

**ПОЛОЖЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И ЦЕПОЧКИ
МАКСИМУМОВ ПЛОТНОСТИ ТОКА, ЛЕЖАЩИХ НА ОСОБЫХ
ЛИНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ
МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ**

Подгорный А.И.¹, Подгорный И.М.²

¹Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Институт Астрономии РАН, Москва, Россия

**SOLAR FLARE POSITIONS AND CHAINS OF CURRENT DENSITY
MAXIMA PLACED ON SINGULAR LINES OBTAINED BY
MHD SIMULATION ABOVE THE ACTIVE REGION**

Podgorny A.I.¹, Podgorny I.M.²

¹Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

²Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia

The primordial energy release of solar flare in the solar corona is explained by flare mechanism of release of energy accumulated in the magnetic field of the current proposed by S.I. Syrovatsky, according to which, the energy for flare is accumulated in the magnetic field of the current sheet. The observed manifestations of the flare are explained by the sed on determining the positions of the current density maxima, which must be achieved in the centers of the current sheets. The conditions for flare are more promotable when the X-type field dominates on divergent magnetic field which can be superimposed. The comparing the results of MHD simulation with observations of microwave radio emission at 17 GHz indicate that maxima with promotable conditions for flare occurrence also occur outside the bright region of flare emission. This problem can be solved by the occurrence of the surface of magnetic lines with high current density, passing through a chain of current density maxima. This extended surface 50 Mm in size has the form of arch and situated entirely in the region of bright flare emission. More appropriate conditions for flare appearance reached on the top of arch but not in the place of chain of current density maxima. The flare instability can occur on the top of the arch and then propagate along the arch.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-245-248>

Введение

Первичное освобождение энергии при солнечной вспышке в солнечной короне на высотах 15–70 Мм объясняется механизмом солнечной вспышки С.И. Сыроватского [1], согласно которому энергия для вспышки накапливается в магнитном поле токового слоя. Многочисленные наблюдения ([2] и др.) показывают возникновение вспышек на таких высотах, что соответствует результатам МГД-моделирования над активной областью. Наблюдаемые проявления вспышки, возникающие в результате быстрого освобождения магнитной энергии в токовом слое, объясняются электродинамической моделью солнечной вспышки, предложенной И.М. Подгорным [3]. Модель основана на наблюдениях и результатах МГД

моделирования и использует аналогии с электродинамической моделью суббури, ранее разработанной ее автором [4]. Поскольку из наблюдений невозможно получить конфигурацию магнитного поля в короне, для изучения физического механизма солнечной вспышки необходимо проводить МГД моделирование в солнечной короне. При этом расчеты должны начинаться за несколько дней до вспышки, когда магнитная энергия для вспышки еще не накопилась в короне. При постановке задачи не делалось никаких предположений о механизме солнечной вспышки. Все условия брались из наблюдений.

МГД моделирование проводится над активной областью AR 10365 в расчетной области в короне в виде прямоугольного параллелепипеда $1 \times 0.3 \times 1$ (единица длины выбрана $L_0 = 4 \times 10^{10}$ см). Для численного решения уравнений МГД разработана абсолютно неявная противоточная конечно-разностная схема, консервативная относительно магнитного потока [5]. Схема реализована в компьютерной программе ПЕРЕСВЕТ. Распараллеливание расчетов осуществлялось вычислительными потоками на GPU с использованием технологии CUDA. Полученная в результате МГД моделирования конфигурация магнитного поля настолько сложна, что часто непосредственно невозможно определить положения особых линий. Для этой цели была разработана графическая поисковая система [6], основанная на определении положений максимумов плотности тока, которые достигаются в центрах токовых слоев.

Протяженная поверхность магнитных линий с повышенной плотностью тока, проходящая через цепочку максимумов плотности тока: возможное решение проблемы совпадения положений вспышек, найденных из МГД моделирования с наблюдениями

Проведено сравнение результатов МГД моделирования над активной областью АО 10365 в момент 02:32:05 26 мая 2003 года за три часа до вспышки M 1.9 с наблюдениями микроволнового радиоизлучения на частоте 17 ГГц, полученными на радиогелиографе Нобеяма. 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 (рис. 1а,б,д.). Конфигурации магнитного поля в некоторых точках максимумов плотности тока вне яркой области вспышечного излучения указывают на благоприятные условия для появления вспышек. Проблему совпадения областей яркого вспышечного излучения с положениями вспышек, найденных из результатов МГД моделирования, может решить возникновение поверхности повышенной плотности тока, проходящей через цепочку максимумов плотности тока. Максимумы этой цепочки с номерами 145, 149, 148, 150 и 147 представлены на рисунках 1а, б, в, г, е. На рисунке 1ж представлена плоская конфигурация в квадрате с малым размером 12 000 км, в центре которого располагается центральный максимум цепочки J MAX 148. Плоскость квадрата расположена перпендикулярно вектору магнитного поля в ее центре. Конфигурация на рис. 1ж типична

для всех максимумов цепочки. Эти конфигурации не обладают свойствами, которые могли бы значительно способствовать вспышечному освобождению энергии.

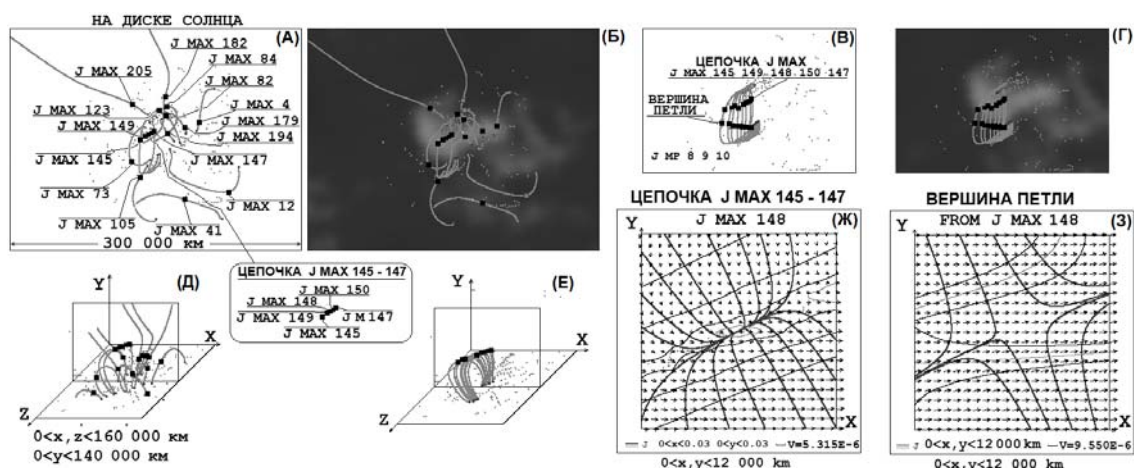


Рис. 1. Конфигурация магнитного поля на диске Солнца (а, б) и в пространстве (д) представлена магнитными линиями, проходящими через выбранные максимумы с номерами 145, 147, 194, 179, 4, 73, 105, 41, 12, 205, 123, 82, 84, 182. На диске наложено распределение интенсивности микроволнового излучения на частоте 17 ГГц, (б). Аркада магнитных линий, проходящих через цепочку максимумов J MAX 145 149 148 150 147, на диске Солнца (в, г) и в пространстве (д). Плоская конфигурация магнитного поля в окрестности центрального максимума цепочки J MAX 148 (ж) и в окрестности точки на этой же магнитной линии в вершине арки (з).

Все максимумы цепочки принадлежат одному и тому же токовому слою значительной ширины ($\sim 50\,000$ км), т.е. протяженной поверхности с повышенной плотностью тока (рис. 2а,б в квадрате с большим размером $80\,000$ км с центром в 148-м максимуме, расположенном в середине цепочки). Трехмерная конфигурация в кубе представлена на рис. 2в. Плоскость квадрата расположена перпендикулярно вектору магнитного поля в его центре. Магнитные линии в кубе, проходящие через максимумы цепочки, образуют аркаду (рис. 2г). Для построения магнитной конфигурации в вершине арки строится квадрат большого размера $80\,000$ км с центром на магнитной линии, проходящей через J MAX 148. Конфигурации магнитного поля в окрестностях точек на вершине петли в центральной плоскости размером $12\,000$ км (рис. 1з) обладают свойствами, способствующими появлению вспышки.

Сравнение двумерных и трехмерных конфигураций в больших областях размером $80\,000$ км для точек цепочки максимумов и точек в вершине аркады показывает значительно более благоприятную ситуацию для возникновения вспышек в вершинах петель, а не в точках максимумов цепочки. (рис. 2б,в,е,ж). На вершине петли для плоской конфигурации доминирует поле X-типа (рис. 2е), а в трехмерной конфигурации линии поля значительно расходятся в направлении вдоль особой линии (рис. 2ж), что

означает относительно слабую продольную компоненту магнитного поля, так что она не сможет стабилизировать вспышечную неустойчивость.

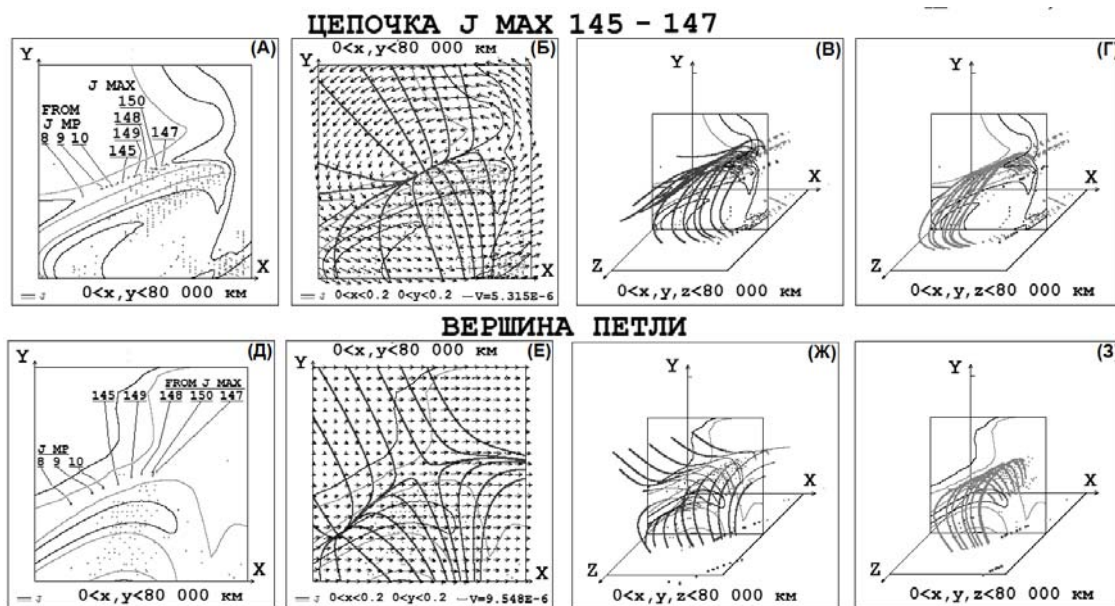


Рис. 2. Линии равной плотности тока, положения пространственных и плоских максимумов плотности тока и точек пересечения с выбранными плоскостями магнитных линий, проходящих через точки максимумов (а, д), плоская (б, е) и пространственная (в, ж) конфигурации магнитного поля, аркады магнитных линий (г, з) в большой области размером 80 000 км в месте расположения цепочки максимумов J MAX 145 149 148 150 147 (а, б, в, г) и на вершине арки (д, е, ж, з).

Возникновение аркады магнитных линий с повышенной плотностью тока может решить проблему совпадения областей яркого вспышечного излучения с положениями вспышек, найденных из результатов МГД моделирования. Неустойчивость, приводящая к основному энерговыделению вспышки, может начинаться в вершине аркады, где свойства конфигурации магнитного способствуют возникновению неустойчивости токового слоя. Далее неустойчивость может распространиться на всю область токового слоя, что подтверждается расположением всей аркады в области яркого вспышечного излучения.

Расширенный вариант этой статьи доступен по адресу <https://sites.lebedev.ru/ru/podgorny/file/7098>

Литература

1. Сыроватский С.И. // ЖЭТФ **50**, 1133-1147 (1966).
2. Lin R.P., Krucker S., Hurford G.J. et al. // Astrophys. J., 2003, **595**, L69-L76.
3. Подгорный И.М., Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Подгорный А.И. // Астрон. журн., 2010, **87**, 704-716.
4. Podgorny, I.M., Dubinin, E.M., Israilevich, P.L., Nicolaeva, N.S. // Geophys. Res. Lett., 1988, **15**, 1538-1540.
5. Podgorny A.I., Podgorny I.M. // Sun and Geosphere, 2013, **8**(2), 71-76.
6. Подгорный А.И. и Подгорный И.М. // ЖВМ и МФ, 2004, **44**, 1873-1897.