

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ВСЛЕДСТВИЕ ПРОРЫВА ПЛОТИНЫ ВОЛЖСКОЙ ГЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ MPI-OpenMP-CUDA

T.A. Дьяконова, С.С. Храпов, Е.О. Агафонникова
Волгоградский государственный университет
г. Волгоград, Россия, e-mail: infomod@volsu.ru

COMPUTER SIMULATION THE DYNAMICS OF FLOODING IN THE VOLGA-AKHTUBA FLOODPLAIN BECAUSE OF THE VOLZHSKY HYDROELECTRIC DAM BREAK OF THE USE PARALLEL COMPUTING TECHNOLOGIES MPI-OpenMP-CUDA

T.A. Dyakonova, S.S. Khrapov, E.A. Agafonnikova
Volgograd state university
Volgograd, Russian Federation, e-mail: infomod@volsu.ru

Abstract. The potential problem Volzhsky hydroelectric dam break is considered. A numerical model based on cSPH-TVD method using parallel technology was build. Numerical calculations are carried for the dynamics of development and consequences of flooding in the Volga-Akhtuba floodplain.

Введение

Методы математического моделирования динамики поверхностных вод в приближении мелкой воды позволяют решать широкий круг задач, связанный с прогнозом и управлением гидрологического режима на заданной территории с учетом разливов рек и озер [Воеводин, 2009], осадков [Кивва, 2001], взаимодействия русского и пойменного потоков [Егоров, 2009], аварийных ситуаций на гидрооборужениях [Еремин, 2006], возникновением и динамикой цунами [Шокин. 1989], формированием погоды вблизи крупных водоемов, морскими [Чикин, 2001] и океаническими движениями [Педлоски, 1984].

Плотины на реках представляют собой потенциальную угрозу территориям, расположенным вниз по течению, поэтому задача прогноза последствий затопления в случае чрезвычайных (аварийных) ситуаций на гидрооборужениях является актуальной и жизненно необходимой при разработке планов застройки и эвакуации населения при возникновении ЧС.

В данной работе описана математическая модель с учетом различных физических факторов и ее численная реализация. Представлены результаты моделирования динамики затопления территории вследствие аварии плотине Волжской ГЭС.

Математическая модель

Динамика поверхностных вод данной задачи описывается в рамках модели мелкой воды (рисунок 1), поэтому при моделировании используются уравнения Сен-Венана [Еремин, 2006], которые получаются после усреднения исходных трехмерных уравнений гидродинамики по вертикальной координате. Для искомых величин $H(x, y, t)$, $u_x(x, y, t)$, $u_y(x, y, t)$ имеем:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Hu_x}{\partial x} + \frac{\partial Hu_y}{\partial y} = q, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_y, \quad (3)$$

где H – глубина жидкости, u_x , u_y – горизонтальные компоненты вектора скорости \mathbf{u} , усредненные по вертикальной координате, g – ускорение свободного падения, $\eta = H + b$ – уровень свободной поверхности жидкости, $b(x, y)$ определяет рельеф местности, f_x , f_y – горизонтальные компоненты вектора \mathbf{f} внешних и внутренних сил, действующих на слой жидкости [Храпов, 2010]. Для вектора \mathbf{f} имеем:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}^{frict} + \mathbf{f}^{Cor} + \mathbf{f}^{wind} + \mathbf{f}^{visc}, \quad (4)$$

здесь $\mathbf{f}^{frict} = -\frac{\lambda}{2}\mathbf{u}|\mathbf{u}|$ – сила придонного трения, $\lambda = \frac{2g n_M^2}{H^{4/3}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, n_M – шероховатость по Маннингу ($n_M \approx 0.01 \div 0.1$) [Khrapov, 2013], $\mathbf{f}^{Cor} = 2[\mathbf{u} \times \boldsymbol{\Omega}]$ – сила Кориолиса, $\boldsymbol{\Omega}$ – угловая скорость вращения Земли, $\mathbf{f}^{wind} = C_a \frac{\rho_a}{\rho H} (\mathbf{w} - \mathbf{u}) |\mathbf{w} - \mathbf{u}|$ – сила ветра, C_a – параметр характеризующий состояние водной поверхности, ρ_a и ρ – плотность воздуха и воды соответственно, \mathbf{w} – вектор скорости ветра в горизонтальном направлении, $\mathbf{f}^{visc} = \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right)$ – сила внутреннего (вязкого) трения, ν – коэффициент кинематической турбулентной вязкости ($\nu \leq 100$ м/с²).

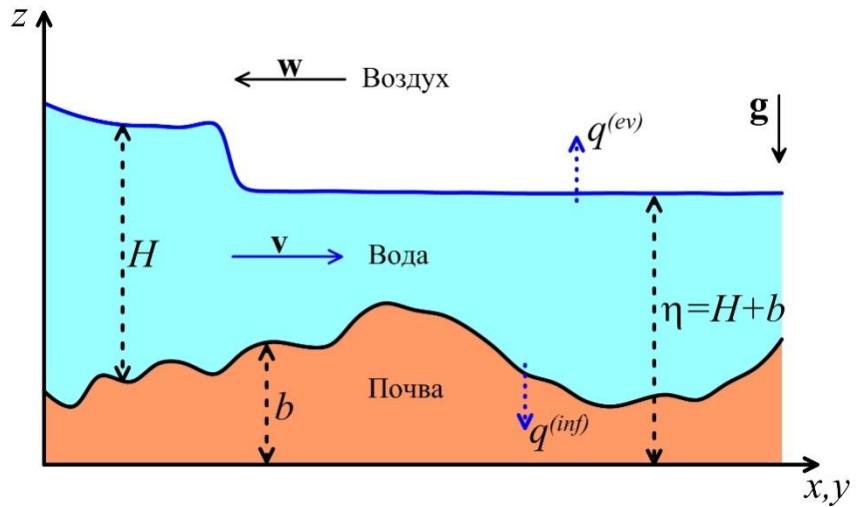


Рисунок 1 – Схема, поясняющая обозначения математической модели

В уравнении непрерывности для тонкого слоя (1) присутствует параметр q , который характеризует скорость притока/оттока воды за счет действующих источников/стоков. Для q в общем случае имеем:

$$q = q^{(s)} + q^{(r)} - q^{(inf)} - q^{(ev)}, \quad (5)$$

где $q^{(s)} = \frac{\partial Q}{\partial S}$ – приток воды через плотину, $Q(t)$ – гидрограф попуска или зависимость скорости

сброса воды (м³/с) от времени [Писарев, 2013], S – площадь источника сброса, $q^{(r)}(t)$ – приток воды, обусловленный осадками, $q^{(inf)}(x, y, t)$ и $q^{(ev)}(t)$ – отток воды за счет инфильтрации в почву и испарения соответственно. Указанные источники/стоки зависят от температуры воздуха, температуры воды, влажности воздуха, облачности, глубины промерзания почвы, насыщенности влагой грунта и его температуры.

В данной работе рассматривается нелинейная модель инфильтрации воды в почву, которая более адекватно моделирует процесс впитывания воды [Храпов, 2012]. В предлагаемой модели величина $q^{(inf)}$, входящая в соотношение (5), определяется следующим образом

$$\begin{cases} q^{(inf)} = q_*^{(inf)} (1 - \alpha) \frac{H}{H_*}, \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{q^{(inf)}}{\psi H_l} - \frac{\alpha}{\tau_l}, \end{cases} \quad (6)$$

здесь $q_*^{(inf)}$ – скорость впитывания воды толщиной слоя H_* в сухую почву, $\alpha = V_w/V_l$ – коэффициент влагонасыщенности почвы, V_w – объем воды содержащийся в почвенном покрове с объемом V_l , ψ – пористость почвы, τ_l – характерное время осушения почвы за счет испарения и инфильтрации воды в подпочвенный слой с малой пористостью (глина).

Численная схема

Численное решение системы (1) – (3) строится на декартовой сетке с числом ячеек $N_x \times N_y$. Размер ячейки $\Delta x \times \Delta y$ определяет погрешность расчета и выбирается исходя из качества рельефа $b(x, y)$, которую будем называть также функцией рельефа. Характерной особенностью рассматриваемой задачи является сложный характер рельефа, имеющий многочисленные нерегулярные и даже разрывные участки. Это предъявляет особые требования к численным алгоритмам интегрирования уравнений мелкой воды.

Основу алгоритма образует оригинальный численный метод, основанный на совместном использовании TVD- и SPH-подходов [Храпов, 2011], важной особенностью которого является устойчивый сквозной счет для нестационарной границы типа «вода – сухое дно». Реализованный численный алгоритм обеспечивает второй порядок точности интегрирования по времени и второй порядок точности по пространственным координатам. Численная схема является консервативной и хорошо сбалансированной [Храпов, 2011].

Оптимизация

В рассматриваемой задаче моделирование проводится на протяженной территории со сложной структурой, где области, занятые водой, занимают небольшую часть. Для повышения эффективности вычислений на таких участках целесообразным является использование иерархической системы пространственных сеток разных масштабов. Такой подход последовательно описывает динамику жидкости от мелких масштабов до наиболее крупных с неравномерно распределенными источниками (рисунок 2).

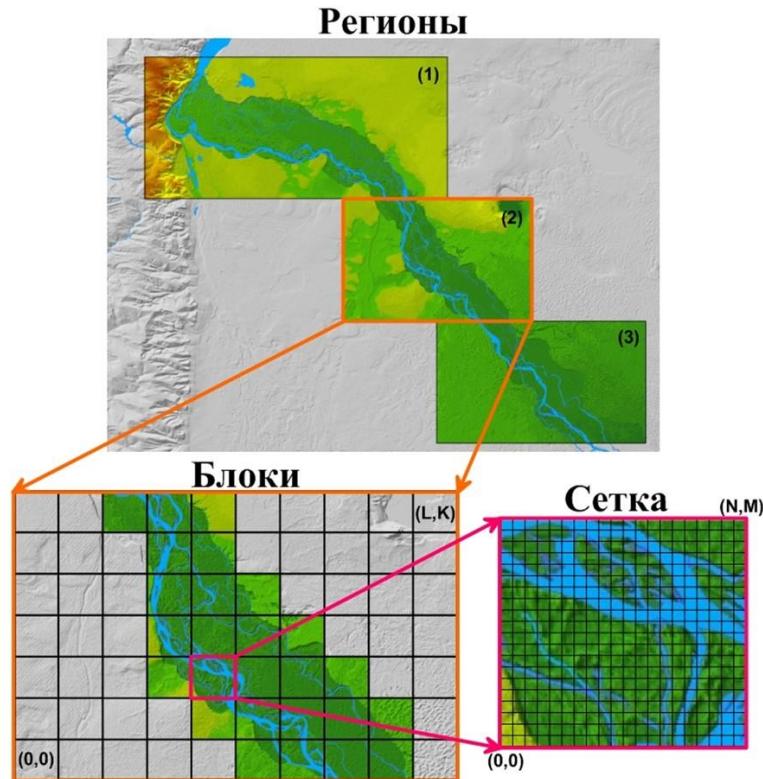


Рисунок 2 – Иерархическая система сеток разных масштабов

Параллельные технологии

Ключевым моментом в моделировании и прогнозировании ЧС является своевременное получение информации для дальнейших действий по предотвращению или устраниению последствий. По этой причине в компьютерном моделировании подобных задач необходимо использовать параллельные технологии для увеличении скорости вычислений. Наиболее перспективная в этой области – технология CUDA, позволяющая проводить вычисления на графических процессорах ускорителей GeForce.

Использование подхода иерархической системы сеток (ИСС), описанного выше, хорошо адаптируется под вариант программы для GPU, поскольку в соответствии с архитектурой CUDA выполнение вычислительных ядер организовано как сеть потоковых блоков (рисунок 3), которые являются аналогом блоков ИСС.

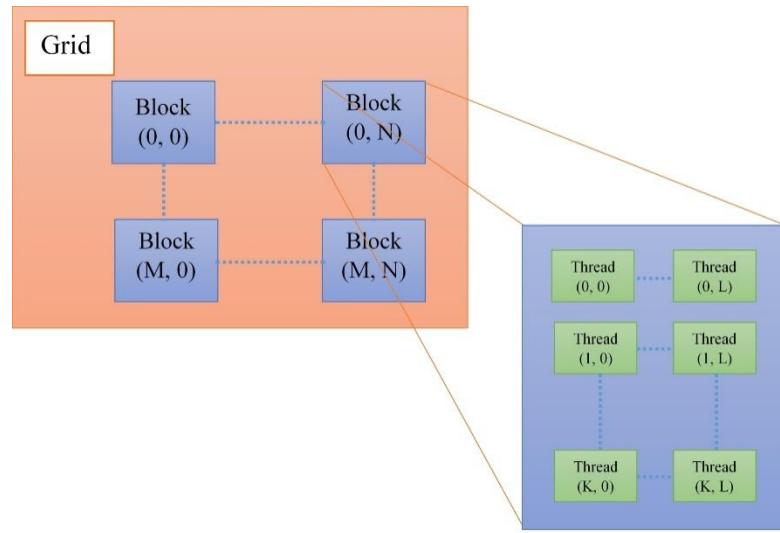


Рисунок 3 – Иерархия нитей на GPU

В настоящее время все большую популярность набирают гетерогенные вычислительные системы, которые состоят из многоядерных процессоров и массивно-параллельных ускорителей. Использование таких высокопроизводительных систем позволяет моделировать сложные физические процессы, которые требуют больших затрат ресурсов. Поэтому разработки приложений на таких системах используются схемы, основанные на сочетании различных параллельных технологий. Для суперкомпьютеров с различным числом GPU (количество графических ускорителей равно M) применяется двухуровневая параллельная модель OpenMP-CUDA, которая сочетает в себе принципиально разные типы параллелизма (рисунок 4). Поскольку при загрузке GPU в кластере используется отдельный поток, для таких машин удобно использовать технологию OpenMP совместно с CUDA. Для обмена данными между различными GPU без копирования на CPU используется доступ к памяти Direct Access, который влияет на повышение производительности.

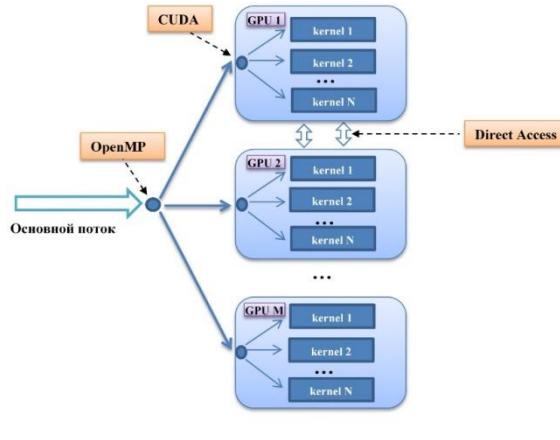


Рисунок 4 - Гибридная схема распараллеливания OpenMP-CUDA

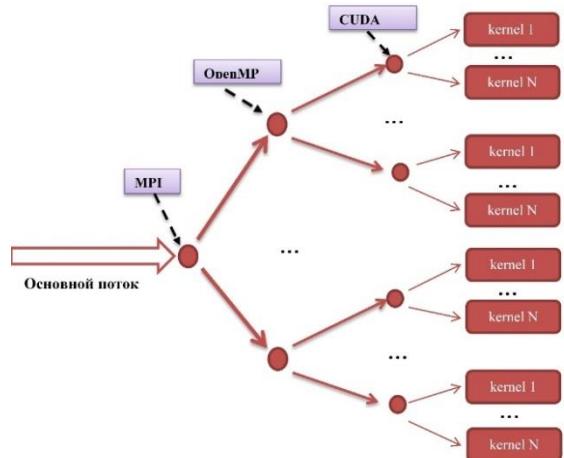


Рисунок 5 - Гибридная схема распараллеливания MPI-OpenMP-CUDA

Для распараллеливания программ на гетерогенных системах, содержащих несколько CPU и GPU используется трехуровневая модель, представленная на рисунке 5, которая сочетает в себе технологии MPI, OpenMP и CUDA. Применение гибридной схемы существенно ускоряет работу программ.

Численное моделирование прорыва разрушения плотины проводилось на CUDA-версии расчетного модуля, диаграмма деятельности которой представлена на рисунке 6.

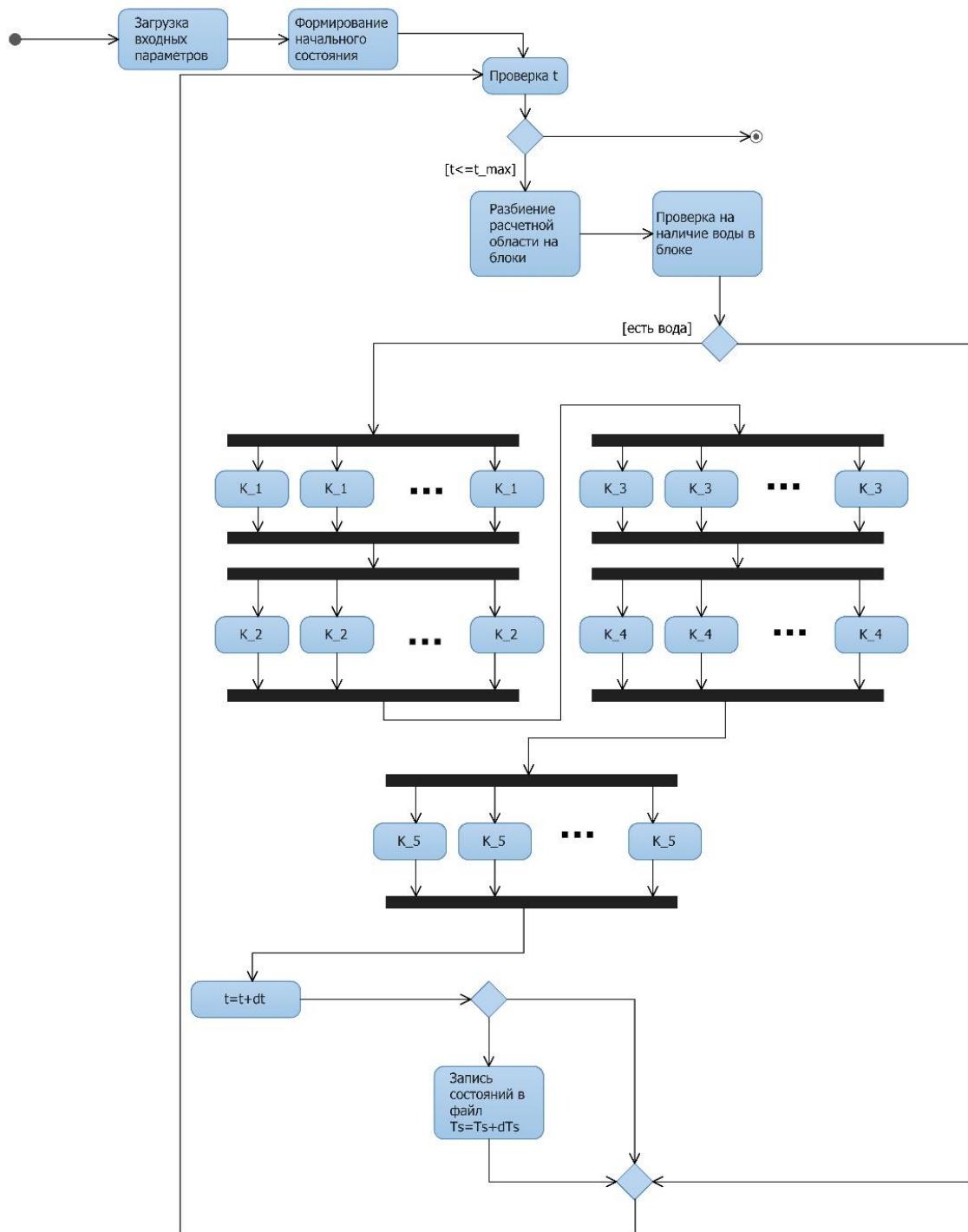


Рисунок 6 – диаграмма деятельности расчетного модуля

На диаграмме были использованы следующие обозначения:

- K_1 – расчет гидродинамических сил в момент времени t_n и шага по времени dt ;
- K_2 – расчет интегральных характеристик и положения частиц в момент времени $t_{(n+1)/2}$;
- K_3 – расчет гидродинамических сил в момент времени $t_{(n+1/2)}$;
- K_4 – расчет интегральных характеристик и положения частиц в момент времени $t_{(n+1)}$;
- Kernel 5 – вычисление потоков.

Расчетный модуль может запускаться на вычислительных системах с несколькими GPU с некоторыми изменениями в программе (рисунок 7).

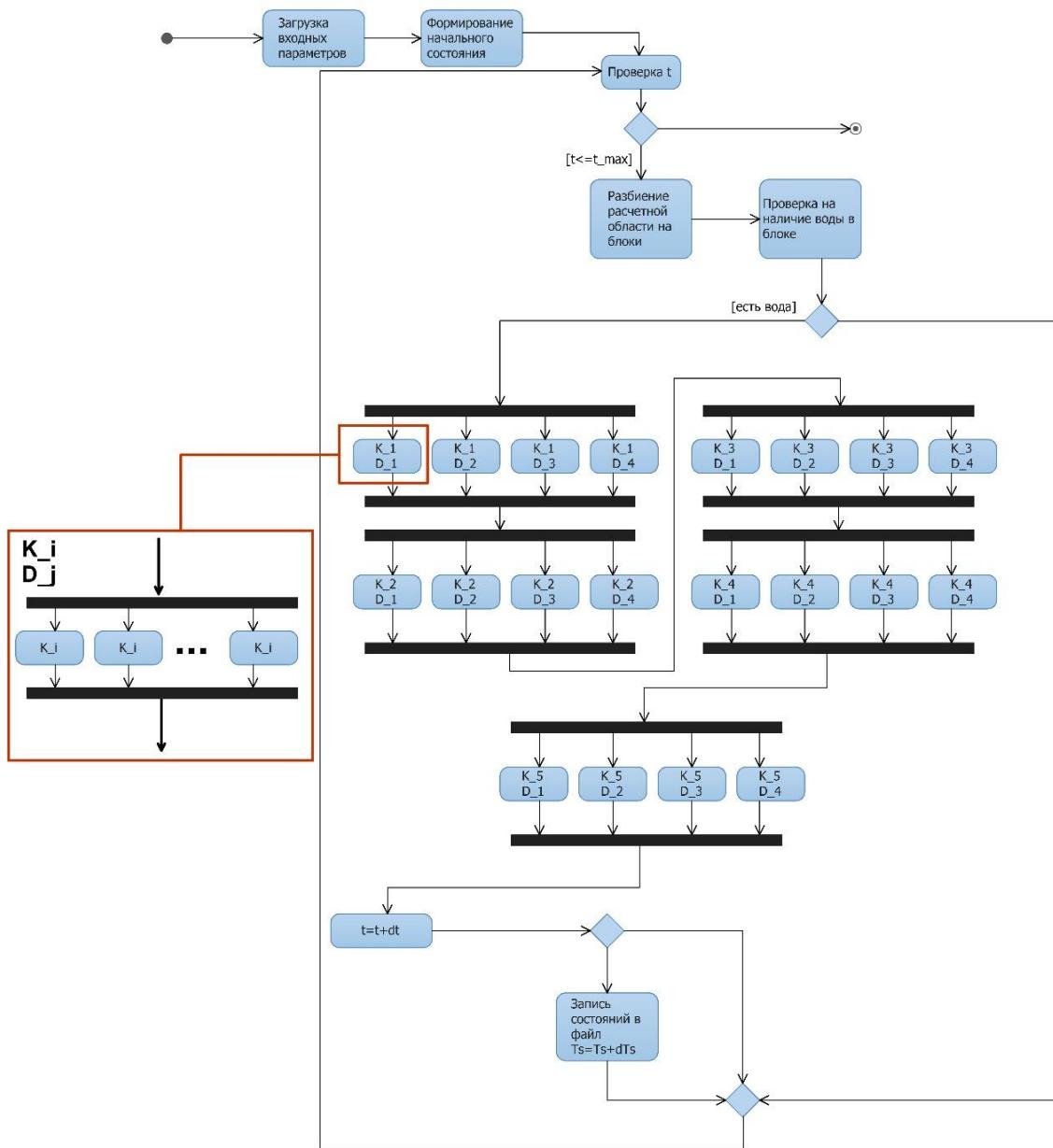


Рисунок 7 – диаграмма деятельности версии OpenMP-CUDA

Диаграмма представлена для вычислительной станции, содержащей 4 графических ускорителя. Обозначения D_1, D_2, D_3, D_4 соответствуют номеру GPU.

Постановка задачи

Волжская ГЭС является одной из крупнейших станций с большой мощностью. Она расположена в нижнем течении р. Волги, а южнее ГЭС находится г. Волгоград. В мире прорывы плотины на гидротехнических сооружениях происходит довольно редко, но все же такая угроза существует. В качестве примера можно привести аварию на Саяно-Шушенской ГЭС и это не единственный случай. Поэтому рассмотрение потенциальной задачи разрушения плотины Волжской ГЭС имеет практический интерес [Еремин, 2006].

Моделирование проводилось на территории Волго-Ахтубинской поймы. Для гидродинамического расчета ключевым моментом является определение функции рельефа $b(x, y)$, соответствующей реальной местности [Воронин, 2012]. Для построения сеточной функции $b_{i,j} = b(x_i, y_j)$ использовались три источника: данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); лотии дна; собственные данные GPS-измерений.

Основой функции рельефа являются спутниковые данные ASTER и SRTM, способные обеспечить разрешение до 20 м в плоскости Земли и до 1 м по вертикальной координате. Модель речного дна уточнялась по данным ложий. На основе GPS-измерений были добавлены протоки. На рисунке 8 представлена актуализированная цифровая модель рельефа Волго-Ахтубинской поймы.

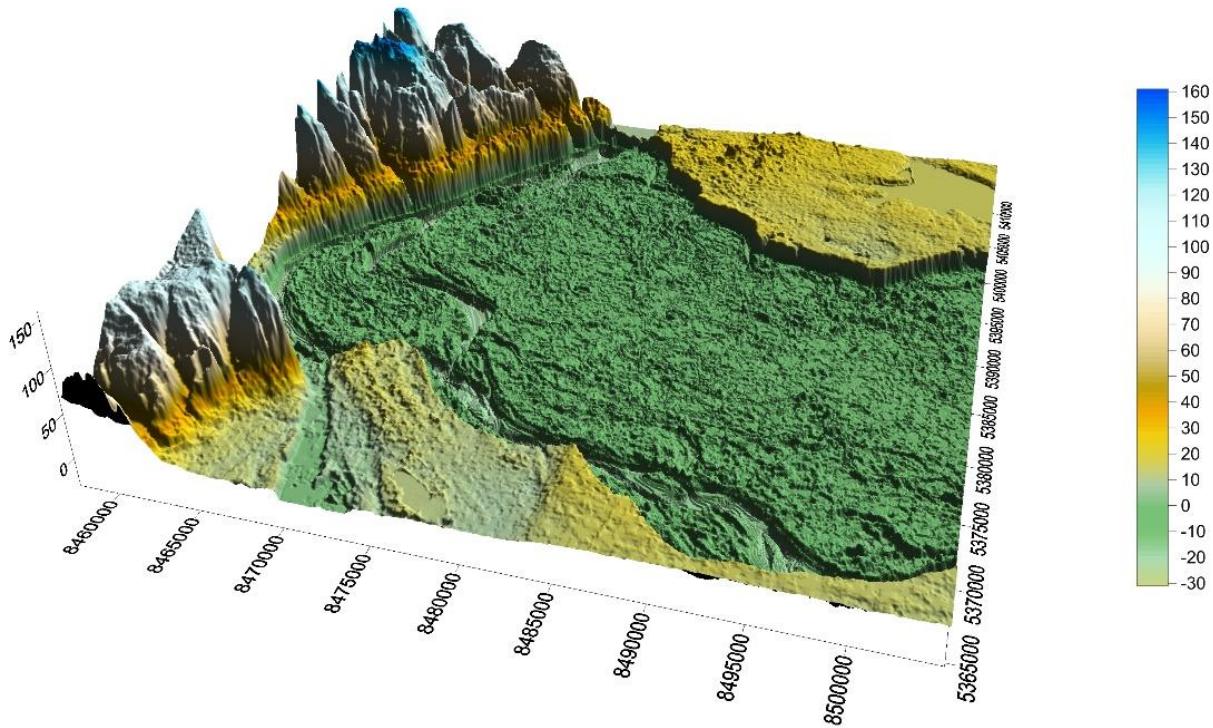


Рисунок 8 – Цифровая модель рельефа Волго-Ахтубинской поймы, шкала представлена в метрах

Результаты компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование проводилось с использованием программно-аппаратного комплекса «ЭкоГИС», позволяющего рассчитывать динамику поверхностных вод на обширной территории ($\sim 500 \times 500$ км) с хорошим разрешением ($\sim 10\text{--}20$ м). В состав «ЭкоГИС» входят: гибридная вычислительная станция на базе 4 графических ускорителей NVIDIA® TESLA Fermi C2070 6GB (1792 ядра); специализированная геоинформационная система «EcoGIS-Simulation»; параллельная CUDA-версии расчетного модуля для моделирования динамики поверхностных вод на основе алгоритма cSPH-TVD.

В качестве начального распределения воды и скорости течения выбрано гидрологическое состояние ВАП соответствующее пику паводка 2011 г. [Храпов, 2012]. Выбор такого состояния является наиболее неблагоприятным при возникновении ЧС. Как видно из рисунка, в первые минуты после прорыва формируется волна высотой 7–10 м (гидравлический скачок), которая распространяется сначала со скоростью 70 км/ч по руслу Волги, а затем из-за наличия уклона рельефа в сторону поймы, а также особенностей русла Волги происходит смещение направления основного потока в волне прорыва. Наиболее разрушительной волна прорыва оказывается для пойменного участка в окрестностях Красносльбодска и Средней Ахтубы. Глубина воды в момент прохода волны по данному участку составляет в среднем 7 м. Следует отметить, что данная территория наиболее плотно застроена и заселена. После выхода волны затопления на территорию поймы ее скорость заметно снижается и в среднем составляет 10–15 км/ч, а толщина слоя воды на затопленных участках в среднем равна 5 м.

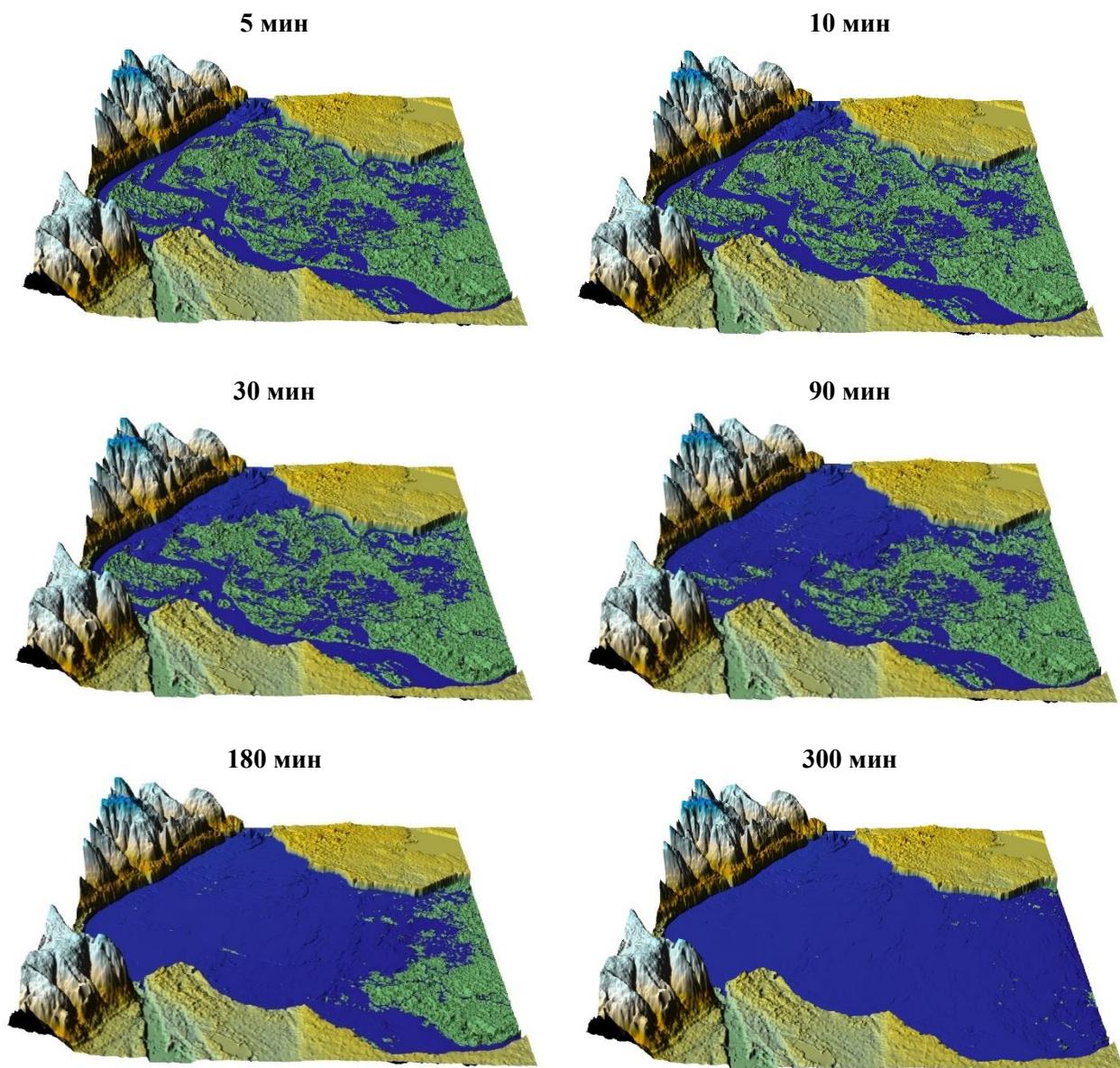


Рисунок 9 – Динамика затопления ВАП при аварийном сбросе (прорыве плотины) в различные моменты времени

Заключение

Полученная компьютерная модель позволяет прогнозировать последствия развития аварийных или катастрофических событий, а также подходит для проведения технической экспертизы гидросооружений. Результаты моделирования могут использоваться различными службами для принятия оперативных решений при чрезвычайных ситуациях.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-07-97056 р_поволжье_a, 13-01-97062 р_поволжье_a, 13-05-97065 р_поволжье_a, РГНФ 13-01-12015.

Библиографический список

1. Khrapov S.S., Pisarev A.V., Kobelev I.A., Zhumaliev A.G., Agafonnikova E.O., Losev A.G. and Khoperskov A.V. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage // Advances in Mechanical Engineering. Volume 2013, Article ID 787016, 11 pages.
2. Воеводин А. Ф., Никифоровская В.С., Виноградова Т.А. Математические модели для прогнозирования процесса распространения волн катастрофических паводков в системах открытых русел и водотоков // Вестник Санкт-Петербургского университета, Сер. 7, 2009, вып. 3, С. 139-144.
3. Воронин А.А., Елисеева М.В., Писарев А.В., Хоперсов А.В., Храпов С.С. Имитационные модели динамики поверхностных вод с использованием данных дистанционного зондирования: влияние рельефа местности // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2012, № 3(19), С. 54-62.
4. Егоров В.А. Численные расчеты вязких течений в модельных руслах с поймой // Математические заметки ЯГУ, 2009, Т. 15, Вып. 2, С. 92-105.
5. Еремин М.А., Хоперсов А.В. Компьютерная модель прорыва Волжской // Вестник Волгоградского государственного университета, Серия 1: Математика. Физика, 2006, Т.10, С. 139–142.
6. Кивва С.Л., Железняк М.И. Численное моделирование двумерного открытого потока с подвижными границами: расчеты стока на водосборе и наката волн цунами на берег // Вычислительные технологии, 2001, Т.6, ч.2, С.343–350
7. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика в 2-х т. М.: Мир, 1984, 806 с.
8. Писарев А.В., Храпов С.С., Агафонникова Е.О., Хоперсов А.В. Численная модель динамики поверхностных вод в русле Волги: оценка коэффициента шероховатости // Вестник Удмуртского университета. Математика. Компьютерные науки, 2013, N 1, С. 114-130.
9. Хоперсов А.В., Храпов С.С., Писарев А.В., Воронин А.А., Елисеева М.В., Кобелев И.А. Задача управления гидрологическим режимом в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма». Ч.1. Моделирование динамики поверхностных вод в период весеннего паводка // Проблемы управления, 2012, № 5, С. 18-25.
10. Храпов С.С., Писарев А.В., Воронин А.А., Дьяконова Т.А., Циркова Е.А. Особенности динамики затопления Волго-Ахтубинской поймы в зависимости от режимов испарения и инфильтрации // Вестник Волгоградского государственного университета, Серия 1: Математика. Физика, 2012, Т.16. 1, С. 43-47.
11. Храпов С.С., Хоперсов А.В., Еремин М.А. Моделирование динамики поверхностных вод: Монография. – Волгоград: Издательство Волгоградского государственного университета, 2010, 132 с.
12. Храпов С.С., Хоперсов А.В., Кузьмин Н.М., Писарев А.В., Кобелев И.А. Численная схема для моделирования динамики поверхностных вод на основе комбинированного SPH-TVD-подхода // Вычислительные методы и программирование. 2011, Т. 12, №1, С. 282-297.
13. Храпов С.С., Хоперсов А.В., Писарев А.В., Кобелев И.А. Геоинформационная система для прогноза сезонных затоплений // ИнтерКарто-ИнтерГИС 18 : материалы Международной конференции, Россия, Смоленск, 26-28 июня 2012. — 2012, С. 386-394.
14. Чикин А.Л. Построение и численное исследование 3D модели гидродинамики Азовского моря // Труды Международной конференции, посвященной 80-летию академика Н.Н. Яненко «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика». Новосибирск, Академгородок, 24 – 29 июня 2001 года. «Вычислительные технологии», т.6, спецвыпуск, 2001, С.686-692.
15. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Марчук Ан.Г., Симонов К.В. Вычислительный эксперимент в проблеме цунами. Новосибирск: Наука, 1989. 168 с.