

КОНФИГУРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОРОНЕ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ И ИСТОЧНИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ 10365

А.И. Подгорный¹, Н.С. Мешалкина²

¹Физический институт РАН им. П. Н. Лебедева, г. Москва

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

e-mails: podgorny@lebedev.ru, nata@iszf.irk.ru

Введение. Механизм солнечной вспышки и условия МГД моделирования в солнечной короне

Наблюдения теплового рентгеновского излучения с высоким разрешением, выполненные на космическом аппарате RHESSI для вспышек на лимбе [1], показали, что первичное освобождение энергии во время вспышки происходит в солнечной короне на высотах 15 - 30 тыс. км. Выделяется ранее запасенная магнитная энергия, поскольку вспышки происходят над активными областями, где поток магнитного поля на поверхности Солнца (поле ~ 3 000 Г, поток ~ 10²² Мкс) увеличивается перед вспышкой в несколько раз в течение 2-3 суток [2]. Для изучения солнечных вспышек необходимо знать конфигурацию магнитного поля в короне, которую невозможно определить из наблюдений. Наблюдения могут дать только распределение магнитного поля на солнечной поверхности - фотосфере. Возникает необходимость определить конфигурацию магнитного поля и распределение параметров плазмы в короне над активной областью путем численного решения уравнений магнитной гидродинамики (МГД), используя наблюдаемое распределение магнитного поля на фотосфере для задания граничных условий. Достаточно точно определить поле в короне таким способом может оказаться сложно из-за численных неустойчивостей, которые в первую очередь возникают вблизи фотосферной границы, где имеются сильные градиенты магнитного поля. Другой трудностью является представление сложной конфигурации поля в трехмерном пространстве. В настоящей работе делается попытка изучить конфигурацию магнитного поля в месте вспышечного освобождения энергии и во всей исследуемой области короны для имеющихся результатов МГД моделирования, используя специально разработанные для этой цели методы.

МГД моделирование в солнечной короне над активной областью 10365 показало появление токового слоя, положение которого в момент вспышки 27 мая 2003 года совпадает с положением вспышечного источника теплового рентгеновского излучения [3, 4]. Факт такого совпадения является независимым подтверждением механизма вспышки, согласно которому происходит взрывное освобождение магнитной энергии токового слоя, образовавшегося в солнечной короне. Диссипация магнитного поля приводит к нагреву плазмы, которая излучает в области энергий 1-20 кэВ, что означает появление источника теплового мягкого рентгеновского излучения. Механизм токового слоя, является одним из немногих (а может быть единственным), который может объяснить накопление энергии вспышки в короне в результате медленной эволюции магнитного поля на фотосфере. При этом конфигурация, в которой накапливается энергия, должна быть устойчивой, чтобы не разрушиться в процессе медленной эволюции поля на фотосфере, а затем она должна перейти в неустойчивое состояние. Токовый слой образуется в окрестности особой линии магнитного поля X-типа под воздействием возмущений, распространяющихся от фотосферы. Появляется ток вдоль особой линии, вблизи неё возникают силы $\mathbf{j} \times \mathbf{V}/c$, направленные в некоторых точках к особой линии, а в других точках от неё. Движение плазмы, вызванное этими силами, создает конфигурацию магнитного поля, соответствующую токовому слою. Слой стабилизируется течением плазмы вдоль него и плазмой в области, прилегающей к слою, из которой плазма втекает в слой, компенсируя её отток из слоя вдоль него, тем самым сохраняя баланс между давлением магнитного поля, окружающего слой, и газодинамическим давлением плазмы. Под воздействием значительной силы магнитного натяжения, плазма ускоряется вдоль слоя и вытекает из него, так что в ходе квазистационарной эволюции токового слоя полная масса плазмы в слое падает. При этом падает плотность плазмы внутри слоя вблизи его границы и в области, прилегающей к слою. Когда плотность плазмы вблизи слоя достигает достаточно малого порогового значения, окружающая слой плазма перестает стабилизировать слой - возникает неустойчивость, приводящая к вспышечному освобождению энергии [5].

В настоящее время предложен ряд альтернативных механизмов солнечной вспышки, однако кроме механизма освобождения энергии токового слоя авторам не известно других механизмов, которые могли бы объяснить медленное накопление энергии в устойчивой конфигурации, а затем её переход в неустойчивое состояние, что необходимо для появления вспышки в солнечной короне. Наиболее популярный механизм объясняет вспышку появлением магнитного жгута с током [6]. Согласно этим представлениям, жгут

ускоряется вверх магнитной силой $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c$, что приводит к выбросу плазмы и вспышечному освобождению энергии. Для моделирования этого процесса с самого начала задается неустойчивая или неравновесная конфигурация с магнитным жгутом.

Основываясь на механизме освобождения энергии в токовом слое и используя результаты численного моделирования, предложена электродинамическая модель солнечной вспышки, объясняющая её основные наблюдаемые проявления [7]. Электрическое поле, вызванное быстрым изменением магнитного поля во время вспышечной неустойчивости, ускоряет протоны вдоль особой линии до энергий ~ 20 ГэВ, что приводит к появлению солнечных космических лучей во время вспышек. Ускорение плазмы вдоль слоя вверх силой магнитного натяжения, которая значительно увеличивается во время взрывной неустойчивости, вызывает выброс корональной массы. Источники жесткого рентгеновского излучения располагаются в местах пересечения с солнечной поверхностью силовых линий, пересекающих токовый слой, поскольку рентгеновское излучение появляется в результате взаимодействия электронов, ускоренных в продольных токах, с нижними плотными слоями солнечной атмосферы. Продольные токи вдоль силовых линий, пересекающих токовый слой, вызываются электрическим полем Холла, появившегося вследствие ускорения вдоль токового слоя электронов силой $\mathbf{j} \mathbf{B}_n$ – произведения плотности тока в токовом слое на компоненту магнитного поля, перпендикулярную слою.

В настоящее время невозможно абсолютно исключить существование альтернативного механизма вспышки, поэтому при постановке условий МГД моделирования никаких предположений о механизме солнечной вспышки не делалось. Целью моделирования было определить механизм солнечной вспышки, задавая все условия из наблюдений. Предложенный подход отличался от применяемого ранее, когда с самого начала выдвигалась гипотеза о механизме вспышки, которая затем проверялась. Система вывода графических представлений полученных численных решений так же разработана таким образом, чтобы можно было как можно лучше понять трехмерную конфигурацию магнитного поля любой сложности не зависимо от механизма солнечной вспышки. Измеряемые на фотосфере магнитные поля использовались для задания граничных условий. Условия для задания остальных величин на фотосферной и нефотосферной границах расчетной области аппроксимировались условиями свободного выхода. Подробно условия моделирования в короне над активной областью описаны в [8]. Для повышения скорости расчета авторами специально разработана устойчивая при больших временных шагах конечно-разностная схема [9].

Несмотря на применение специально разработанных методов, МГД моделирование в короне над активной областью выполняется настолько медленно, что на обычном компьютере для активной области 10365 расчет удалось провести только в сильно сокращенном масштабе времени (магнитное поле в задаваемых на границе условий менялось в 10^4 раз быстрее, чем на фотосфере Солнца). При таком расчете в результате неестественно быстрого изменения поля у фотосферной границы возникает численная неустойчивость, искажающая решение. Однако применяемые методы дали возможность не допустить распространение неустойчивости внутрь расчетной области от фотосферной границы и ограничить рост величин в приграничной области, так чтобы был возможен расчет. В дальнейшем предполагается провести расчет в реальном масштабе времени на суперкомпьютере, для чего необходимо распараллелить вычисления. Исследование конфигурации поля для полученного численного решения может помочь отработать созданную методику, чтобы в дальнейшем ее можно было применить к результатам, полученным МГД моделированием в реальном масштабе времени.

Методы изображения и исследования конфигурации магнитного поля, в короне, полученного численным МГД моделированием

Разработана графическая система, предназначенная для поиска положения вспышки по результатам МГД моделирования и визуализации численных решений МГД уравнений в солнечной короне. Метод поиска положений вспышки основан на том факте, что независимо от системы координат локальный максимум абсолютного значения плотности тока располагается в середине токового слоя. Ищутся максимумы плотности тока, далее вблизи них проводится анализ конфигурации магнитного поля. Подробное описание системы поиска положения вспышки содержится в [4]. Использование этой системы поиска позволило определить положение вспышки 27 мая 2003 г в 02:53, которое хорошо совпадает с положением источника теплового рентгеновского излучения. Систему можно было бы без труда приспособить для поиска положения вспышки, если бы реализовался альтернативный механизм. Например, если бы вспышка объяснялась жгутом, то можно было бы использовать существующую систему поиска практически без изменений, поскольку локальный максимум плотности тока находится в жгуте. Однако если вспышка осуществляется освобождением энергии токового слоя, то никакой модернизации существующей системы поиска положения вспышки не требуется.

Для понимания механизма солнечных вспышек, необходимо хорошо представлять конфигурацию магнитного поля, как в месте самой вспышки, так и в достаточно большой области пространства. Для изучения взрывного процесса в плазме солнечной короны конфигурация магнитного поля должна быть известна прежде всего вблизи токового слоя, т. е., согласно нашим представлениям, в месте первичного

освобождения энергии солнечной вспышки. Согласно электродинамической модели солнечной вспышки, жесткое рентгеновское излучение возникает в местах пересечения с фотосферой магнитных силовых линий, пересекающих токовый слой. Поэтому, для понимания наблюдаемых проявлений вспышек, необходимо представлять конфигурацию магнитного поля в области солнечной короны большого размера ($\sim 1\text{-}3 \times 10^{10}$ см) над активной областью, где произошла вспышка.

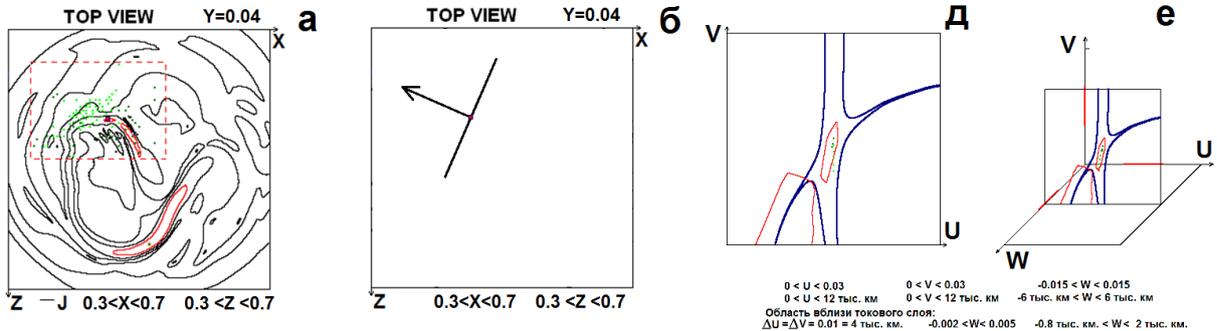


Рисунок 1. В плоскости, параллельной фотосфере и проходящей через центр токового слоя (а) - положение токового слоя, отмеченное квадратным значком, и линии равной плотности тока, (б) - проекция магнитного вектора в центре токового слоя и линия пересечения с плоскостью конфигурации поля токового слоя. (в, е) - линии, касательные проекциям векторов магнитного поля на плоскость конфигурации.

В ходе недавно проведенной модернизации графической системы добавлено окно, в которое выводятся силовые линии в трехмерном пространстве. В результате, для исследования конфигурации магнитного поля в короне, появилась возможность одновременно разными способами представить линии, проведенные через любые выбранные точки в пространстве. Одновременно строятся проекции этих линий на выбранную плоскость, на картинную (перпендикулярную лучу зрения) плоскость и расположение этих линий в трехмерном пространстве. Точки, через которые проходят силовые линии можно перемещать в пространстве как независимо друг от друга произвольным образом, так и вместе с перемещением основной выбранной плоскости, расположив их так, чтобы они все время находились на этой плоскости.

Конфигурация магнитного поля во время вспышки в короне над активной областью и в месте вспышечного освобождения энергии

МГД моделирование в солнечной короне проводилось в расчетной области в виде прямоугольного параллелепипеда. Его нижняя граница располагается на фотосфере и представляет собой квадрат, размер которого 400 тыс. км. принят в качестве безразмерной единицы длины. Этот размер в ~ 4 раза превосходит линейный размер активной области. Центр этого квадрата расположен в середине активной области с координатами (118.3", -87.27") на диске Солнца в момент вспышки 02:53 27 мая 2003 г. Оси X и Z расчетной области располагаются на фотосфере, ось X направлена с Востока на Запад, а ось Z направлена с Севера на Юг. 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 [8].

Максимум плотности тока в токовом слое для вспышки 27 мая 2003 г в 02:53 расположен в точке (0.46, 0.04, 0.445) (см. [3, 4]), его положение на плоскости $y=0.04$, параллельной фотосфере, нанесено квадратным значком на Рис. 1а. На этом рисунке нанесены также линии равной плотности тока и проекции максимумов плотности на эту плоскость, обозначенные зелеными точками. Конфигурация магнитного поля наиболее ярко выражает токовый слой в плоскости, перпендикулярной вектору магнитного поля в центре токового слоя (максимум плотности тока), которую будем называть плоскостью конфигурации токового слоя. Вектор магнитного поля в точке (0.46, 0.04, 0.445) в безразмерных единицах составляет $\mathbf{V} = (-0.179, -0.066, -0.093)$ (в качестве единицы магнитного поля принято 300 Г).

Чтобы представлять ориентацию токового слоя, на Рис. 1б изображена проекция этого вектора на плоскость фотосферы и линия пересечения плоскости конфигурации токового слоя с плоскостью, параллельной фотосфере, проходящей через точку максимума (0.46, 0.04, 0.445). Поскольку компонента V_y вдоль оси Y отрицательна ($V_y = -0.066$), плоскость конфигурации токового слоя наклонена к плоскости, перпендикулярной фотосфере, на 18° , так что ее верхняя часть отклонена в сторону изображенной проекции вектора. Для изучения конфигурации вблизи токового слоя изображения на Рис. 1в, г выводятся на плоскость в квадрат или в объем в куб со стороной 0.03, в центре которых располагается точка максимума (0.46, 0.04, 0.445). Ось W направлена вдоль вектора магнитного поля $\mathbf{V} = (-0.179, -0.066, -0.093)$. Оси U и V

располагаются на плоскости конфигурации магнитного поля токового слоя, так что ось U направлена вдоль линии пересечения плоскости конфигурации токового слоя и плоскости, содержащей вектор магнитного поля $\mathbf{B} = (-0.179, -0.066, -0.093)$ и ось Y .

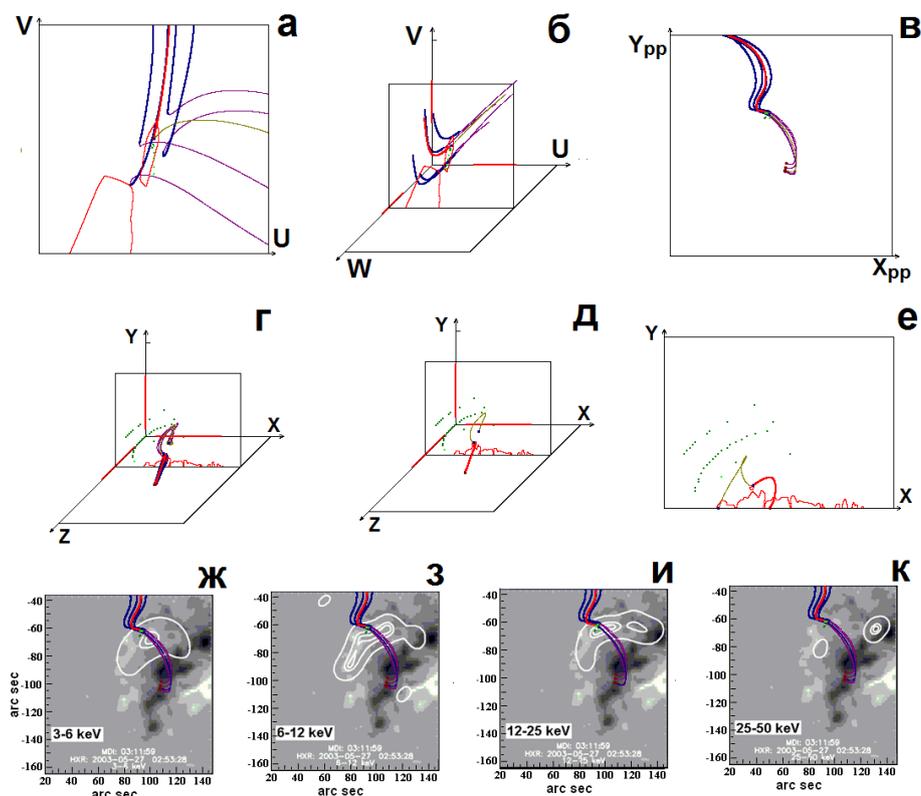


Рисунок 2. Проекция магнитных силовых линий на плоскость конфигурации поля (а), магнитные силовые линии в пространстве вблизи токового слоя (б), их проекции на картинную плоскость (в). Магнитные линии в короне (г, д), проекция магнитной линии, проходящей через центр токового слоя на плоскость, перпендикулярную фотосфере (е). Проекция магнитных линий на карты распределения интенсивности рентгеновского излучения.

Цветной вариант рисунков в этой статье на сайте <http://pgia.ru:81/seminar/archive/>.

Область, содержащая токовый слой $\Delta u = \Delta v = 0.01$ безразм. ед. (4 тыс. км.), $-0.005 < w < 0.002$. При таких пределах изменения w максимальное значение плотности тока в плоскости, перпендикулярной оси W , изменяется не более чем на 10%, а за этими пределами ($w < -0.005$, $w > 0.002$) оно резко падает. Поэтому при исследовании конфигурации магнитного поля, крайними плоскостями, через точки которых проходят выбранные для изображения линии, (см. Рис. 3 ниже) являются плоскости $w = -0.005$ и $w = 0.002$. На рис. 1в и 1г изображены линии, касательные к проекциям векторов магнитного поля на плоскость конфигурации токового слоя, проходящие на расстоянии ~ 0.001 от центра токового слоя. Их расположение имеет физический смысл, поскольку указывает на направление перпендикулярных им магнитных сил, приводящих плазму в движение - втеканию плазмы в слой в перпендикулярном ему направлении и вытеканию вдоль слоя. Эти силы создают токовый слой с накопленной в нем магнитной энергией, а затем разрушают его при переходе системы в неустойчивое состояние. Силы возникают вследствие появления тока вдоль особой линии, перпендикулярной плоскости конфигурации токового слоя. Нормальная этой плоскости компонента магнитного поля не оказывает влияния на магнитные силы, поскольку направлена вдоль тока. Поэтому силы определяются только компонентами поля на плоскости, т. е. проекциями векторов магнитного поля, касательные которым изображены на рис. 1в и 1г.

На Рис. 2а-в представлены силовые линии, проходящие вблизи центра токового слоя – проекции линий на плоскость конфигурации (Рис. 2а), линии в пространстве (Рис. 2б) и проекции линий на картинную плоскость (Рис. 2в) в области ($20'' < x < 190''$, $-165'' < y < 5''$) солнечного диска, для которой имеются полученные на космическом аппарате RHESSI (<http://rhessidatacenter.ssl.berkeley.edu>) карты мягкого и жесткого рентгеновского излучения для вспышки 27 мая 2003 г в 02:53. Четыре линии проходят через те же точки на плоскости конфигурации, что и касательные к проекциям векторов на Рис. 1в и 1г, их часть перед плоскостью конфигурации изображена как жирная синяя линия, а за этой плоскостью – тонкая фиолетовая. Ещё одна линия проходит через центр слоя, она изображена как жирная красная линия перед плоскостью

конфигурации, а за этой плоскостью – тонкая фиолетовая. Учет всех компонент магнитного поля для силовой линии делает конфигурацию поля настолько сложной, что в настоящее время нет возможности установить, отражает ли расположение силовых линий физический смысл для процессов в токовом слое. На Рис. 2г эти линии представлены в короне над активной областью, видно, что их расположение не сильно отличается от расположения линии, проходящей через центр токового слоя (Рис. 2д). Проекция линии, проходящей через центр токового слоя, на плоскость, перпендикулярную фотосфере, расположенную параллельно солнечному экватору, и содержащую центр токового слоя, изображена на Рис. 2е. На Рис. 2ж-к проекции магнитных линий наложены на карты интенсивности рентгеновского излучения в различных диапазонах вместе с магнитограммами.

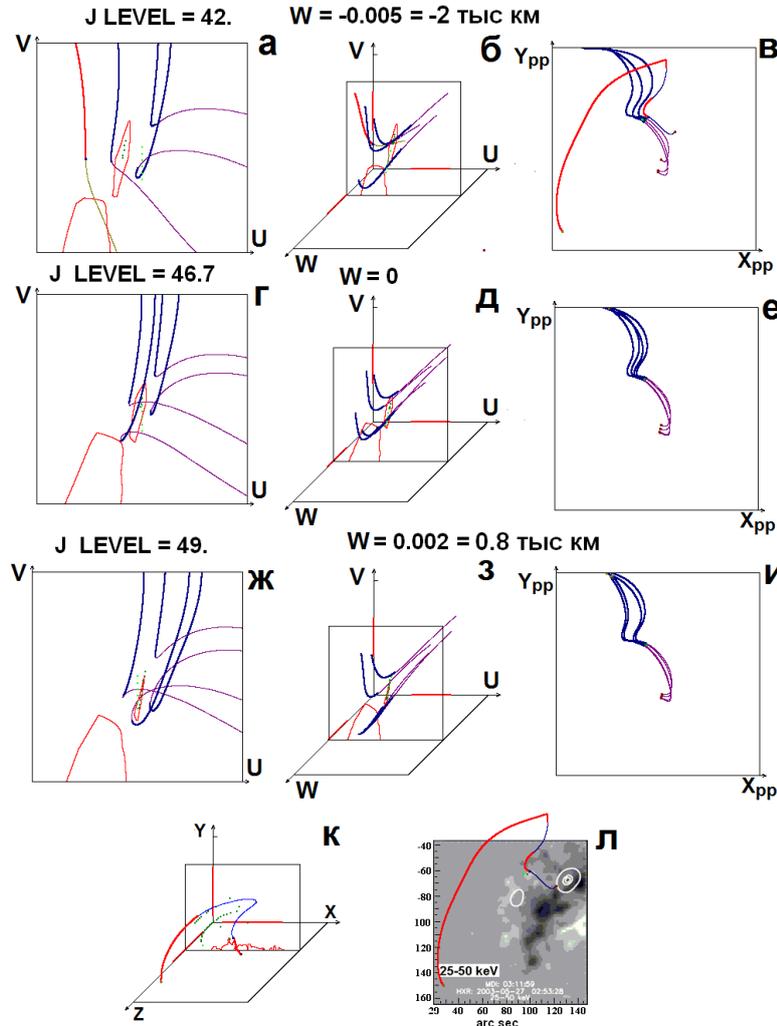


Рисунок 3. (а-и) - магнитные линии в пространстве, их проекции на плоскость конфигурации поля токового слоя и картинную плоскость, (к, л) - линия, пересекающая фотосферу вблизи источника жесткого рентгеновского излучения.

На Рис. 3 представлено расположение магнитных линий в пространстве их проекции на плоскость конфигурации и картинную плоскость. Линии проходят через точки вблизи центра токового слоя в плоскости конфигурации $w=0$ и параллельной ей плоскостях $w=-0.005$ и $w=0.002$. Расположение в короне над активной областью всех линий кроме одной мало отличается от расположения линии, проходящей через центр токового слоя (Рис. 2д). Расположение в короне одной линии, проходящей через точку плоскости, $w=-0.005$, изображенной как жирная красная перед плоскостью $w=-0.005$ и тонкая коричневая за этой плоскостью, (Рис 3к) существенно отличается от расположения других линий. Она пересекает фотосферу вблизи источника жесткого рентгеновского излучения (Рис. 3л). Магнитное поле вблизи фотосферы может быть искажено вследствие численной неустойчивости, так что сейчас трудно сказать, насколько точно места пересечения силовых линий, выпущенных из токового слоя, соответствуют этим точкам пересечения для реального поля. Однако появление такой линии для реального поля пересекающих токовый слой магнитных линий, которые пересекают фотосферу в местах расположения источников жесткого рентгеновского излучения.

Выводы

1. Разработана и модернизирована система графического вывода для исследования сложной конфигурации магнитного поля в корне над активной областью во время вспышечной ситуации.
2. Исследование конфигурации магнитного поля вблизи токового слоя в короне над активной областью 10365 для вспышки 27 мая 2003 г в 02:53 показало, что физический смысл процессов накопления и быстрого освобождения энергии вспышки отражают не магнитные силовые линии, а линии в плоскости конфигурации токового слоя, касательные к проекциям векторов магнитного поля на эту плоскость. Расположение этих линий, имеющих противоположные направления по обе стороны от слоя, соответствует существованию сил, которые создают токовый слой, а затем способны его разрушить при переходе системы в неустойчивое состояние.

3. Реальные силовые линии образуют сложную конфигурацию вблизи токового слоя. Используя разработанную систему графического вывода, всегда можно детально изучить расположение силовых линий в такой сложной конфигурации.
4. Изучено расположение в короне магнитных линий, проходящих вблизи токового слоя и пересекающих его. Поскольку рассчитанное магнитное поле искажено вблизи фотосферы из-за численной неустойчивости, проведенное исследование позволяет сделать только предварительный вывод о возможности пересечения фотосферы магнитной линией, выходящей из токового слоя, в месте расположения источника жесткого рентгеновского излучения. Более точные выводы могут быть сделаны после проведения расчетов в реальном времени, в которых неустойчивость вблизи фотосферной границы, связанная с неестественно быстрым изменением магнитного поля, должна быть значительно подавлена.

Благодарность. Авторы благодарны профессору И.М. Подгорному за исключительно плодотворное сотрудничество и обсуждение полученных результатов.

Литература

1. Lin R. P., Krucker, S., Hurford, G. J., et al.: 2003, *Astrophys. J.* **595**, L69.
2. Подгорный А. И., Подгорный И. М., Мешалкина Н. С.: 2015, *Астрономический журнал.* **92**, 669.
3. Podgorny A. I., Podgorny I. M.: 2013, *Sun and Geosphere.* **8**, 71.
4. Podgorny A. I., Podgorny I. M.: 2013, "Phys. of Auroral Phenomena", Proc. 36 Annual Seminar, Apatity. P 117.
5. Podgorny A.I.: 1989, *Solar Phys.* **123**, 285.
6. Forbes T. G.: 1991, *Geophys. Fluid Dynamics.* **63**, 15.
7. Подгорный А. И., Подгорный И. М.: 2006, *Астрономический журнал.* **83**, 940.
8. Подгорный А. И., Подгорный И. М.: 2008, *Астрономический журнал.* **85**, 739.
9. Подгорный А.И., Подгорный И.М.: 2004, *Журнал вычислительной мат. и мат. физ.* 44, 1873