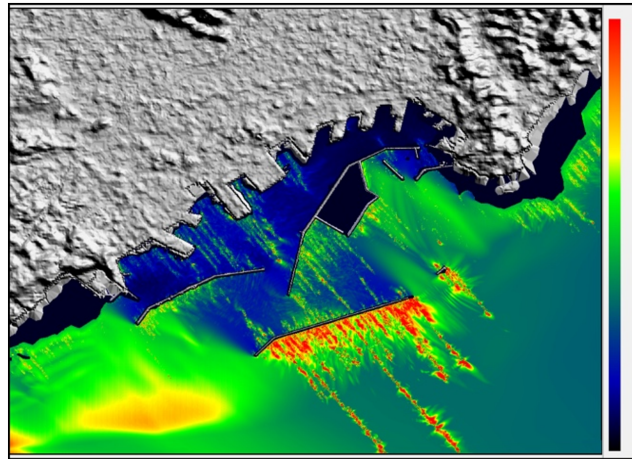


Рис. 8. *Распределение максимумов высоты волн цунами в расчетной области ВЗ*

Рассматривается акватория всего Тихого океана, батиметрия которого представлена в [26]. Она построена с использованием данных спутниковой гравиметрии и имеющихся данных эхолотации (рис. 9).

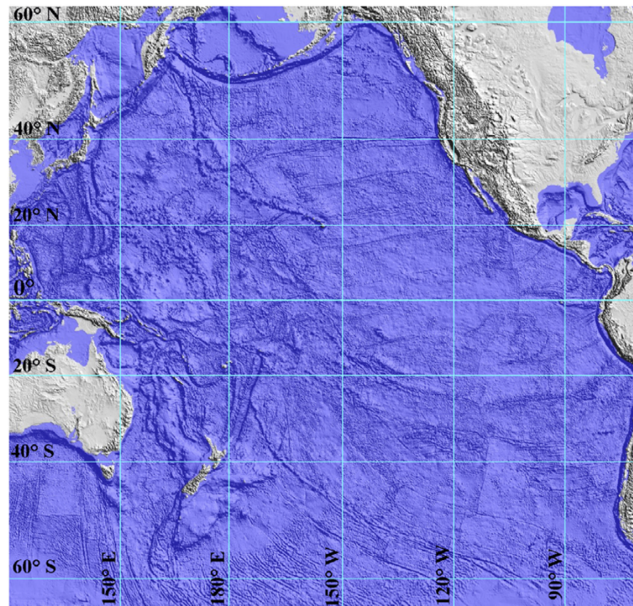


Рис. 9. *Визуализация донного рельефа расчетной области — Тихий океан*

Как показало численное моделирование распространения трансокеанского цунами на сетке размером 2581×2541 расчетных узлов, требуется всего лишь 3 минуты для расчета 36-ти часов распространения волны от очага, расположенного около п-ова Камчатка до берегов Южной Америки. Рис. 10 показывает распределение максимальных высот в акватории Тихого океана в результате землетрясения магнитудой 9.0 у берегов Камчатки. На этом же рисунке черными квадратиками обозначены места установки нескольких регистрирующих станций системы DARTS, через которые проходит волны цунами с наибольшей амплитудой.

При прохождении реальной волны над местами установки регистраторов DART можно видеть высоту цунами в данных точках. Получение результатов моделирования цунами за короткое время позволяет сравнивать вычисленные высоты волны с реально измеренными и корректировать параметры очага, добиваясь лучшего соответствия результатов расчета с натурными данными. Способы корректировки могут быть различными, но это предмет другого большого исследования, и здесь мы не будем этого касаться. Самый простой путь — это изменять высоту начального смещения в очаге.

Рассмотрим предлагаемый порядок действий, имеющих целью оценку высот цунами у удален-

ных побережий при возникновении мега-цунами, имеющим трансокеанский характер. Как уже говорилось, после обработки сейсмических данных можно определить местоположение и оценить размеры, пространственную ориентацию очага цунами и приблизительное максимальное смещение водной поверхности там. Рассмотрим начальное смещение поверхности (рис. 11), моделирующее очаг цунами в результате землетрясения магнитудой 9.0, произошедшее около полуострова Камчатка.

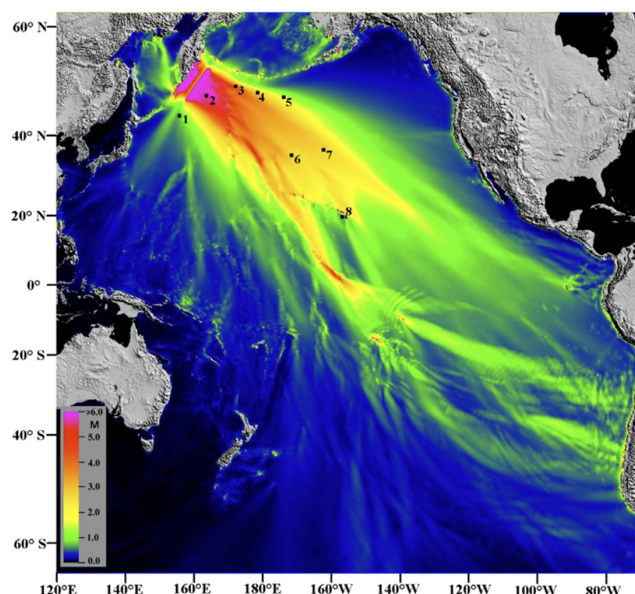


Рис. 10. Распределение максимумов высот волн во всей расчетной области после 36 часов распространения цунами от очага, расположенного около полуострова Камчатка. Черными квадратиками с номерами отмечено расположение некоторых глубоководных регистрирующих станций системы DARTS

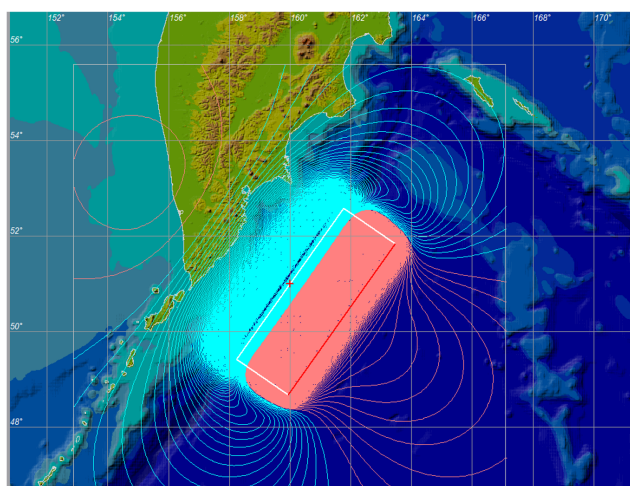


Рис. 11. Местоположение эпицентра (отмечено маленьким красным крестом) и изолинии вертикального смещения донной поверхности в результате землетрясения магнитудой 9.0 около полуострова Камчатка. Красные изолинии показывают область поднятия, а голубые — область отрицательного смещения дна. Прямоугольником показана проекция плоскости разрыва в Земной коре

Оно берется в качестве начальных условий для численного моделирования по модели мелкой воды (1). На рис. 12 показано положение волны цунами через 7200 сек после ее генерации, а также местоположение некоторых регистраторов уровня океана системы DARTS.

Из рис. 12 видно, что к этому моменту времени волна прошла над регистраторами 1-4 и приблизилась к DART-станции номер 5. В регистратор #2, расположенный ближе других к очагу цунами,

волна вступила на 240-й секунде, а окончание полного первого периода зафиксировано на 2800-й секунде. Соответственно, в регистратор #3 волна вступила на 1960-й секунде, а ее первый период завершился на 3600-й секунде. Регистратором #1, расположенным сбоку от очага, вступление цунами зарегистрировано на 1088-й секунде, а момент окончания полного первого периода волны наступил на 2624-й секунде после начала моделирования. При этом в отличие от регистраторов 1 и 2 здесь волновой сигнал начинается с отрицательной фазы. После прохода реальной волны цунами над DART-станциями 2, 3 и 1 можно сравнить реальные и вычисленные мареограммы и провести коррекцию положения очага и величины начального смещения в очаге. Можно это делать при проходе цунами над каждым последующим регистратором и затем в течение 1–2 минут повторять численное моделирование с подкорректированным очагом.

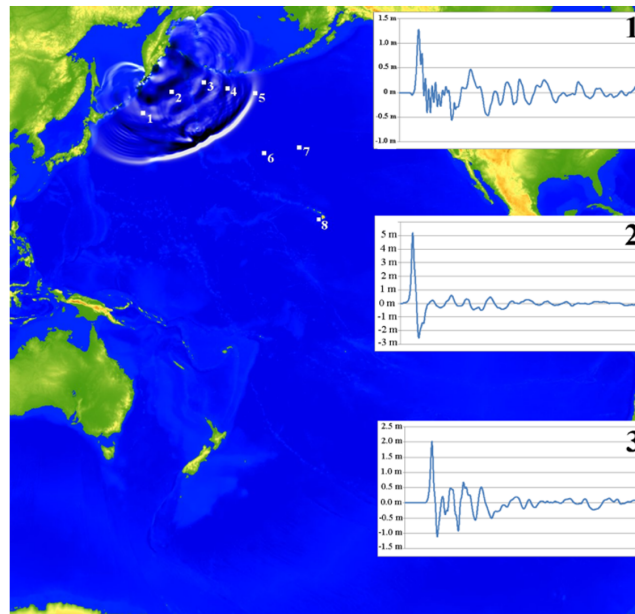


Рис. 12. Положение волнового фронта в момент времени 7200 сек. В правой части рисунка приведены рассчитанные мареограммы от 0 до 30000 сек в точках установки регистраторов #1–3

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomas D., Howes L., Luk W. A Comparison of CPUs, GPUs, FPGAs, and MPPAs for Random Number Generation. *Proc. of FPGA*. 2009.
2. Wei Y., Chamberlin C., Titov V. V. et al. Modeling of the 2011 Japan Tsunami: Lessons for Near-Field Forecast. *Pure Appl. Geophys.* 2012;170(6–8):1309–1331. DOI: 10.1007/s00024-012-0519-z.
3. National Data Buoy Center. Режим доступа: <https://www.ndbc.noaa.gov/obs.shtml>.
4. DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis). Режим доступа: <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/>.
5. Research and Development Center for Earthquake and Tsunami. Режим доступа: <https://www.jamstec.go.jp/donet/e/>.
6. S-net Scheme. Режим доступа: <https://www.seafloor.bosai.go.jp/S-net/>. (In Japanese)
7. S-net Coordinates. Режим доступа: https://www.seafloor.bosai.go.jp/st_info/. (In Japanese)
8. Titov V. V., Gonzalez F. I. Implementation and Testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) Model. *NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112*. NOAA: Washington, DC, USA; 1997.
9. Gica E., Spillane M., Titov V. et al. Development of the Forecast Propagation Database for NOAA's Short-Term Inundation Forecast for Tsunamis (SIFT). *NOAA Technical Memorandum*. NOAA: Washington, DC, USA; 2008. Режим доступа: https://nctr.pmel.noaa.gov/Pdf/brochures/sift_Brochure.pdf.
10. Wang X., Power, W. L. COMCOT: A Tsunami Generation Propagation and Run-Up Model. *GNS Science*. Lower Hutt City, New Zealand; 2011.
11. Shuto N., Goto C., Imamura F. Numerical Simulation as a Means of Warning for Near Field Tsunamis. *Coast. Eng. Jpn.* 1990;33:173–193.

12. Yalciner A. C., Alpar B., Altinok Y. et al. Tsunamis in the Sea of Marmara: Historical Documents for the Past, Models for Future. *Mar. Geol.* 2002;190:445–463.
13. Zaytsev A., Kurkin A., Pelinovsky E. et al. Numerical Tsunami Model NAMI_DANCE. *Sci. Tsunami Hazards.* 2019;38:151–168.
14. Lax P. D., Richtmyer R. D. Survey of the Stability of Linear Finite Difference Equations. *Commun. Pure Appl. Math.* 1956;9:267–293.
15. Liang Q., Hou J., Amouzgar R. Simulation of Tsunami Propagation Using Adaptive Cartesian Grids. *Coastal Engineering J.* 2015;57(4):150729195708001. DOI: 10.1142/S0578563415500163.
16. Lavrentiev M., Lysakov K., Marchuk An. et al. Fundamentals of Fast Tsunami Wave Parameter Determination Technology for Hazard Mitigation. *Sensors.* 2022;22:7630. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22197630>.
17. Stoker J. J. *Water Waves. The Mathematical Theory with Applications.* New York: Interscience Publishers; 1957.
18. Kowalik Z., Murty T. S. *Numerical Modeling of Ocean Dynamics.* World Scientific; 1993.
19. MacCormack R. W., Paullay A. J. Computational Efficiency Achieved by Time Splitting of Finite Difference Operators. *AIAA.* 1972:72–154.
20. Lavrentiev M., Lysakov K., Marchuk An. et al. Hardware/Software Solution for Low Power Evaluation of Tsunami Danger. *J. Low Power Electronics and Appl.* 2022;12(1):6. DOI: 10.3390/jlpea12010006.
21. Lavrentiev M., Marchuk An., Oblaukhov K. Low Power Computation of Transoceanic Wave Propagation for Tsunami Hazard Mitigation. *Ocean Modelling.* 2024;192(102459). DOI: 10.1016/j.ocemod.2024.102459.
22. Marchuk A. G. Estimating Tsunami Wave Height over a Sloping Bottom in the Ray Approximation. *Numerical Analysis and Applications.* 2015;8(4):304–313.
23. Lavrentiev M., Marchuk An., Oblaukhov K. et al. Comparative Testing of MOST and Mac-Cormack Numerical Schemes to Calculate Tsunami Wave Propagation. *Journal of Physics: Conference series.* 2020;1666(1):012028. DOI: 10.1088/1742-6596/1666/1/012028.
24. *GEBCO Homepage.* Режим доступа: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/.
25. *NOAA National Centers for Environmental Information.* Режим доступа: <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model#>, last accessed 2024/09/15.
26. Smith W. H. F., Sandwell D. T. Conventional Bathymetry, Bathymetry from Space, and Geodetic Altimetry. *Oceanography.* 2004;17(1):8–3. DOI: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2004.63>.
27. *Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego.* Режим доступа: https://topex.ucsd.edu/WWW_html/srtm30_plus.html.
28. *JODC Data On-line Service System.* Режим доступа: https://www.jodc.go.jp/vpage/depth500_file.html.
29. Lavrentiev M., Lysakov K., Marchuk An. et al. FPGA Based Tsunami Wave Propagation Calculator. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;1789(1):012011.