**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ИЗ КОНФИГУРАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МГД МОДЕЛИРОВОНИЕМ НАД АТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ, В УСЛОВИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

**А. И. Подгорный1, И. М. Подгорный2**

***1Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, podgorny@lebedev.ru***

***2Институт астрономии РАН***

Добрый день!

Изучить механизм солнечной вспышки можно только путем МГД моделирования над активной областью, если расчет начинается за несколько суток перед появлением вспышек, когда энергия для солнечной вспышки еще не накоплена в короне (Рисунок Презентации 1). Первичное освобождение энергии солнечной вспышки происходит в солнечной короне на высоте 15 000 км - 70 000 км (1/40 - 1/10 радиуса Солнца) (Рисунок Презентации 2). Это следует из многочисленных наблюдений и подтверждается результатами численного МГД моделирования над активной областью. Доказательством являются наблюдения источника вспышечного теплового рентгеновского излучения на лимбе (Рисунок Презентации 3).

Появление вспышки высоко в короне объясняет механизм солнечной вспышки, предложенный С.И. Сыроватским, согласно которому, происходит освобождение энергии, накопленной в магнитном поле токового слоя. Токовый слой образуется в окрестности особой линии магнитного поля X-типа в результате движения под действием магнитных сил **j×B** (Рисунок Презентации 4). В процессе квазистационарной эволюции токовый слой переходит в неустойчивое состояние (Рисунок Презентации 5). Неустойчивость приводит к взрывному освобождению магнитной энергии слоя с наблюдаемыми проявлениями вспышки, которые объясняются электродинамической моделью солнечной вспышки, предложенной И. М. Подгорным (Рисунок Презентации 6). Силой магнитного натяжения вдоль слоя ускоряются, прежде всего, электроны, которые переносят электрический ток. Электрическое поле Холла **j×B**/nec, возникшее в результате образовавшегося разделения заряда, генерирует цепь электрического тока из двух продольных токов вдоль магнитных линий, выходящих из токового слоя, замыкающихся током Петерсена на фотосфере. Электроны, ускоренные в продольных токах, вызывают в нижних плотных слоях солнечной атмосферы пучковое жесткое рентгеновское излучение с энергиями 50-100 кэВ.

Электродинамическая модель солнечной вспышки использует аналогии с электродинамической моделью суббури, предложенной ранее её автором (Рисунок Презентации 7) на основании измерений на космическом аппарате "Интеркосмос-Болгария-1300", Игорь Максимович был руководителем научной программы этого Советско-Болгарского космического проекта.

Целью МГД моделирования в солнечной короне является определение физического механизма солнечной вспышки. При постановке задачи никаких предположений о механизме вспышки не делалось. Все условия брались из наблюдений (Рисунок Презентации 8).

Численное решение проводится в расчетной области в форме прямоугольного параллелепипеда, нижняя сторона которого располагается на солнечной поверхности и содержит активную область (Рисунок Презентации 9). Измеренное на фотосфере магнитное поле используется для задания граничного условия. Остальные условия на фотосферной границе и на нефотосферной границе аппроксимируются условиями свободного выхода.

В этой расчетной области при таких граничных условиях решалась полная система уравнений магнитной гидродинамики (МГД) для сжимаемой плазмы со всеми диссипативными членами (Рисунок Презентации 10). Для численного решения МГД уравнений разработана абсолютно неявная противопоточная конечно-разностная схема, консервативная относительно магнитного потока (Рисунок Презентации 11). Целью разработки численных методов было создание конечно-разностной схемы, которая остается устойчивой при максимально возможном шаге по времени для получения высокой скорости расчета. Чтобы обеспечить неизменность магнитного потока, магнитное поле на сетке схемы задавалось не векторами магнитного поля в точках сетки, а усредненными на единицу поверхности магнитными потоками через границы ячеек сетки (через грани кубиков). Полный поток магнитного поля через границу каждой ячейки (кубика) остается неизменным, поскольку вклады электрического поля, определенного на ребре ячейки в изменения магнитных потоков через две грани ячейки, прилегающие к данному ребру, будут равными по абсолютной величине и противоположны по знаку (Рисунок Презентации 12).

Несмотря на применение разработанных численных методов, расчет выполняется достаточно медленно, так что провести его за обозримое время оказалось возможным только в сильно сокращенном (в 104 раз) масштабе времени. Получить результаты МГД моделирования в реальном масштабе времени стало возможно только с использованием параллельных вычислений (Рисунок Презентации 13).

Распараллеливание вычислений проводилось вычислительными потоками на современных графических картах (GPU) V-100 и Titan-100 с использованием технологии CUDA (Рисунок Презентации 14). Проведено более 10 оптимизаций программы параллельных вычислений, в значительной мере за счет уменьшения обмена данными между памятью центрального процессора (CPU) и памятью графической карты (GPU), в результате чего скорость расчета увеличилась в 7.5 раз. Скорость расчета по распараллеленной программе превышает в 120 раз скорость расчета по нераспараллеленной программе.

МГД моделирование проводилось над активной областью АО 10365, которая дала группу вспышек 26 - 29 мая 2003 года (Рисунок Презентации 15).

Конфигурация над активной областью настолько сложная (Рисунок Презентации 16), что непосредственно из нее практически невозможно определить положения особых линий и образовавшихся в них токовых слоев. Поэтому, для этой цели разработана графическая система поиска (Рисунок Презентации 17), основанная появлении максимума плотности тока в середине токового слоя. Ищутся локальные максимумы плотности тока, затем в окрестности каждого из них проводится анализ конфигурации магнитного поля.

Примеры конфигураций магнитного поля в плоскости и в пространстве вблизи найденных максимумов представлены на Рисунке (Рисунок Презентации 18). Конфигурацию магнитного поля X-типа образуют так называемые "плоские" магнитные линии, т.е. линии, касательные к проекциям векторов магнитного поля на плоскость конфигурации токового слоя. Именно этой плоской конфигурацией определяется возможность появления сил **j×B**, создающих токовый слой.

В трехмерном пространстве магнитные линии могут значительно расходиться вдоль особой линии (вдоль координаты, перпендикулярной плоскости конфигурации токового слоя), так что величина поля в плоскости сравнительно велика относительно величины продольного магнитного поля. Также, магнитные линии в трехмерном пространстве могут быть близки к параллельным, что означает сравнительно большую продольную компоненту магнитного поля, которая будет стабилизировать неустойчивость токового слоя, тем самым препятствуя вспышечному освобождению магнитной энергии.

В окрестности особой линии магнитного поля на конфигурацию X-типа может быть наложено расходящееся магнитное поле (Рисунок Презентации 19). Оно создает вращательное движение вокруг особой линии, препятствуя появлению вспышки (Рисунок Презентации 20). В наложении полей может сильно или слабо преобладать поле X-типа, а может сильно или слабо преобладать расходящееся поле (Рисунок Презентации 21). Условия для вспышки боле благоприятны, когда поле X-типа доминирует, поскольку, расходящееся магнитное поле препятствует как образованию токового слоя, так и развитию неустойчивости, приводящей к вспышечному освобождению энергии.

Представленные на Рисунке (Рисунок Презентации 22) результаты измерения теплового рентгеновского излучения на космическом аппарате GOES, показывают появление солнечной вспышки M 1.9 26 мая 2003 года в момент 05:34.

Изучение ситуации во время вспышки и перед вспышкой (Рисунок Презентации 23) проводилось путем сравнения результатов МГД моделирования с наблюдениями микроволнового радиоизлучения на частоте 17 ГГц, полученными на радиогелиографе Нобеяма (NoRH).

Ситуация во время вспышки в момент 05.50 здесь представлена кратко (Рисунок Презентации 24). Конфигурация магнитного поля представлена магнитными линиями, проходящими через максимумы плотности тока с номерами 4, 50, 102, 154, 271, 295 (максимумы пронумерованы в порядке убывания плотности тока). Изображены 3D магнитные линии в расчетной области в короне, проекции магнитных линий на центральную плоскость расчетной области (проходящей через центр расчетной области, расположенной параллельно солнечному экватору и перпендикулярно поверхности Солнца). Также, на проекции магнитных линий на картинную плоскость (перпендикулярную лучу зрения) наложено распределение интенсивности микроволнового излучения на частоте 17 ГГц наблюдаемое на диске Солнца с помощью радигелиографа Нобеяма (NoRH).

Конфигурации магнитного поля в выбранных точках максимумов плотности тока (Рисунок Презентации 25) указывают на благоприятные условия для появления вспышек в максимумах, расположенных в области яркого вспышечного излучения. Проблема состоит в том, что максимумы с такими же свойствами возникают и вне яркой области вспышечного излучения.

Решить эту проблему поможет появление протяженной поверхности повышенной плотности тока на магнитных линиях, проходящих через цепочку максимумов плотности тока. Для этой цели проведено детальное исследование в момент 02:32 за 3 часа до вспышки (Рисунок Презентации 26). Конфигурация магнитного поля представлена линиями, проходящими через максимумы плотности тока с номерами 145, 147, 194, 179, 4, 73, 105, 41, 12, 205, 123, 82, 84, 182. Максимумы цепочки с номерами 145, 149, 148, 150 и 147 представлены зелёными точками (Рисунок Презентации 27). Магнитные линии, проходящие через точки цепочки максимумов, и их проекции на центральную плоскость расчетной области и картинную плоскость изображены отдельно (Рисунок Презентации 28). В малых областях размером 12 000 км с центрами в точках максимумов цепочки представлены двумерные и трехмерные конфигурации (Рисунок Презентации 29). Центральная плоскость каждой из этих областей с плоской конфигурацией поля расположена перпендикулярно вектору магнитного поля в точке максимума. Эти конфигурации не обладают свойствами, которые могли бы значительно способствовать вспышечному освобождению энергии.

Исследование плоских и трехмерных конфигураций в квадрате и в кубе с большим размером 80 000 км с центром в 148-м максимуме, расположенном в середине цепочки показывает, что все максимумы цепочки принадлежат одному и тому же токовому слою значительной ширины (~50 000 км), т.е. протяженной поверхности с повышенной плотностью тока (Рисунок Презентации 30). Магнитные линии в кубе, проходящие через максимумы цепочки, образуют аркаду.

Точки на этих магнитных линиях в вершине аркады обозначены желтым цветом (Рисунок Презентации 31). Исследование конфигурации вблизи этих точек в вершине аркады проводилось в кубе большого размера 80 000 км (Рисунок Презентации 32). Центральная плоскость этого куба проходит через точку в вершине арки, расположенную на магнитной линии, проходящей через средний максимум цепочки с номером 148. Двумерные и трехмерные конфигурации магнитного поля в малых окрестностях точек (размером 12 000 км) на вершине аркады (Рисунок Презентации 33), и в большой области размером 80 000 км (Рисунок Презентации 34) обладают свойствами, способствующими вспышечной неустойчивости в токовом слое. В плоских конфигурациях в большинстве областей доминирует магнитное поле X-типа, в остальных областях расходящееся поле доминирует очень слабо. В трехмерных конфигурациях линии поля значительно расходятся вдоль направления особой линии, что означает малую продольную компоненту магнитного поля, которая не будет стабилизировать взрывную неустойчивость.

Здесь представлено сравнение конфигураций в областях большого размера 80 000 км для цепочки максимумов плотности тока и вершины аркады (Рисунок Презентации 35).

Неустойчивость, приводящая к основному энерговыделению вспышки, может начинаться в вершине аркады, где нет максимумов плотности тока. Однако плотность тока в этом месте достаточно большая. Причиной появления вспышечной неустойчивости в вершине аркады, являются свойства конфигурации магнитного поля в этом месте, способствующие возникновению неустойчивости токового слоя. Далее неустойчивость может распространиться на всю область токового слоя, что подтверждается расположением всей аркады с повышенной плотностью тока в области яркого вспышечного излучения.

Таким образом, возникновение поверхности повышенной плотности тока проходящей через цепочку максимумов плотности тока, может решить проблему совпадения областей яркого вспышечного излучения с положениями вспышек, найденных из результатов МГД моделирования.

Выводы представлены здесь (Рисунки Презентации 36, 37, 38, 39, 40)

Спасибо за внимание!

**DETERMINATION OF SOLAR FLARE POSITIONS FROM MAGNETIC FIELD CONFIGURATIONS OBTAINED BY DATA DRIVEN MHD SIMULATION ABOVE THE ACTIVE REGION**

**А. I. Podgorny1, I. M. Podgorny2**

***1Lebedev Physical Institute RAS, podgorny@lebedev.ru***

***2Institute of Astronomy RAS***

Good afternoon!

The study of solar flare mechanism is possible only by MHD simulation above the active region if calculations are started several days before flares, when the energy for solar flare has not accumulated yet in corona (Figure of the Presentation 1). Primordial energy release of the solar flare takes place in the solar corona at the altitude 15 000 km - 70 000 km (1/40 - 1/70 of the Solar radius) (Figure of the Presentation 2). This follows from numerous observations and is confirmed by the results of numerical MHD simulation above the active region. Proof of this is the appearance of a source of flare thermal X-ray emission on the limb (Figure of the Presentation 3).

The appearance of flare high in the corona is explained by the solar flare mechanism proposed by S.I. Syrovatsky, according to which, the energy accumulated in the magnetic field of the current sheet is released. A current sheet is created in the vicinity of the X-type singular line of magnetic field as a result of plasma movement under the influence of magnetic forces **j×B** (Figure 4 of the Presentation). During the process of quasi-stationary evolution, the current sheet transferes into an unstable state (Figure 5 of the Presentation). The instability leads to the explosive release of the magnetic energy of the sheet with observable manifestations of the flare, which are explained by the electrodynamic model of the solar flare proposed by I. M. Podgorny (Figure 6 of the Presentation). The force of magnetic tension along the sheet accelerates, first of all, electrons that carry electric current. The Hall electric field **j×B**/nec, resulting from the appeared charge separation, generates an electric current circuit of two field-aligned currents along magnetic lines exiting from the current sheet, which are closed by the Petersen current on the photosphere. Electrons accelerated in field-aligned currents produce beam hard X-ray emission with energies of 50-100 keV in the lower dense layers of the solar atmosphere.

The electrodynamic model of solar flare uses analogies with the electrodynamic model of substorm, previously proposed by its author based on measurements on the "Intercosmos-Bulgaria-1300" spacecraft (Figure 7 of the Presentation). Igor Maksimovich was the head of the scientific program of this Soviet-Bulgarian space project.

The aim of MHD simulation in the solar corona is to determine the physical mechanism of the solar flare. When setting up the problem, no assumptions were made about the flare mechanism. All conditions were taken from observations. (Figure 8 of the Presentation).

The numerical solution is carried out in the computational domain in the form of rectangular parallelepiped, the lower side of which is located on the solar surface and contains the active region (Figure 9 of the Presentation). The magnetic field measured on the photosphere is used to set the boundary condition. The remaining conditions at the photospheric boundary and at the non-photospheric boundary are approximated by the free exit conditions.

In this computational domain for such boundary conditions, the complete system of magnetohydrodynamics (MHD) equations is solved (Figure 10 of Presentation). For the numerical solution of MHD equations, the absolutely implicit upwind finite-difference scheme, conservative relative the magnetic flux, has been developed (Figure 11 of Presentation). The goal of developing numerical methods was to create a finite-difference scheme that remains stable at the largest possible time step to obtain high computation speed. To ensure unchanging of the magnetic flux, the magnetic field on the scheme grid was specified not by the magnetic field vectors at the grid points, but by the magnetic fluxes averaged per unit surface through the boundaries of the grid cells (through the faces of the cubes). The total flux of the magnetic field through the boundary of each cell (cube) remains unchanged, since the contributions of the electric field determined on the edge of the cell to changes in magnetic fluxes through the two faces of the cell adjacent to this edge will be equal in absolute value and opposite in sign (Figure 12 of the Presentation).

Despite the use of the developed numerical methods, the calculation is performed quite slowly, so that it was possible to carry it out in the foreseeable time only on a greatly reduced (104 times) scale of time. It became possible to obtain the results of MHD simulation in real scale of time only using parallel computations (Figure 13 of the Presentation).

Parallelization of calculations was carried out by computational threads on modern graphics cards (GPU) V-100 and Titan-100 using CUDA technology (Figure 14 of the Presentation). More than 10 optimizations of the parallel computing program were carried out, mostly due to the reduction of data exchange between the central processing unit (CPU) memory and the graphics card memory (GPU), as a result of which the calculation speed increased by 7.5 times. The speed of calculations using a program of parallel computations is 120 times higher than the speed of calculations using program of serial computations.

MHD simulation was carried out above the active region AR 10365, which produced a group of flares on May 26 - 29, 2003 ( Figure 15 of the Presentation).

The configuration above the active region is so complicated (Figure 16 of the Presentation) that it is almost impossible to determine directly from it the positions of singular lines and the current sheets formed in them. Therefore, for this purpose, a graphical search system has been developed (Figure 17 of the Presentation), based on the appearance of the current density maximum in the middle of the current sheet. Local maxima of the current density are searched, then, the magnetic field configuration is analyzed in the vicinity of each of them.

Examples of magnetic field configurations in the plane and in space near the found maxima are presented in Figure (Figure 18 of the Presentation). The X-type magnetic field configuration is formed by the so-called “plane” magnetic lines, i.e. lines tangent to the projections of the magnetic field vectors onto the current sheet configuration plane. It is this 2D configuration that determines the possibility of the appearance of forces jxB, creating the current sheet.

In three-dimensional space, magnetic lines can diverge significantly along a singular line (along a coordinate perpendicular to the plane of the current sheet configuration), so that the value of the field in the plane is relatively large compared to the magnitude of the longitudinal magnetic field. Also, magnetic lines in three-dimensional space can be close to parallel, which means a relatively large longitudinal component of the magnetic field, that will stabilize the instability of the current sheet, thereby hindering the flare release of magnetic energy.

In the vicinity of a singular magnetic field line, the diverging magnetic field can be imposed on the X-type configuration (Figure 19 of the Presentation). The diverging field creates a rotational movement around a singular line, hindering the appearance of a flare (Figure 20 of the Presentation). The fields overlay may be strongly or weakly dominated by an X-type field, or it may be strongly or weakly dominated by a divergent field (Figure 21 of the Presentation). Conditions for a flare are more promotable when the X-type field dominates, since the diverging magnetic field hinders both the formation of a current sheet and the development of instability leading to the flare release of energy.

The thermal X-ray emission measurements on the GOES spacecraft (Figure 22 of the Presentation) show the appearance of the M 1.9 solar flare on May 26, 2003 at 05:34.

The study of the situation during and before the flare (Figure 23 of the Presentation) was carried out by comparing the results of MHD simulations with observations of microwave radio emission at 17 GHz obtained by the Nobeyama Radioheliograph (NoRH).

The situation during the flare at 05:50 is presented briefly here (Figure 24 of the Presentation). The configuration of the magnetic field is represented by magnetic lines passing through the current density maxima with numbers 4, 50, 102, 154, 271, 295 (the maxima are numbered in decreasing order of current density). Shown are 3D magnetic lines in the computational domain in the corona, projections of magnetic lines onto the central plane of the computational domain (the central plane passes through the center of the computational domain, is located parallel to the solar equator and perpendicular to the solar surface). Also, the intensity distribution of microwave radiation at a frequency of 17 GHz observed on the solar disk using the Nobeyama radiheliograph (NoRH) is superimposed on the projection of magnetic lines onto the picture plane (perpendicular to the line of sight).

The magnetic field configurations at selected points of current density maxima (Figure 25 of the Presentation) indicate promotable conditions for the appearance of flares at maxima located in the region of bright flare emission. The problem is that maxima with the same properties also appear outside the bright region of flare emission.

The appearance of extended surface of increased current density on magnetic lines passing through a chain of current density maxima helps to solve this problem. For this purpose, a detailed study was carried out at 02:32, 3 hours before the flare (Figure 26 of the Presentation). The magnetic field configuration is represented by lines passing through the maxima of current density with the numbers 145, 147, 194, 179, 4, 73, 105, 41, 12, 205, 123, 82, 84, 182. Maxima of the chain with numbers 145, 149, 148, 150 and 147 are represented by green points (Figure 27 of the Presentation). Magnetic lines passing through the points of the chain of maxima and their projections onto the central plane of the computational domain and the picture plane are shown separately (Figure 28 of the Presentation). In small regions of 12,000 km in size with centers at the points of maxima of the chain, two-dimensional and three-dimensional configurations are presented (Figure 29 of the Presentation). The central plane of each of these regions, which is the plane of configuration, is located perpendicular to the magnetic field vector at the point of maximum. These configurations do not have properties that would significantly promote to the flare release of energy.

A study of plane and three-dimensional configurations in the square and in the cube with a large size of 80,000 km with the center in the 148th maximum located in the middle of the chain shows that all maxima of the chain belong to the same current sheet of significant width (~50,000 km), which is extended surface with increased current density. (Figure 30 of the Presentation). Magnetic lines in this cube, passed through the maxima of the chain, form the arcade.

The points at the top of the arcade are indicated in yellow (Figure 31 of the Presentation). The study of the configuration near these points at the top of the arcade was carried out in the large cube of 80,000 km (Figure 32 of the Presentation). The central plane of this cube passes through a point at the top of the arcade, located on a magnetic line passing through the middle maximum of chain with the number 148. Two-dimensional and three-dimensional configurations of the magnetic field in small neighborhoods of points (12,000 km in size) located at the top of the arcade (Figure 33 of the Presentation), and in a large region of size 80,000 km (Figure 34 of the Presentation) have properties that promote flare instability in the current sheet. In plane configurations, the X-type magnetic field dominates in most regions; in other regions, the divergent field dominates very weakly. In three-dimensional configurations, the field lines diverge significantly along the direction of the singular line, which means that the longitudinal component of the magnetic field is small, and therefore will not stabilize the explosive instability.

Here we present a comparison of configurations in large 80,000 km regions for the chain of current density maxima and the top of the arcade (Figure 34 of the Presentation).

The instability leading to the main energy release of the flare can begin at the top of the arcade, where there are no current density maxima. However, the current density in this place is quite high. The reason for the appearance of flare instability at the top of the arcade is the properties of the magnetic field configuration in this place, which promote to the appearence of current sheet instability. Further, the instability can spread to the entire region of the current sheet, which is confirmed by the location of the entire arcade with an increased current density in the region of bright flare emission.

Thus, the appearance of a surface of increased current density passing through a chain of current density maxima can solve the problem of coincidence of regions of bright emission of flare with the positions of flares found from the results of MHD simulation.

Conclusions are presented here (Figures 36, 37, 38, 39, 40 of the Presentation)

Thank you for your attention!