

## ЭВОЛЮЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ 10365 И ЖЕСТКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВСПЫШКИ 27 МАЯ 2003 г.

А.И. Подгорный<sup>1</sup>, И.М. Подгорный<sup>2</sup>

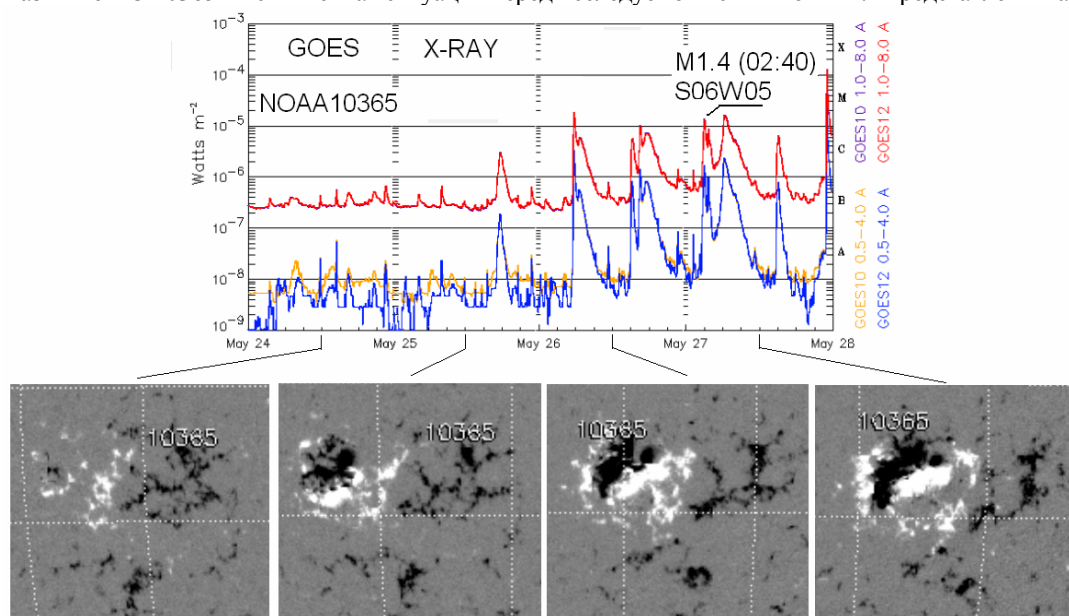
<sup>1</sup>Физический институт РАН им. П. Н. Лебедева, Москва, podgorny@lebedev.ru,

<sup>2</sup>Институт астрономии РАН, Москва, podgorny@inasan.ru

**Abstract.** MHD simulation show that magnetic field in the vicinity of singular line deforms into current sheet configuration. The form of magnetic field lines in the vicinity of a current sheet coincides with the magnetic line form of the flare electrodynamical model published by authors earlier. The calculated current sheet position coincides with the position of thermal soft X-ray emission. There are magnetic lines which exit from the region near the current sheet and which cross the photosphere not far from the most powerful source of hard X-ray emission. The obtained results confirm the proposed earlier electrodynamical model of the solar flare.

### Введение. Эволюция активной области и образование токового слоя.

Слабая активная область 10365 появилась на восточном лимбе 20.05.2003 и быстро развивалась. К 26.05.2003 область превратилась в мощную вспышечно активную область с линией инверсии сложной формы. Динамика магнитного поля АО 10365 и ее связь с вспышечной активностью была исследована в работах [1, 2]. Предметом нашего внимания стала вспышка M1.4 (27.05.2003 в 2:53), для которой имеются данные радиоизлучения и проекции положений теплового и пучкового жесткого рентгеновских излучений на поверхность Солнца. Вспышку произвела АО 10365, находящаяся в центре солнечного диска (S06 W05), т. е. положение источников проектируется на активную область в плоскости, перпендикулярной лучу зрения. Развитие АО 10365 и вспышечная ситуация перед исследуемой вспышкой M1.4 представлены на рис. 1.

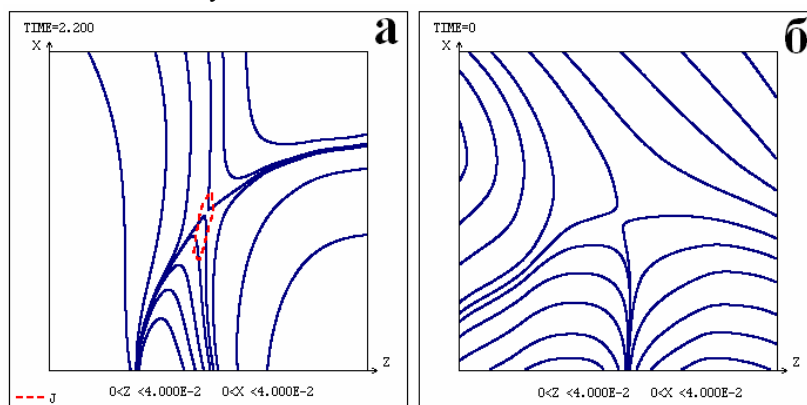


**Рисунок 1.** Динамика рентгеновского излучения 1 - 8 Å, измеренного на космическом аппарате GOES, и магнитограммы активной области NOAA 10365. (Цветной вариант рисунка в этой статье на сайте <http://pgia.ru/seminar>)

В работах [3-7] показано, что перед вспышкой над АО образуется токовый слой, а источники радиоизлучения и теплового рентгеновского излучения совпадают с положением токового слоя. Конфигурация магнитного поля в короне над АО и положение образующегося токового слоя вычислялось МГД моделированием. Граничные условия на фотосфере задавались из измерений магнитного поля аппаратом SOHO MDI (<http://soi.stanford.edu/magnetic/index5.html>). Начальная конфигурация задавалась полем в короне, вычисленным в потенциальном приближении для граничных условий на фотосфере 25.05.2003, когда токовый слой над АО еще не появился.

В настоящей работе для анализа трехмерной конфигурации магнитного поля короны использовалась новая разработанная методика, позволяющая оперативно находить токовые слои и рассматривать их проекции в плоскости, расположенной под любым углом в трехмерном пространстве.

Численный МГД расчет показал, что к моменту времени появления вспышки M1.4 над активной областью был сформирован токовый слой. Конфигурация линий магнитного поля и распределение тока (рис. 2а) лучше всего представляются в плоскости перпендикулярной вектору магнитного поля в центре слоя (в особой точке, где расположен максимум плотности тока). В данном случае такая плоскость наклонена к поверхности Солнца на угол  $18^\circ$ .



**Рисунок 2.** Конфигурация магнитного поля в окрестности токового слоя, образовавшегося в магнитном поле короны над активной областью 10365 (а) и потенциальное поле в окрестности особой линии типа X за три дня до вспышки (б). На магнитные линии токового слоя пунктиром наложена линия равной плотности тока (в цветном варианте статьи на сайте <http://pgia.ru/seminar> это красный пунктир).

Эта конфигурация совпадает с конфигурацией поля в модели вспышки, которая была нами ранее построена [8, 9] на основании МГД моделирования и анализа наблюдательных данных (рис. 3) (см. также обзор [10, 11]). Таким образом, получено новое доказательство правильности электродинамической модели солнечной вспышки.

Важно отметить, что в начальной конфигурации поля (25.05.2003) в той же плоскости имелась отчетливо выраженная X-точка (рис. 2б), которая в процессе трёхдневного развития магнитного поля вспышки сместилась вверх, и в ее окрестности в результате деформирования поля образовался токовый слой.

### МГД моделирование. Выбор расчетной области.

Как показывает наблюдение рентгеновского излучения на лимбе [12, 13], вспышки происходят высоко в короне (на высоте 15-30 км), где конфигурацию магнитного поля невозможно определить из наблюдений. Конфигурация магнитного поля для изучения процессов, происходящих во время солнечной вспышки, определялась путем численного МГД моделирования в короне над реальной активной областью. При задании начальных и граничных условий для решения МГД уравнений никаких предположений о механизме вспышки не делалось. Все условия брались из наблюдений. Измеряемое на фотосфере магнитное поле использовалось для задания граничного условия, остальные граничные условия аппроксимировались условиями свободного выхода. Моделирование начиналось за три дня до вспышки, когда сильных возмущений нет, и, поэтому, потенциальное магнитное поле, рассчитанное по измеряемому полю на фотосфере, может быть использовано для задания начального условия.

Решение осложняется из-за появления численных неустойчивостей, которые возникают прежде всего вблизи фотосферной границы, где градиенты магнитного поля велики. Для стабилизации численных неустойчивостей использовалась специально разработанная разностная схема, реализованная в программе ПЕРЕСВЕТ. Поскольку численное решение МГД уравнений требует значительного времени, разрабатывались численные методы с целью построения конечно-разностной схемы, которая должна быть устойчивой для максимально большого шага по времени, чтобы сократить время расчета.

Несмотря на использование специально разработанных методов, расчет на персональном компьютере занимает значительное время. Для сокращения времени расчета, моделирование проводилось в сокращенном масштабе времени, при котором изменение распределения поля на фотосфере происходит в  $10^4$  раз быстрее, чем в реальности. Моделирование в сокращенном масштабе времени позволило провести расчет, но быстрое изменение магнитного поля привело к появлению численной неустойчивости вблизи фотосферной границы. Однако использование разработанных методов позволило предотвратить распространение неустойчивости в корону и очень сильное возрастание поля вблизи фотосферы, которое смогло бы сделать расчет невозможным. В результате, полученное решение позволяет сделать некоторые

выводы относительно конфигурации поля в короне и появления вспышечной ситуации. В дальнейшем необходимо провести более точный расчет в реальном масштабе времени. Проведение такого расчета возможно с использованием современных суперкомпьютеров. Это показали оценки расчетного времени, сделанные на основании результатов моделирования в реальном масштабе времени, которое в настоящее время выполнено в течение первых нескольких минут эволюции поля. Такое моделирование показало отсутствие неустойчивости вблизи фотосферной границы благодаря медленному изменению поля на границе в реальном масштабе времени. Выполнение расчета в реальном масштабе времени на суперкомпьютере требует проведение распараллеливания вычислений.

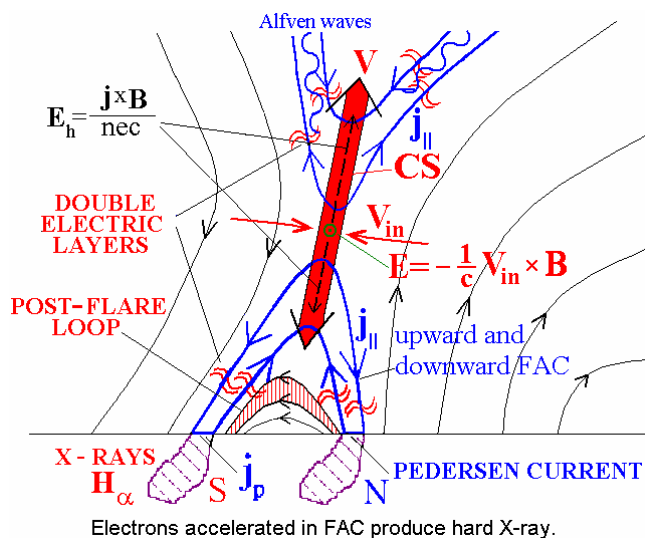


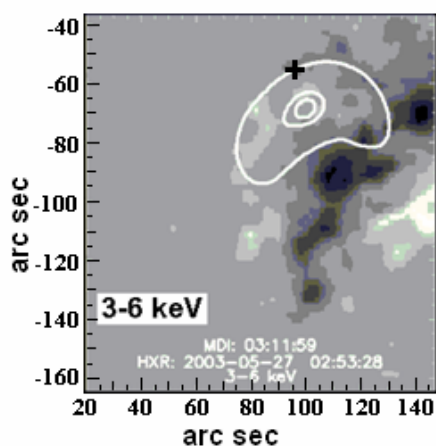
Рисунок 3. Электродинамическая модель солнечной вспышки (цветной вариант в этой статье на сайте <http://pgia.ru/seminar>).

В представленном здесь расчете в качестве единицы времени принято 6.108 сек, что соответствует времени прохождения альфвеновской волной размера активной области  $4 \times 10^{10}$  см для магнитного поля 300 Г (поле у основания короны; на фотосфере поле активной области достигает нескольких тысяч Г; поле мощного токового слоя в короне оценивается также как 300 Г) и плотности плазмы в короне  $10^8$  см<sup>-3</sup>. Эволюция поля на фотосфере за время выбранной безразмерной единицы в расчете при моделировании в сокращённом масштабе времени соответствует суточной эволюции поля на фотосфере. Моделирование началось с конфигурации поля, рассчитанной в потенциальном приближении более чем за двое суток перед вспышкой 27 мая 2003 г в 02:53. Момент 2.2 в безразмерных единицах соответствует моменту вспышки 27 мая 2003 г в 02:53 в активной области NOAA 10365, поэтому он выбран для сравнения с наблюдениями рентгена. Расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед, нижняя граница которого располагается на фотосфере. Центр этой фотосферной границы расчетной области располагался в центре активной области. В момент вспышки центр нижней границы расчетной области располагался на диске Солнца в точке с координатами (118.3", -87.27"). Оси X и Z расчетной области располагаются на фотосфере, ось X направлена с Востока на Запад, а ось Z направлена с Севера на Юг. Фотосферная граница расчетной области представляет собой квадрат со стороной 400 000 км, что в ~ 4 раза превосходит линейный размер активной области, располагающейся в центральной части квадрата. Длина стороны квадрата принимается за единицу длины. Ось Y направлена перпендикулярно фотосфере от Солнца, размер расчетной области вдоль нее составляет 120 000 км (0.3 в безразмерных единицах). Начало координат располагалось в северо-восточном углу расчетной области. Таким образом, расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед вида  $(0 < x < 1, 0 < y < 0.3, 0 < z < 1)$ . Подробно постановка задачи для моделирования над активной областью NOAA 10365 и описание расчетной области представлены в [14].

### Поиск положения солнечной вспышки и источников её рентгеновского излучения.

Разработан метод поиска источников мягкого теплового и жесткого пучкового рентгеновского излучения солнечной вспышки по магнитному полю, найденному в короне над активной областью численным решением МГД уравнений. Магнитное поле, наблюдаемое на фотосфере (солнечной поверхности) использовалось в качестве граничного условия для МГД уравнений. Согласно электродинамической модели солнечной вспышки (Рис. 3, [8, 9]), источник теплового рентгеновского излучения должен располагаться в токовом слое. Он появляется в результате нагрева плазмы током в слое в результате диссипации магнитного поля. Источники пучкового жесткого рентгеновского излучения располагаются в местах пересечения с фотосферой силовых линий, выходящих из токового слоя. Они появляются в результате взаимодействия пучков электронов, ускоренных в продольных токах, с плотной плазмой нижних слоев

солнечной атмосферы. Ускорение электронов вызвано электрическим полем Холла в слое. Для поиска источников теплового рентгеновского излучения, т.е. положения токового слоя, используется свойство слоя, согласно которому, локальный максимум абсолютной величины плотности тока располагается в центре слоя. Графическая система поиска позволяет выбрать в расчетной области любую плоскость, как угодно ориентированную в пространстве, и наносит на неё проекции положений максимумов плотности тока. На плоскость наносятся также линии равной плотности тока и плоские максимумы плотности тока, которые должны быть окружены этими линиями. Плоскость легко перемещается в перпендикулярном ей направлении. Таким образом, система позволяет найти положение каждого максимума плотности тока, а затем проанализировать конфигурацию магнитного поля в его окрестности, чтобы выясняется ли здесь токовый слой, т.е. источник теплового рентгеновского излучения. Подробно система поиска источников теплового рентгеновского излучения описана в [3], где было найдено положение токового слоя с координатами (0.46, 0.04, 0.445) в расчетной области в безразмерных единицах. На рис. 4 показано положение проекции токового слоя на картинную плоскость на карте наблюдаемого теплового излучения (координаты на диске Солнца (96", -56")), которая хорошо совпадает с положением источника теплового рентгеновского излучения (99", -64").

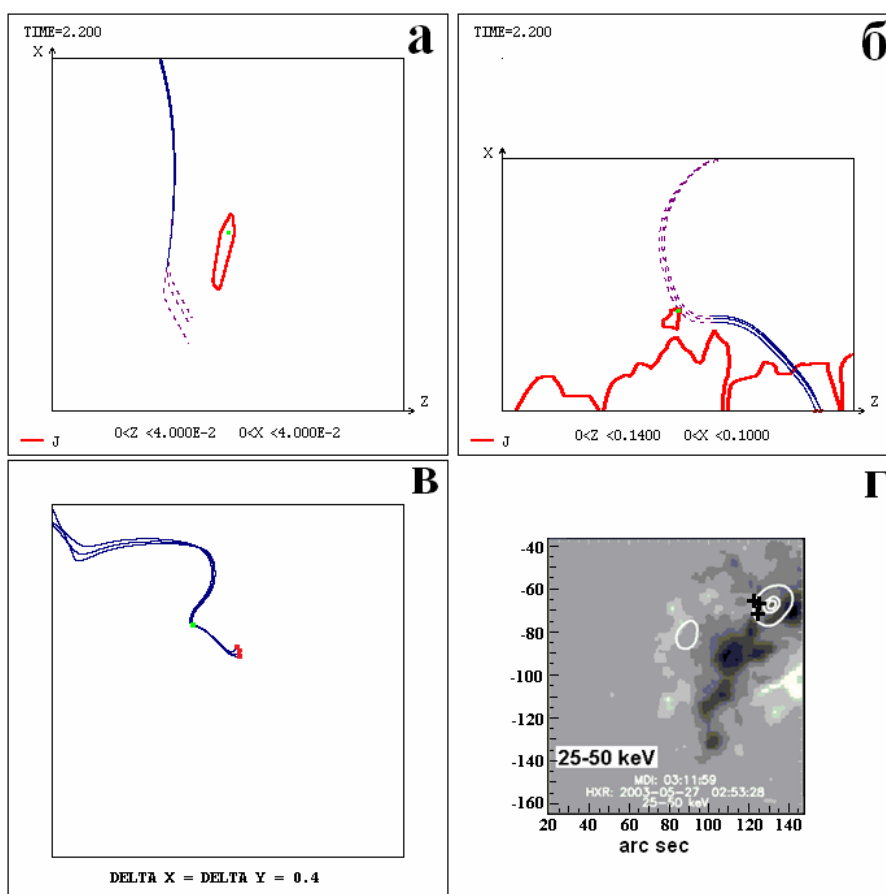


**Рисунок 4.** Вычисленное положение токового слоя отмечено знаком + в картинной плоскости на наблюдаемой карте теплового рентгеновского излучения 3-6 кэВ, полученного на космическом аппарате RHESSI (<http://rhessidatacenter.ssl.berkeley.edu>).

Конфигурация магнитного поля найденного токового слоя изображена на рис. 2а в плоскости, перпендикулярной вектору магнитного поля, в которой токовый слой наиболее ярко выражен. Для лучшего представления конфигурации магнитного поля в плоскости слоя изображены линии, касательные к проекциям магнитных векторов на плоскость. Пунктиром показана линия равной плотности тока. Плоскость токового слоя на рис. 2а проходит через точку расчетной области (0.46, 0.04, 0.445) перпендикулярно вектору магнитного поля (-0.843, -0.31, -0.44). Она пересекает фотосферную границу по линии, параллельной вектору  $(x, z) = (-0.462, 0.887)$  и наклонена к плоскости фотосферы на угол  $18^\circ$ . Такая конфигурация получилась в результате эволюции в течение трех суток из конфигурации потенциального поля в окрестности X-точки, изображенной на рис. 2. Конфигурация потенциального поля (Рис. 2б) показана в той же плоскости, что и конфигурация поля токового слоя (Рис. 2а). X-точка потенциального поля имела координаты в расчетной области (0.4541, 0.0083, 0.4787), в течение трех суток в процессе эволюции она переместилась в точку (0.46, 0.04, 0.445). Перемещение происходит вместе с деформацией поля в конфигурацию токового слоя.

Модернизированная графическая система позволяет наносить проекции силовых линий на плоскость для поиска источников жесткого пучкового рентгеновского излучения. Они должны располагаться в местах пресечения силовых линий, выходящих из токового слоя, с фотосферой. Графическая система позволяет для любой произвольно расположенной плоскости найти силовую линию, проходящую через любую точку на выбранной плоскости, и нанести проекцию этой линии на плоскость. Линию можно передвинуть, перемещая точку, как на плоскости, так и вместе с плоскостью в перпендикулярном плоскости направлении. Одновременно проекция этой линии рисуется в картинной плоскости (перпендикулярной лучу зрения) на которую также наносится точка пересечения этой силовой линии с фотосферой. В качестве выбранной плоскости удобно взять плоскость токового слоя. Имеется также возможность найти линию, выходящую из источника жесткого рентгеновского излучения на фотосфере, нарисовать её проекции на выбранную плоскость и на картинную плотность и определить точку её пересечения с выбранной плоскостью. На выбранную плоскость имеется возможность помимо проекций силовых линий наложить так же линии постоянной плотности тока и его максимумы, которые перестраиваются при смещении плоскости, также как и при поиске положения токового слоя.

Система поиска позволила установить, что линии, выходящие из точек вблизи токового слоя, пересекают плоскость фотосферы недалеко от самого мощного источника жесткого рентгеновского излучения. Точки, из которых выходят силовые линии, располагаются на расстоянии 0.007 безразмерных единиц (~ 3000 км) от центра токового слоя. На рис. 5а изображены проекции трех таких линий на плоскость токового слоя вместе с линией равной плотности тока и точкой максимума плотности тока, соответствующей центру токового слоя. Одна из точек, из которых выходят линии, располагается в плоскости слева от центра токового слоя на расстоянии 0.007 безразмерных единиц от него. Две другие точки смещены от первой точки за пределы плоскости по обе стороны от неё на расстояние 0.002 безразмерных единиц (~ 1000 км). Так же как и на рис. 2а и 2б, область рис. 5а имеет форму квадрата со стороной 0.04 безразмерных единиц. На рис. 5б изображены проекции этих трех линий на плоскость, перпендикулярную фотосфере, пересекающую фотосферу по линии, параллельной солнечному экватору, и содержащей центр токового слоя. На эту плоскость также нанесена линия равной плотности тока и максимум плотности тока в центре токового слоя. Область рис. 5б представляет собой прямоугольник шириной 0.14 и высотой 0.1 безразмерных единиц. На рис. 5в изображены проекции этих линий на картинную плоскость и точки пересечения этих линий с фотосферой. Линейный размер области картинной плоскости на рис. 5в составляет 0,4 безразмерных единиц (160000 км или ~ 200"). Эти точки отмечены также на карте наблюдаемого жесткого рентгеновского излучения 50 - 100 кэВ в картинной плоскости (Рис. 5г). Координаты этих точек в картинной плоскости составляют (124.0", -70.79"), (124.1", -68.40") и (123.1", -65.88"), а координаты самого мощного источника рентгеновского излучения составляют ("131, -67").



**Рисунок 5.** Силовые линии, проходящие в области вблизи слоя и места их пересечения с фотосферой. Проекция силовых линий на плоскость токового слоя (а) и плоскость, перпендикулярную фотосфере, (б) обозначены пунктиром, если линия находится за плоскостью (в цветном варианте в этой статье на сайте <http://pgia.ru/seminar> перед плоскостью - сплошная синяя линия, за плоскостью – фиолетовая пунктирная линия). Точки на (а) и (б) (зеленые в цветном варианте) – положения центра токового слоя. (в) – проекции линий на картинную плоскость (синие в цветном варианте), точка на линиях (зеленая в цветном варианте) – проекция положения токового слоя, места пересечения линий с фотосферой обозначены жирными точками в конце линий (красными в цветном варианте). (г) - места пересечения линий с фотосферой на карте наблюдаемого жесткого рентгеновского излучения, полученного на космическом аппарате RHESSI (<http://rhessidatacenter.ssl.berkeley.edu>), в картинной плоскости обозначены знаками +.



## Заключение

МГД моделирование показало, что при эволюции активной области АО 10365 магнитное поле в короне деформируется, и в окрестности особой линии формируется конфигурация поля, соответствующая токовому слою. Форма линий магнитного поля в окрестности токового слоя, образовавшегося в плоскости перпендикулярной направлению тока в слое, совпадает с формой линий электродинамической модели вспышки, опубликованной ранее авторами. Вычисленное положение токового слоя совпадает с положением источника теплового мягкого рентгеновского излучения. Имеются магнитные силовые линии, выходящие из области вблизи токового слоя, которые пересекают фотосферу недалеко от самого мощного источника жесткого рентгеновского излучения. Полученные результаты подтверждают предложенную ранее электродинамическую модель солнечной вспышки. Для дальнейшего уточнения процессов, происходящих во время солнечной вспышки, необходимо проведение более точных расчетов в реальном масштабе времени, чтобы избавиться от численной неустойчивости вблизи фотосферы, которая может исказить положение силовых линий, приходящих в источник жесткого рентгеновского излучения. Для удобства исследования необходимо также выбирать более мощную вспышку, формирующую ярко выраженные источники пучкового жесткого рентгеновского излучения.

Работа поддержана РФФИ, грант № 13-02-00064. Авторы благодарны Н.С. Мешалкиной за помощь в поиске наблюдательных данных.

## Литература

1. Подгорный А.И., Подгорный И.М.: 2011, *Астрономический журнал*, **88**, 684.
2. A.I. Podgorny and I.M. Podgorny: 2013, *Sun and Geosphere*, **8**, 63.
3. Podgorny A.I., Podgorny I.M.: 2013, *Proc. Physics of 31 Annual Seminar. Apatity*. P. 117.
4. A.I. Podgorny and I.M. Podgorny: 2013, *Sun and Geosphere*, **8**, 71.
5. Podgorny A.I., Podgorny I.M., Meshalkina N.S.: 2006: *Proc. Physics of 29 Annual Seminar. Apatity*. P. 203.
6. Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С.: 2007, *Астрономический Вестник*, **41**, 353.
7. Podgorny A.I., Podgorny I.M., Meshalkina N.S.: 2008: *Journal of Atmospheric and Solar-Terr. Phys.* **70**, 621.
8. Подгорный А.И., Подгорный И.М.: 2006, *Астрономический журнал*, **83**, 940.
9. Podgorny A.I., Podgorny I.M.: 2006, *Proc. Physics of 31 Annual Seminar. Apatity*. P. 203.
10. Подгорный А. И., Подгорный И.М.: 2012, *Геомагнетизм и Аэронавигация*, **52**, 163.
11. Подгорный А. И., Подгорный И.М.: 2012, *Геомагнетизм и Аэронавигация*, **52**, 176.
11. Masuda, S.; Kosugi, T., Hara, H., Tsuneta, S., and Ogawara, Y.: 1994, *Nature*, **371**, 495.
12. Lin R.P., Krucker, S., Hurford, G.J., et al.: 2003, *Astrophys. J.* **595**, L69.
13. Подгорный А.И., Подгорный И.М.: 2008, *Астрономический журнал*, **85**, 739.