

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.016

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ ДЛЯ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

А.В. Борисенко¹, И.М. Подгорный², А.И. Подгорный¹

¹ФИАН, г. Москва, Россия; e-mail: podgorny@lebedev.ru

²ИНАСАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Прогноз солнечных вспышек и появления солнечных космических лучей (СКЛ) является важной научно-технической задачей. СКЛ генерируются во время солнечных вспышек в результате ускорения заряженных частиц в токовом слое в солнечной короне электрическим полем Лоренца $E=V \times B/c$, они представляют серьезную радиационную опасность для людей и технических систем в космосе. Магнитогидродинамическое моделирование (МГД) вспышечных процессов на Солнце позволяет найти появление токовых слоев в солнечной атмосфере - источников магнитной энергии вспышек. Найденные при помощи МГД моделирования электрические и магнитные поля вблизи токового слоя позволяют промоделировать ускорение заряженных частиц. Применяемая ранее последовательная версия программы решения системы МГД уравнений позволяла получить решение МГД уравнений в короне над реальной активной областью, однако такое решение в реальном масштабе времени заняло бы несколько лет. Результаты МГД моделирования в реальном масштабе времени, полученные с помощью параллельных вычислений на GPU - графических процессорах Nvidia Tesla при помощи CUDA технологии показали существенное, на несколько порядков, ускорение расчета по сравнению со старой последовательной версией программы решения системы МГД уравнений. Полученные первые результаты GPU МГД моделирования вспышечной ситуации в реальном масштабе времени над АО 10365 показали появление в некоторых максимумах плотности тока конфигурации магнитного поля X-типа и течения плазмы, которое приводит к образованию токового слоя.

Введение. О необходимости применения параллельных вычислений для МГД-моделирования в солнечной короне

Магнитогидродинамическое моделирование для изучения механизма солнечных вспышек и их прогноза необходимо, прежде всего, по двум причинам:

1. Поскольку прямых измерений магнитного поля солнечной короны к настоящему времени практически не существует (не имеем возможности определения конфигурации магнитного поля), а первичное выделение энергии солнечных вспышек происходит в короне над активной областью (АО) [1].
2. Необходимо изучать сложные процессы в солнечной короне, о которых свидетельствуют наблюдения таких образований, как сигмоидные структуры.

Здесь нельзя не учитывать, прежде всего, течение токов в плазме. Как считают авторы, применение такого сложного и трудоемкого метода, как МГД моделирование оправдывает себя, поскольку позволяет получить более достоверную физическую модель короны со вспышками над активной областью, в частности в сравнении с экстраполяционными методами бессилового приближения магнитного поля. Данные наблюдений "говорят" о достоверности получаемых МГД моделей.

Вспышки возникают в результате выделения магнитной энергии, накопленной в поле токового слоя, который формируется в окрестности особой линии магнитного поля X-типа [2]. Для найденного в результате МГД-моделирования магнитного поля в сложной конфигурации над АО положение токового слоя можно определить с помощью специально разработанной системы графического поиска [3, 4]. Система поиска основана на определении положений локальных максимумов плотности тока, в которых анализируется конфигурация магнитного поля и потока плазмы. На обычном компьютере (Intel (R) Core (TM) i7 CPU 920 @ 2.67GHz) ранее проведенное МГД-моделирование позволяло получить модель только в сокращенном масштабе времени (в 10^{-4} раз быстрее изменение фотосферного магнитного поля). Но из-за появления неустойчивости на границе фотосферы, вызванной неестественно быстрым изменением магнитного поля, появлялось большое количество фиктивных пиков плотности тока, маскирующих токовые слои, что затрудняло использование системы графического поиска. Чтобы избежать появления неустойчивостей на фотосферной границе, большого количества максимумов плотности тока, маскирующих токовые слои, а также установить эволюцию процессов во времени, потребовалось провести МГД-моделирование в реальном времени с использованием специально разработанной конечно-разностной

схемы с временным шагом не превышающем 4×10^{-7} суток в основной части расчетного интервала. В последовательном коде на обычном компьютере для проведения МГД расчетов потребовалось бы 8 лет. Становится необходимым использование как минимум “домашнего суперкомпьютера” с множеством вычислительных потоков для распараллеливания численного решения используемой конечно-разностной схемы [5, 6, 1].

Выбор вычислительного оборудования и программного обеспечения и использование их возможностей для оптимизации распараллеливания вычислений

Для использования параллельных вычислений были подобраны в ходе многочисленных тестов оптимальные параметры конечно-разностной схемы и проведен ряд оптимизаций алгоритма параллельных вычислений, в первую очередь связанных с обменом заданными в расчетной области значениями между основной памятью компьютера и памятью графического ускорителя [1].

Параллельные вычисления проводились с использованием технологии CUDA на графических ускорителях Nvidia GPU, вычислительные потоки которых выполняют параллельные вычисления. Для расчета мы выбирали GPU с высокой скоростью вычислений для каждого потока. Установленное программное обеспечение предоставило дополнительные возможности для оптимизации алгоритма распараллеливания. Для распараллеливания вычислений использовался современный GPU Tesla V100, как наиболее производительный для вычислений с двойной точностью. Использование современного языка Fortran PGI (Portland Group - Fortran, созданного специально для распараллеливания с использованием графических процессоров для ускорителей и видеокарт) позволило проводить параллельные вычисления в точках пространственной сетки в последовательно выбранных трехмерных блоках потоков. Для расчета граничных условий в плоскостях, ограничивающих расчетную область, использовались двумерные блоки потоков. Пример покрытия двумерной сетки двумерными блоками потоков показан на (Рис. 1), покрытие трехмерной сетки трехмерными блоками аналогично.

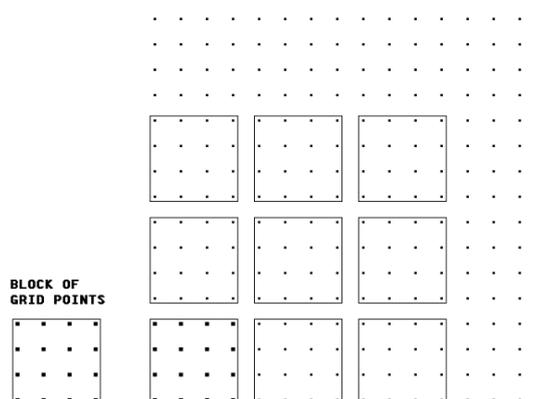


Рисунок 1. Покрытие двумерной сетки двумерными блоками точек, каждая из которых соответствует вычислительному потоку GPU.

Можно грубо представить распараллеливание на GPU, в чем-то аналогично применению директив OpenMP на процессоре (CPU), когда каждый поток графического процессора выполняет вычисления в своей собственной подобласти памяти (Рис. 2). С присущими недостатками тех же OpenMP и др. технологий распараллеливания вычислений (слишком много потоков могут приводить даже к замедлению расчетов, поскольку потокам становится “тесно”, времена ожидания для потоков начинают превышать собственно время вычисления для каждого потока). Конечно главным образом из-за проблем нагрева, потребляемой мощности GPU, частоты GPU всегда ниже частот CPU, обмена данными между быстродействующей памятью GPU и более медленной памятью CPU, интерфейсов мы получаем ускорения CUDA на тысячах графических ядер (потоках) не в тысячу раз, а гораздо меньше по сравнению с одним потоком CPU приблизительно на той же тактовой частоте. Таким образом мы получили максимальное ускорение в CUDA программе МГД моделирования ПЕРЕСВЕТ по сравнению с последовательной версией ПЕРЕСВЕТ в 115 раз на GPU Tesla V100 используя трехмерные блоки размерностью $NX \times NY \times NZ = 4 \times 4 \times 4 = 64$ точек (64 параллельных вычислительных потока, каждый находит значения в своей точке) для “охвата” всей вычислительной области. Выбор блоков меньших и больших размеров кратных двум не показывали ускорение, а приводили даже к замедлению расчетов и ошибкам вычислений.

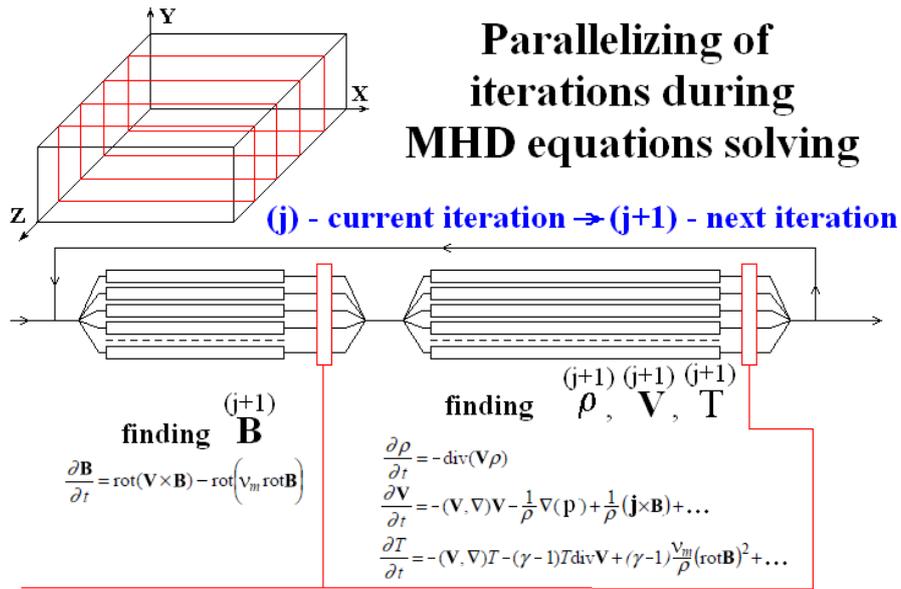


Рисунок 2. Схема распараллеливания системы МГД-уравнений OpenMP потоками.

Ранее использование устаревшей теперь GPU Tesla M2050 позволило нам понять процедуру распараллеливания вычислений для таких разностных схем, как разработанная схема численного решения уравнений МГД, решаемых методом итераций на примере решения уравнения Пуассона (итерации по тому же принципу, что и для уравнений МГД, но значительно упрощенный алгоритм) [7]. Однако параллельные вычисления с использованием трехмерных блоков потоков и передача большого количества параметров процедурам распараллеливания (~100) оказались невозможны для Tesla M2050 (программно-аппаратное обеспечение), не говоря уже о меньшей в ~14-15 раз производительности Tesla M2050 для вычислений с двойной точностью, используемой в программе МГД моделирования в сравнении с Tesla V100.

Тесты МГД программы на дорогих многопроцессорных системах (OpenMP) показали замедление вычислений в несколько раз по сравнению с параллельными вычислениями на одном графическом процессоре с использованием технологии CUDA.

Некоторые результаты МГД-моделирования в реальном времени над AR 10365 в течение одних суток

Эволюция скорости плазмы и плотности тока в центральной плоскости расчетной области для МГД-моделирования в короне над АО 10365 в течение первых 1.2 суток эволюции до вспышек, представлены на (Рис. 3, 4). На Рис. 5 показан пример максимума плотности тока, которые были обнаружены системой графического поиска. В этих максимумах магнитные поля имеют X-образную конфигурацию и возникают потоки плазмы, приводящие к образованию токовых слоев - источников накопления вспышечной энергии.

Наиболее оптимальный выбор параметров разностной схемы [1] позволил рассчитать эволюцию в течение одного дня за ~ 26 дней (Tesla V100, ~0.038 сек. время одной итерации). Для оперативного прогноза это время должно быть меньше суток, нужно работать над дальнейшей оптимизацией, резервы имеются.

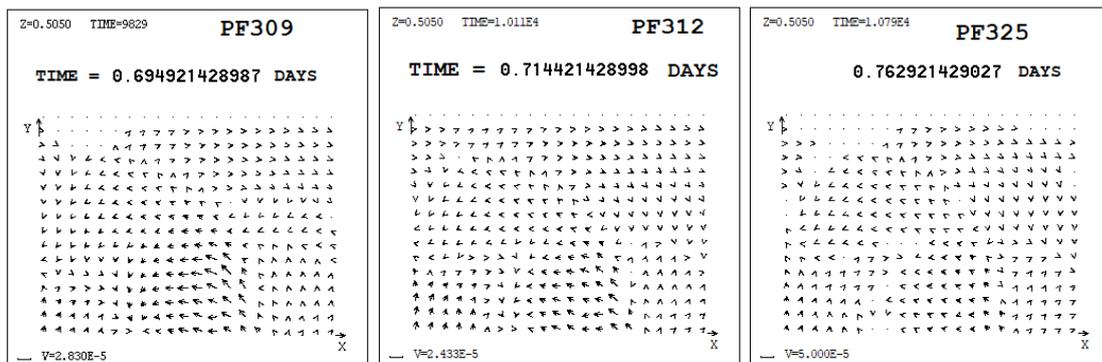


Рисунок 3. Эволюция поля скоростей в плазме центральной плоскости расчетной области.

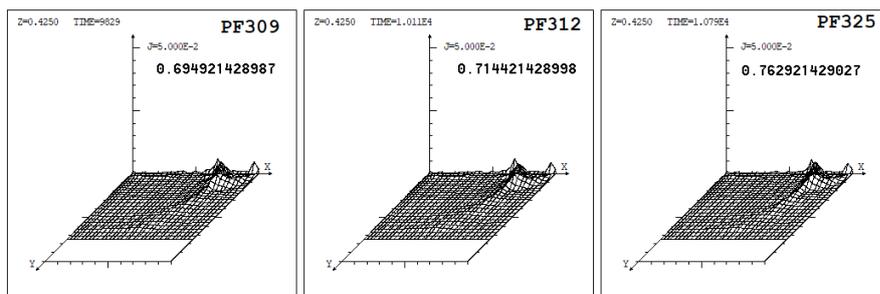


Рисунок 4. Эволюция плотности тока в плазме центральной плоскости расчетной области.

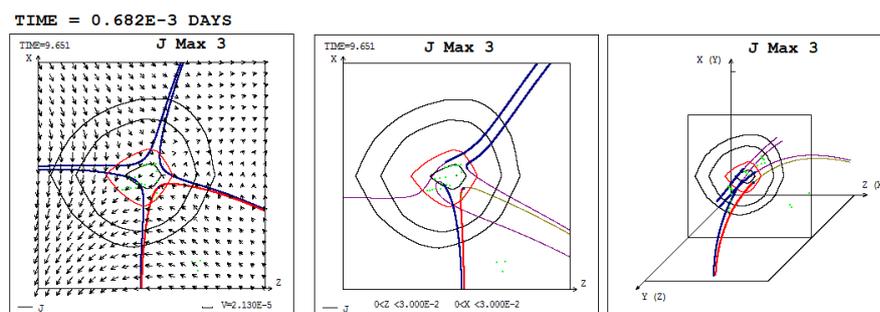


Рисунок 5. 2D и 3D конфигурации магнитного поля и потоки плазмы в максимуме плотности тока.

Выводы

1. МГД-моделирование в короне над АО в реальном масштабе времени для изучения физического механизма солнечной вспышки возможно только с использованием параллельных вычислений.
2. Было выбрано программно-аппаратное обеспечение, которые выполняют быстрые параллельные вычисления, в частности, за счет использования трехмерных блоков вычислительных потоков.
3. В результате применения методов распараллеливания, доступных для выбранного вычислительного оборудования и программного обеспечения, и оптимизации алгоритма распараллеливания [1] скорость вычислений на GPU превысила более чем в 115 раз скорость вычислений на CPU с последовательным кодом (Intel (R) Core (TM) i7 CPU 920 @ 2,67 ГГц). Расчет в реальном масштабе времени эволюции поля и плазмы в короне стал возможен меньше чем за 1 месяц против 8 лет.
4. МГД-моделирование в короне над AR 10365 в течение первых 1.2 суток эволюции показало появление конфигураций X-типа с потоком плазмы, что должно было вызвать образование токового слоя.
5. Пробные расчеты показали возможность дальнейшего увеличения скорости расчетов как за счет использования новейшего оборудования, так и за счет оптимизации алгоритма.

Благодарности. Авторы благодарны команде SOHO/MDI за научные данные, представленные на <http://soi.stanford.edu/mintage/index5.html>, а также специалистам по облачным сервисам, упростившим нам задачу настройки, арендованных удаленных машин для вычислений на GPU.

Список литературы

1. Podgorny A.I., Podgorny I.M., Borisenko A.V. (2020). Study of the solar flare mechanism by MHD simulation in the corona above the active region in real time scale. Proc. 12-th Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere", Primorsko, Bulgaria, June, 2020.
2. Podgorny A.I., Podgorny I.M. (2012). Magnetohydrodynamic Simulation of a Solar Flare: 1. Current Sheet in the Corona. *Geomagnetism and Aeronomy*, 52, 150-161.
3. Podgorny A.I., Podgorny I.M., Meshalkina N.S. (2017). Magnetic field configuration in corona and X-ray sources for the flare from May 27, 2003 at 02:53. *Sun and Geosphere*, 12, 85-92.
4. Podgorny A.I., Podgorny I.M., Meshalkina N.S. (2018). Current sheets in corona and X-ray sources for flares above the active region 10365. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 180, 16-25.
5. Podgorny A.I., Podgorny I.M. (2004). MHD Simulation of Phenomena in the Solar Corona by Using an Absolutely Implicit Scheme. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 44, 1784-1806.
6. Podgorny A.I., Podgorny I.M. (2008). Formation of Several Current Sheets Preceding a Series of Flares above the Active Region AR 0365. *Astronomy Reports*, 52, 666-675.
7. Borisenko A.V., Podgorny I.M., Podgorny A.I. (2019). Using of the supercomputer calculations for study of solar flare mechanism via coronal MHD simulation. *Physics of Auroral Phenomena*, V. 42, №1, P. 92-95.