

### Список литературы

1. *Жариков В.А.* Основы физико-химической петрологии. М.: Изд. МГУ, 1976. 420 с.
2. *Жариков В.А.* Основы физической геохимии. М.: Изд. МГУ, 2005. 654 с.
3. *Коржинский Д.С.* Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1969. 109 с.
4. *Равич М.И.* Водно-солевые системы при повышенных температурах и давлениях. М.: Наука, 1974. 151 с.
5. *Encheva S.* Zeolitized inclusions in trachyrhyolitic spheruloids of the perlite deposit Golobradovo (Studen Kladenets Oligocene volcano, Eastern Rhodopes) / *S. Encheva, Y. Yanev* // VII International Symposium «Mineral diversity: research and preservation». 11–14 October 2013. Earth and Man National Museum, Sofia. 2015. pp. 177–184.
6. *Kennedy G.C.* The upper three – phase region in the system  $\text{SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  / *G.C. Kennedy, G.J. Wasserburg, H.C. Heard et al.* // J. Amer. Sci. 1962. V. 260, № 7. pp. 501–521.

УДК 519.684.4+550.394.2

### PC based fast numerical modeling

**Mikhail Lavrentiev<sup>1,2</sup>, Andrey Marchuk<sup>1,3</sup>, Konstantin Oblaukhov<sup>1</sup>, Alexey Romanenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia  
lavrentiev@iae.nsk.su*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

<sup>3</sup>*Institute of Computational Mathematics & Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

In the presented paper on a number of examples from the field of the Earth Sciences we show the possibility of a significant acceleration of numerical calculations based on a personal computer (PC) through the use of modern graphic processors (Graphic Processing Unit – GPU) and reconfigurable microchips (Field Programmable Gates Array – FPGA). The focus is given to the calculation of the propagation of the tsunami wave. It was possible to achieve an acceleration of the code execution by about 300 times in comparison with the PC, which gives grounds to speak about obtaining a reasonable forecast of the danger of a tsunami wave on the protected coastal areas within minutes after the seismic event. This is especially important in the case of near-field events, when a destructive wave can reach the coast 20–30 minutes after an underwater earthquake.

**Keywords:** code acceleration, field programmable gates array, tsunami wave

### Быстрое численное моделирование на базе персонального компьютера

**М.М. Лаврентьев<sup>1,2</sup>, А.Г. Марчук<sup>1,3</sup>, К.К. Облаухов<sup>1</sup>, А.А. Романенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup>*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

В работе на ряде примеров из области наук о Земле показана возможность существенного ускорения расчетов на базе персонального компьютера (ПК) за счет применения современных графических процессоров (Graphic Processing Unit – GPU) и вентиляемых матриц программируемых пользователем (Field Programmable Gates Array – FPGA). Наибольшее внимание уделено расчету распространения волны цунами. Удалось достигнуть ускорения счета примерно в 300 раз по сравнению с ПК, что дает основание говорить о получении обоснованного прогноза опасности волны цунами на защищаемых участках побережья уже через минуты после сейсмического события. Это особенно важно в случае событий ближней зоны, когда разрушительная волна может достигать побережья спустя 20–30 минут после подводного землетрясения.

**Ключевые слова:** ускорение расчетов, вентильные матрицы программируемые пользователем, волна цунами

## Введение

Уже достаточно долгое время продолжается стремительный рост производительности вычислительных систем. Современных суперкомпьютеры делают возможным численное исследование все более детальных моделей физических процессов. Однако, очень часто требуется оценить параметры решения (изучаемой среды или физического явления) в полевых условиях или рассмотреть различные варианты на рабочем месте, чтобы впоследствии рационально использовать ресурс суперкомпьютерной системы, за который, как правило, следует платить. В состав современного персонального компьютера (ПК) или ноутбука входит так называемый графический ускоритель, который сам по себе уже имеет значительную вычислительную мощность. Вычислительная мощность графических процессоров (GPU) достигается за счет большого количества вычислительных элементов и специальной архитектуры (SIMD – Single Instruction Multiple Data – в классификации Флинна). Целесообразно использовать эти возможности.

Если вычислительный алгоритм допускает параллельное исполнение, использование потенциала GPU может существенно ускорить процесс вычислений. Еще более высокой производительности можно добиться за счет использования специализированного вычислителя на базе вентильных матриц программируемых пользователем (FPGA), где на языке программирования высокого уровня фактически задается архитектура вычислительного устройства.

## Технические характеристики GPU и достигнутое ускорение на модельных задачах

На текущий момент существуют как рабочие станции (до 4 графических процессоров на борту), так и стоечные варианты с 8-ью графическими процессорами (сервера DGX).

Некоторые параметры графических процессоров приведены в таблице ниже.

Таблица 1. Основные параметры современных GPU компании Nvidia – лидера отрасли

Параметр	Модель			
	V100-PCIe	V100-SXM2	A100-PCIe	A100-SXM4
Число ядер	5120	5120	7936	7936
<b>Пиковая производительность</b>				
<b>FP64</b>	7 TF	7.8 TF	9.7 TF	9.7 TF
<b>FP64 Tensor core</b>			19.5 TF	19.5 TF
<b>FP32</b>	14 TF	15.7 TF	19.5 TF	19.5 TF
<b>FP32 Tensor core</b>	112 TF	125 TF	156 TF	156 TF
<b>Память (GB)</b>	16/32	16/32	40	40/80

На сегодня существует несколько сотен пакетов и библиотек с открытым исходным кодом, адаптированных для использования с GPU (см., например, «GPU-ACCELERATED APPLICATIONS» на сайте <https://images.nvidia.com/aem-dam/Solutions/Data-Center/tesla-product-literature/gpu-applications-catalog.pdf>). В зависимости от типа проблемы сообщается о приросте производительности от десятков до сотен раз. Нижеприведенные примеры являются практическими задачами в области наук о Земле.

Сейсмические данные, получаемые в полевых условиях, имеют большой объем, (несколько терабайт и более), данные зашумлены и пр. Применение преобразование Фурье на нерегулярных сетках – один из алгоритмов, используемых в предобработке данных. С его помощью можно производить сжатие данных, их фильтрацию, заполнение пробелов и пр. Реализованные на GPU прямое и обратное преобразование Фурье позволило в 40 и более раз ускорить процесс предобработки сейсмических данных (Nikitin et al, 2013). В реальной жизни для редких задач удается найти аналитическое решение. Попытка получить такое решение для задачи распространения волн была предпринята в ИНГиГ СО РАН. Задача была сведена к перемножению очень больших матриц (в миллионы элементов по главной

диагонали). Перенесение алгоритма на графический процессор позволило решать подобного рода задачи за адекватное время (Zyatkov et al, 2013).

### Свойства FPGA

Вентильные матрицы программируемые пользователем (ВМПП) используются для различных задач начиная с 1990-х годов. Первоначально наибольшее применение нашли вариации ВМПП – программируемых логических матриц (ПЛМ – PLD/CPLD), которые успешно применялись для решения небольших задач по разработке автономных устройств и контроллеров, имеющих малое энергопотребление и масса-габаритные размеры. Значительное увеличение количества логических элементов и возможность перепрограммирования стало возможным при появлении FPGA (Field-Programmable Gate Array), позволяющих реализовывать трудоемкие математические алгоритмы обработки данных, а также выполнять прототипирование вычислительных устройств (в том числе процессоров CPU и GPU) для дальнейшего производства серийных заказных микросхем ASIC.

Появившаяся несколько лет назад технология High-Level Synthesis (HLS) позволяет использовать для описания цифровых схем C-подобный язык. Это является новым витком развития в способах создания различных вычислительных устройств, обеспечивающим полный цикл: от описания архитектуры до верификации проекта с использованием различных средств моделирования. HLS представляет собой автоматизированный процесс проектирования, который интерпретирует алгоритмическое описание поведенческой модели и позволяет создавать цифровые устройства, которые четко реализуют заданные условия. С помощью HLS можно легко изменять параметры конвейера, подстраиваясь под временные (timing) или пространственные (utilization) требования. Технология HLS позволяет производить верификацию программного кода до его преобразования в схему для конкретной микросхемы FPGA.

Именно технология HLS и большие ресурсы современных микросхем FPGA позволяет сегодня применять их для решения новых типов задач в различных областях приложений. Современные микросхемы программируемой логики FPGA обеспечивают параллельное исполнение до сотен тысяч одновременных потоков, при этом объем внутренней памяти достигает сотен МБ, позволяя строить достаточно широкие и глубокие вычислительные конвейеры.

### Спецвычислитель для расчета распространения волны цунами

В случае подводного землетрясения у побережья Японии волна цунами достигает ближайшей точки побережья уже примерно через 20 минут, что накладывает жесткие ограничения на время моделирования. Математически процесс хорошо описывается системой уравнений мелкой воды (Titov, Gonzalez, 1977). Для ускорения решения системы по схеме МакКормака (Lavrentiev et al, 2021) был спроектирован аппаратный вычислитель (спецпроцессор) на базе FPGA Xilinx Virtex-7 VC709 (Lavrentiev et al, 2017). Ниже представлены блок-схема спецпроцессора (Рис. 1) и общий вид печатной платы (Рис. 2).

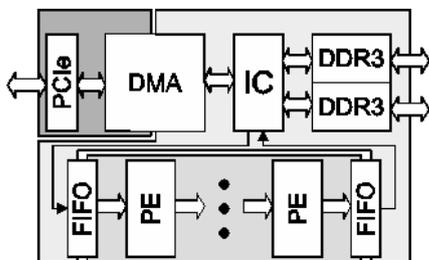


Рисунок 1 – Архитектура спецпроцессора



Рисунок 2 – Общий вид печатной платы для работы в составе ПК

### Тестирование

Сравнение с известными точными решениями системы уравнений мелкой воды в случае плоского наклонного (Marchuk, 2015) и параболического дна, а также с программным пакетом MOST (Method Of Splitting Tsunami – официальный инструмент Центров

предупреждения о цунами США) показал как хорошую точность (Рис. 3), так и высокое быстродействие предложенного метода (Lavrentiev et al, 2021).

В численном эксперименте (см. Рис. 4) использовался модельный источник цунами протяженностью 500 км что по порядку очагам цунами 1952 года у берегов Камчатки и 2011 года у побережья Японии, но амплитуда у этого источника принимается равной + 200 см. Численное моделирование на расчётной сетке  $3120 \times 2400$  узлов показывает, что основная волна приближается к ближайшему берегу приблизительно через 1600 секунд после землетрясения. Расчет распределения максимальной высоты вдоль всей рассматриваемой береговой линии занимает всего несколько секунд, всего лишь 5,98 сек. для микрочипа VC709. Прирост производительности, достигаемый предлагаемым калькулятором FPGA, почти в 250 раз по сравнению с программным обеспечением MOST.

### Заключение

Как показывают приведенные примеры, при решении отдельных задач за счет применения аппаратного ускорения расчетов (а именно архитектур GPU или FPGA) можно достигнуть «суперкомпьютерной производительности» при использовании персонального компьютера.

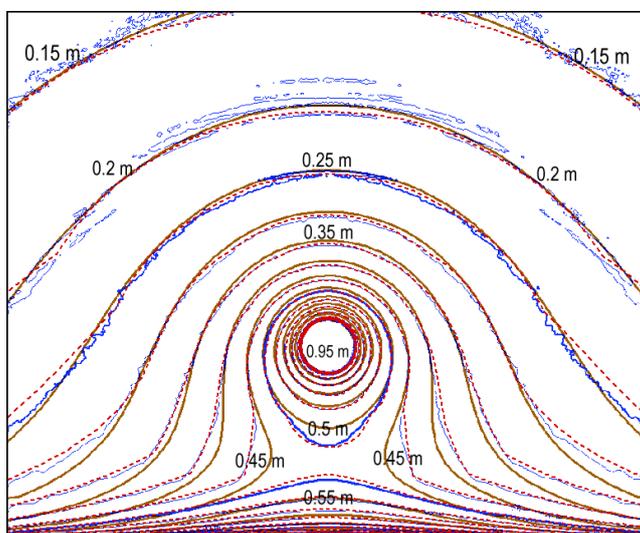


Рисунок 3 – Изолинии максимальных высот волны: точное решение системы мелкой воды (коричневый), результат использования спецвычислителя (красный) и MOST (голубой)

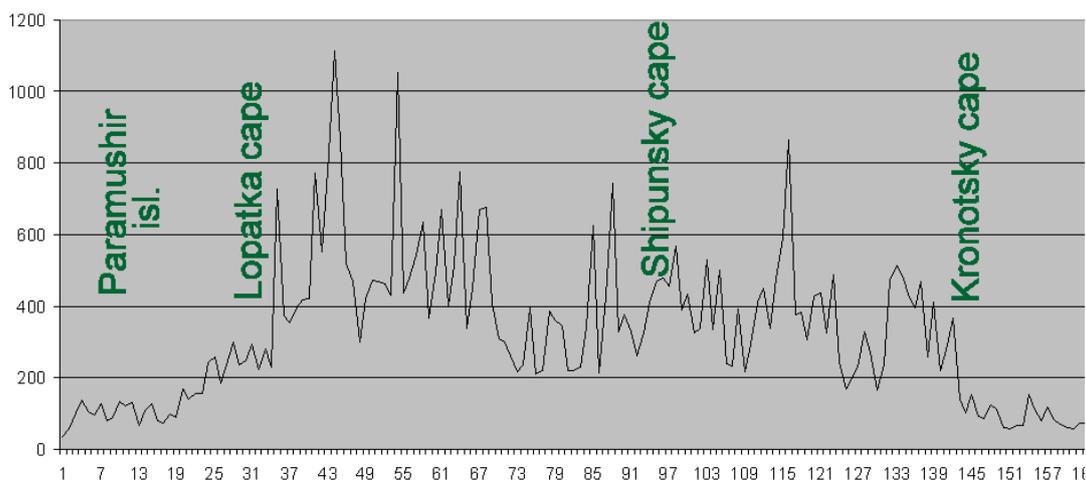


Рисунок 4 – Распределение максимумов волн цунами (в сантиметрах) вдоль побережий северных Курилы и Камчатки, полученное с помощью Спецвычислителя на базе FPGA

### Список литературы

1. *Lavrentiev M.* Hardware Acceleration of Tsunami Wave Propagation Modeling in the Southern Part of Japan / *M. Lavrentiev, K. Lysakov, An. Marchuk et al.* // Applied Sciences. 2020. 10 № 12. pp. 4159.
2. *Lavrentiev M.* FPGA Based Solution for Fast Tsunami Wave Propagation Modeling / *M. Lavrentiev, A. Romanenko, K. Oblaukhov et al.* // Proc. 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, 25–30 June, San Francisco, California, 2017. pp. 924–929.
3. *Marchuk A.G.* Estimating Tsunami Wave Height over a Sloping Bottom in the Ray Approximation / *A.G. Marchuk* // Numerical Analysis and Applications. 2015. V. 8, № 4. pp. 304–313.
4. *Nikitin V.V.* Parallel algorithm of 3D wave decomposition and its application in geoscience / *V.V. Nikitin, A. A. Duchkov, A.A. Romanenko, F. Anderson* // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11. № 1. С. 93–104.
5. *Titov V.V.* Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model / *V. V. Titov, F. I. Gonzalez* // NOAA Technical Memorandum ERL PMEL–112, 1977.
6. *Zyatkov N.* Highly-optimized TWSM Algorithm for Modeling Cascade Diffraction in Terms of Propagation-absorption Matrices / *N. Zyatkov, A. Ayzenberg, A. M. Aizenberg, A. Romanenko* // Extended Abstracts, 75th Conference and Exhibition, European Association of Geoscientists & Engineers, London, England, 10–13 June 2013, Th-P02–11 /

УДК 622.032

## Estimation of well efficiency in the par-lift extraction of coolant at the Mutnovsky field (Kamchatka) during the development of deep horizons

Alexander Shulyupin<sup>1</sup>, Alexey Lyubin<sup>2</sup>, Ivan Chernev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Mining Institute FEB RAS, Khabarovsk, Russia  
ans714@mail.ru*

<sup>2</sup>*Kamchatskenergo PJSC branch Renewable energy, Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia  
Lyubin-AA@kamenergo.ru, Chernev-II@kamenergo.ru*

During the development of the Mutnovsky geothermal field (Kamchatka), which is a key object of the Russian geothermal energy, problems were discovered related to a decrease in pressure in the reservoir that feeds the production wells, which leads to the withdrawal of the wells from operation. This paper predicts the productivity of planned drilling wells, 3 and 4 km deep, to develop the deeper horizons of the Mutnovsky field. Forecast results were compared with data from a typical production well with a depth of 2 km. The comparison showed the promise of development of deeper horizons of the field. In particular, a significant increase in the flow rate of steam produced by a single well is expected (2,3 and 3,1 times by wells 3 and 4 km, respectively, compared to a typical 2 km well). It is also expected that a significant increase in the rate of geothermal energy production due to increasing the allowable reduction of pressure (depression) in the reservoir (2,7 and 4,8 times, respectively, by wells 3 and 4 km, compared with the type well 2 km) and involvement in the heat supply of the additional arrays of rocks that contains the produced fluid.

**Keywords:** geothermal field, geothermal reservoir, production well, par-lift, allowable depression in the reservoir, fluid, steam, water-steam mixture