

## ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ, ОСНОВАННЫЙ НА НАКОПЛЕНИИ ЭНЕРГИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ТОКОВОГО СЛОЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

© 2019 г. **И. М. Подгорный**<sup>1</sup>, **А. И. Подгорный**<sup>2</sup>, \*

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт РАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

\*podgornyjai@lebedev.ru

Поступила в редакцию 16.04.2019 г.

После доработки 22.04.2019 г.

Принята к публикации 25.04.2019 г.

Во время солнечной вспышки за несколько десятков минут освобождается магнитная энергия  $\sim 10^{32}$  эрг. Неизменность магнитного поля на солнечной поверхности во время вспышек доказывает появление вспышки в короне. Анализ динамики электронной температуры солнечной атмосферы дает независимое доказательство коронального происхождения вспышки. Появление вспышки в короне объясняется освобождением энергии, накопленной в магнитном поле токового слоя. Для исследования вспышечной ситуации проводилось численное МГД моделирование над реальной активной областью. Результаты моделирования показали появление токового слоя, положение которого совпадает с положением наблюдаемого источника теплового рентгеновского излучения. Разработана методика проведения расчетов в реальном масштабе времени. Основываясь на механизме освобождения энергии в токовом слое предложена электродинамическая модель солнечной вспышки, объясняющая ее основные наблюдаемые проявления. Источники жесткого рентгеновского излучения появляются вследствие торможения в нижних плотных слоях солнечной атмосферы пучков электронов, ускоренных в продольных токах. Ускорение солнечных космических лучей происходит в токовом слое электрическим полем  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$ , а не в ударных волнах.

DOI: 10.1134/S0023420619060062

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Во время солнечной вспышки за несколько десятков минут происходит освобождение  $\sim 10^{32}$  эрг магнитной энергии, которая переходит в энергию нагретой плазмы (в месте вспышки в солнечной короне температура повышается до 30–50 МК (миллионов градусов К) по сравнению с  $\sim 1$  МК фоновой короны), кинетическую энергию выбросов плазмы в межпланетную среду (их масса достигает  $\sim 10^{14}$  г, а скорость —  $\sim 10^7$  см/с), энергию ускоренных заряженных частиц — солнечных космических лучей (в основном протонов — до 20 ГэВ) и энергию излучения в широком диапазоне — радиоизлучение, оптическое излучение, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение (мягкое теплое 1–20 кэВ и жесткое пучковое 20–200 и выше кэВ), создаваемого ускоренными электронами и тепловыми электронами нагретой плазмы и  $\gamma$ -излучение, возникающее в результате ядерных реакций под действием ускоренных протонов, попадающих на Солнце. Наиболее интересным и необычным явлением, возникающим во время солнечных вспышек, является ускоре-

ние заряженных частиц до энергий, значительно превышающих тепловую — появление солнечных космических лучей. Во время вспышки освобождается магнитная энергия, поскольку вспышки происходят над активной областью с большим магнитным полем (на солнечной поверхности оно достигает 3000 Гс). Единственным резервуаром энергии, необходимой для вспышки ( $\sim 10^{32}$  эрг) в короне, может служить магнитное поле, где энергия поля  $B^2/8\pi$  значительно превышает тепловую энергию плазмы  $nkT$ .

Первичное освобождение энергии солнечной вспышки происходит в солнечной короне на высотах 15000–30000 км, что доказано экспериментально благодаря наблюдениям с высоким разрешением теплового рентгеновского излучения от вспышек на лимбе [1]. Существует ряд других наблюдательных доказательств энерговыделения вспышки в короне. Наблюдения предвспышечной ситуации и вспышки в спектральных линиях ионов высокоионизованного железа (излучающих при температуре 6.3, 10 и 20 МК) показывают эволюцию перед вспышкой структуры с высокой

температурой, которая может появиться только в горячей короне, и резкое возрастание температуры в этой структуре во время вспышки. Вспышечное выделение энергии в короне отчетливо наблюдается в линиях ионов железа для вспышек на лимбе диска. Во время вспышки отсутствует сколько-нибудь значительные изменения магнитного поля на солнечной поверхности, в то время как значительные изменения поля на поверхности должны были бы происходить при вспышечном энерговыделении в хромосфере или на фотосфере. Наблюдения проявлений вспышек на фотосфере (линия  $H_{\alpha}$  6563 Å на фотосфере, линия 1600 Å иона CIV в переходной области между хромосферой и короной) показывают всегда появление, по крайней мере, двух лент, что объясняется распространением быстрых электронов от места вспышки в хромосферу вдоль магнитных линий, выходящих из токового слоя. Если бы энергия вспышки освобождалась бы в хромосфере, наиболее реально было бы появление только одной яркой области, по крайней мере, в некоторых вспышках.

Понимание механизма солнечной вспышки, дающее возможность при использовании численного магнитогидродинамического моделирования установить вспышечную ситуацию в солнечной короне и найти место накопления магнитной энергии для солнечной вспышки, может улучшить качество прогноза солнечных вспышек. В настоящее время для осуществления прогноза солнечных вспышек используются феноменологические признаки без понимания физического механизма вспышки. Однако, некоторые признаки, которые, как показал опыт, можно использовать для прогноза, подтверждают, механизм вспышки, основанный на освобождении магнитной энергии токового слоя. Например, признак, согласно которому, вероятность появления вспышки значительно повышается в области с чередующимся расположением пятен противоположной полярности по сравнению с областями с однородным магнитным полем, в которых имеются только два пятна противоположной полярности или все пятна одинаковой полярности расположены в одной части области. При чередовании полярностей источников магнитного поля на солнечной поверхности в короне появляются особые линии, вблизи которых образуются токовые слои.

Улучшение качества прогноза солнечных вспышек необходимо с практической точки зрения, вследствие определенного вредного воздействия вспышек на жизнедеятельность человека. Радиоизлучение вспышек может помешать навигации. Наводки электрического поля на больших расстояниях вызывающиеся в результате магнитных суббурь, вызванных солнечными вспышками, могут привести к порче трансформаторных станций и другого электрического оборудования, иногда даже выходу из строя линий электропере-

дач (хотя нужно признать, что такие случаи бывают крайне редко). Космические лучи и рентгеновское излучение, вызванные солнечными вспышками, могут вызвать облучение космонавтов, если не принять меры предосторожности. Многолетний опыт показал отсутствие сколько-нибудь значительного влияния солнечных вспышек на здоровье человека, так что нет необходимости искусственно преувеличивать это влияние с целью привлечения внимания к проблеме. Помимо практической ценности, понимание физики интересного взрывного процесса обогатит наши представления о явлениях, происходящих в космической и лабораторной плазме.

Согласно гипотезе С.И. Сыроватского [2], появление вспышки в короне можно объяснить накоплением энергии в магнитном поле токового слоя. Слой образуется в окрестности особой линии магнитного поля X-типа под действием возмущений, распространяющихся от фотосферы. Магнитные силы  $\mathbf{j} \times \mathbf{V}/c$  вызывают движение плазмы, которое деформирует магнитное поле в конфигурацию, соответствующую токовому слою. После квазистационарной эволюции, в ходе которой полная масса плазмы слоя уменьшается вследствие быстрого вытекания плазмы из слоя под воздействием силы магнитного натяжения [3, 4], токовый слой переходит в неустойчивое состояние, и происходит взрывное освобождение его магнитной энергии.

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 ее переход в неустойчивое состояние в условиях реальной активной области. Из всех предлагаемых механизмов вспышки только механизм токового слоя может объяснить медленное накопление магнитной энергии в устойчивой конфигурации в короне, которая не может разрушиться в процессе накопления энергии и, затем, вспышечное освобождение накопленной энергии при переходе системы в неустойчивое состояние.

Наиболее популярный альтернативный механизм объясняет вспышку появлением магнитного жгута с током [5]. Согласно этим представлениям, жгут ускоряется вверх магнитной силой  $\mathbf{j} \times \mathbf{V}/c$ , что приводит к выбросу плазмы и вспышечному освобождению энергии. Для моделирования этого процесса чаще всего с самого начала задается неустойчивая или неравновесная конфигурация с магнитным жгутом. Попытки получить жгут в короне в результате эволюции магнитного поля под действием возмущений на фотосфере проводились в работе [6] и в работах [7, 8]. В работе [6] жгут получался закручиванием оснований маг-

нитной арки. После закручивания, превосходящего пороговое ( $4\pi$ ) возникала изгибная неустойчивость, однако, для появления такой ситуации над активной областью, скорость закручивания должна была превосходить на порядок наблюдаемую скорость вращения пятен. В работах [7, 8] при постановке задачи МГД моделирования начальное магнитное поле, задаваемое двумя магнитными зарядами, чрезвычайно упрощено по сравнению с полем вспышечной активной области, а движение плазмы на фотосфере, приводящее к требуемой деформации поля в короне задавалось настолько сложным, что его реализацию трудно себе представить на фотосфере в активной области Солнца. Кроме того, для того, чтобы жгут мог появиться в такой ситуации, невозможно обойтись без пересоединения, а значит и токового слоя, без которого пересоединение невозможно. А само появление токового слоя уже означает возможность вспышки и, поэтому, в этом случае для вспышки не нужен жгут. Даже в этой неестественной ситуации, которая непонятно как может быть получена над реальной активной областью, энерговыделение вспышки должно происходить в токовом слое.

Для выяснения механизма вспышки проводилось МГД моделирование над реальной активной областью, когда все условия берутся из наблюдений, и никаких предположений о механизме вспышки при постановке условий не делалось. Целью такого моделирования является установить механизм вспышки. Предложенный подход отличался от применяемого ранее, когда с самого начала выдвигалась гипотеза о механизме вспышки, которая затем проверялась. Из всех предлагаемых механизмов вспышки только токовый слой получается в результате численного магнитогидродинамического моделирования в короне над активной областью, когда все условия для постановки задачи берутся из наблюдений. Предложенное в настоящей работе моделирование показало совпадение положения найденного токового слоя с положением наблюдаемого источника теплового рентгеновского излучения.

Проведенное недавно китайско-американской группой моделирование вспышечной ситуации с использованием суперкомпьютера в близкой к нашей постановке задачи [9] подтвердило наши результаты. В месте вспышечного освобождения энергии появлялся токовый слой, магнитные силовые линии вблизи него хорошо совпадают с линиями, полученными из изображений ультрафиолетового излучения вблизи места вспышки. При этом появление жгутов или каких-либо других признаков альтернативных механизмов вспышки, как и у нас, обнаружено не было. Принципиальным отличием применяемых нами методов является разработка и использование графической системы поиска токовых слоев, которая поз-

воляет найти и исследовать вспышечную конфигурацию для не самых крупных вспышек, когда простой анализ магнитного поля не позволяет определить место накопления магнитной энергии для вспышки из-за присутствия значительной компоненты поля вдоль особой линии. В работе [9] изучалась крупная вспышка бала X3.1, произошедшая 24.X.2014 г. в активной области NOAA 12192, размер которой превосходил размеры всех активных областей за последние 25 лет, так что токовый слой можно было найти непосредственно из рассчитанной конфигурации поля.

Имеющиеся результаты моделирования в короне над активной областью являются независимым дополнительным подтверждением механизма вспышки, основанного на освобождении магнитной энергии токового слоя.

## 2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НА СОЛНЕЧНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРЕД ВСПЫШКАМИ И ВО ВРЕМЯ ВСПЫШЕК

Поскольку, согласно многочисленным сообщениям, первичное освобождение магнитной энергии вспышки происходит высоко в короне, возникает необходимость численного МГД моделирования для установления конфигурации магнитного поля в короне, которую получить из наблюдений невозможно. Однако, некоторую информацию о механизме вспышки можно получить из измеряемого непосредственно распределения магнитного поля на солнечной поверхности, поскольку поле в короне в значительной мере определяется токами под солнечной поверхностью. Для исследования влияния магнитного поля активной области на солнечные вспышки [10–12] использовались измеряемые распределения компоненты магнитного поля, направленной вдоль луча зрения (line-of-sight magnetic component, сокращенно LOS), на солнечной поверхности в активной области. Для анализа вспышек и предвспышечной ситуации в областях AO10486, AO10365 и AO10720 использовались данные прибора Michelson Doppler Imager (MDI) космического аппарата *Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)* (<http://soi.stanford.edu/magnetic/index5.html>) который раз в  $\sim 1.5$  ч снимал карту поля вдоль луча зрения с разрешением  $\sim 2$  гелиоцентрических угловых секунды ( $\sim 1000$  точек вдоль диаметра солнечного диска). Для анализа областей AO11158 и AO11429 использовались данные прибора Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) космического аппарата *Solar Dynamics Observatory (SDO)* (<http://jsoc.stanford.edu/ajax/lookdata.html>) который раз в 45 с снимал карту поля вдоль луча зрения с разрешением  $\sim 0.5$  гелиоцентрических угловых секунды ( $\sim 4000$  точек вдоль диаметра солнечного диска). Поскольку вспышка длится несколько десятков минут (в отдельных случаях длительность вспыш-

ки может составлять до трех часов), получить некоторую информацию о поведении магнитного поля на фотосфере во время вспышки на основании данных *SOHO/MDI* было возможно только для некоторых удачно произошедших вспышек. *SDO/HMI*, представляющий магнитную карту каждые 45 с, давал идеальную информацию, позволяющую проследить поведение магнитного поля на фотосфере в течение всего времени длительности вспышки. *SDO/HMI* измерял также распределение всех трех компонент магнитного поля на фотосфере. Однако эти распределения выводятся с большим интервалом времени, и перпендикулярная лучу зрения компонента измеряется с меньшей точностью. Ввиду этих обстоятельств распределение всех трех компонент поля не использовались в предложенном анализе. Кроме того, имеющиеся измерения компоненты поля вдоль луча зрения дают возможность иметь достаточную хорошую информацию о поведении как нормальной фотосферной компоненте магнитного поля, так и параллельной фотосфере компоненте на основании поведения компоненты вдоль луча зрения. Поведение параллельной фотосфере компоненты поля можно исследовать для вспышек, расположенных западнее W20 или восточнее E20 (более 10 вспышек исследовалось для областей, имеющих такое положение), для которых вклад в измеряемую величину составляет более 30% величины компоненты поля, параллельной фотосфере. Проведение исследования оказалось особенно удобным благодаря полученному результату о неизменности во времени распределения компоненты поля вдоль луча зрения при вспышке, что означает неизменность как нормальной, так и параллельной фотосфере компонент, поскольку сколько-нибудь существенные изменения хотя бы одной из этих компонент для вспышек западнее W20 или восточнее E20 привели бы к изменениям измеряемой компоненты вдоль луча зрения (для вспышек вблизи центра диска неизменность компоненты вдоль луча зрения означает неизменность нормальной фотосфере компоненты).

Возможно, в дальнейшем, для более детальных исследований можно будет воспользоваться данными *SDO/HMI* о поведении распределений всех трех компонент магнитного поля на фотосфере. Но при этом необходимо проявлять осторожность, зная, что перпендикулярная лучу зрения компонента скорее всего измеряется менее точно, и, желательно, иметь информацию о точности ее измерения.

Вычисление магнитных потоков на фотосфере по измерениям распределений компонент вдоль поля вдоль луча зрения стало возможным благодаря тому, что магнитное поле на фотосфере определяется в основном токами под фотосферой, а не токами в короне. Проведенное исследо-

вание, показавшее неизменность магнитного поля на фотосфере во время вспышек, когда исчезает значительный ток в короне ( $\sim 10^{11}$  А) и магнитное поле этого тока, служит дополнительным доказательством того, что поле на фотосфере определяется токами под фотосферой. В такой ситуации распределение всех трех компонент вектора магнитного поля на фотосфере совпадает с распределением потенциального магнитного поля на фотосфере. Потенциальное поле находилось по измеряемому распределению компоненты поля вдоль луча зрения на фотосфере. Для этой цели в короне над активной областью численно решалось уравнение Лапласа для потенциала магнитного поля  $\phi_B$  с наклонной производной в качестве граничного условия на фотосферной границе:

$$\Delta\phi_B = 0; \quad \left. \frac{\partial\phi_B}{\partial l_{\text{sight}}}\right|_{\text{PhBoun}} = -B_{\text{sight}}; \quad \mathbf{B} = -\nabla\phi_B. \quad (1)$$

Здесь  $\partial/\partial l_{\text{sight}}$  — производная вдоль луча зрения, в  $B_{\text{sight}}$  — измеряемая на фотосфере компонента магнитного поля. Потенциал  $\phi_B$  должен удовлетворять условию равенства нулю на бесконечности, которое аппроксимировалось следующими двумя вариантами задания граничных условий на далеко отодвинутой нефотосферной границе:

1. Нормальная компонента на всей нефотосферной границе  $B_{\text{NPhB}}$  задается постоянной. Она вычисляется из условия равенства нулю полного магнитного потока через всю границу расчетной области (входящий поток равен выходящему). Для уравнения Лапласа (1) на нефотосферной границе ставится условие  $\partial\phi_B/\partial n = B_{\text{NPhB}}$ .
2. Потенциал  $\phi$  на нефотосферной границе задан равным нулю.

Расчеты показали, что отличие между решениями с обоими граничными условиями не существенно. Поскольку потенциальное поле находилось, так же, с целью задания начального условия для решения МГД уравнений в короне, уравнение Лапласа аппроксимировалось конечно-разностной схемой на сетке для конечно-разностной схемы МГД уравнений, консервативной, относительно магнитного потока.

Для всех областей в качестве области на фотосфере выбирался прямоугольник размером  $4 \times 10^{10}$  см, который включал активную область, в большинстве случаев в несколько раз превышая ее по размеру.

Для всех исследованных областей, поведение магнитного поля перед вспышками (рис. 1) и во время вспышек (рис. 1, 2) практически одно и то же. За несколько суток перед вспышкой наблюдается медленное возрастание потоков как северной (направленной на нас) компоненты магнитного поля, так и южной (направленной от нас) компоненты магнитного поля. При достижении

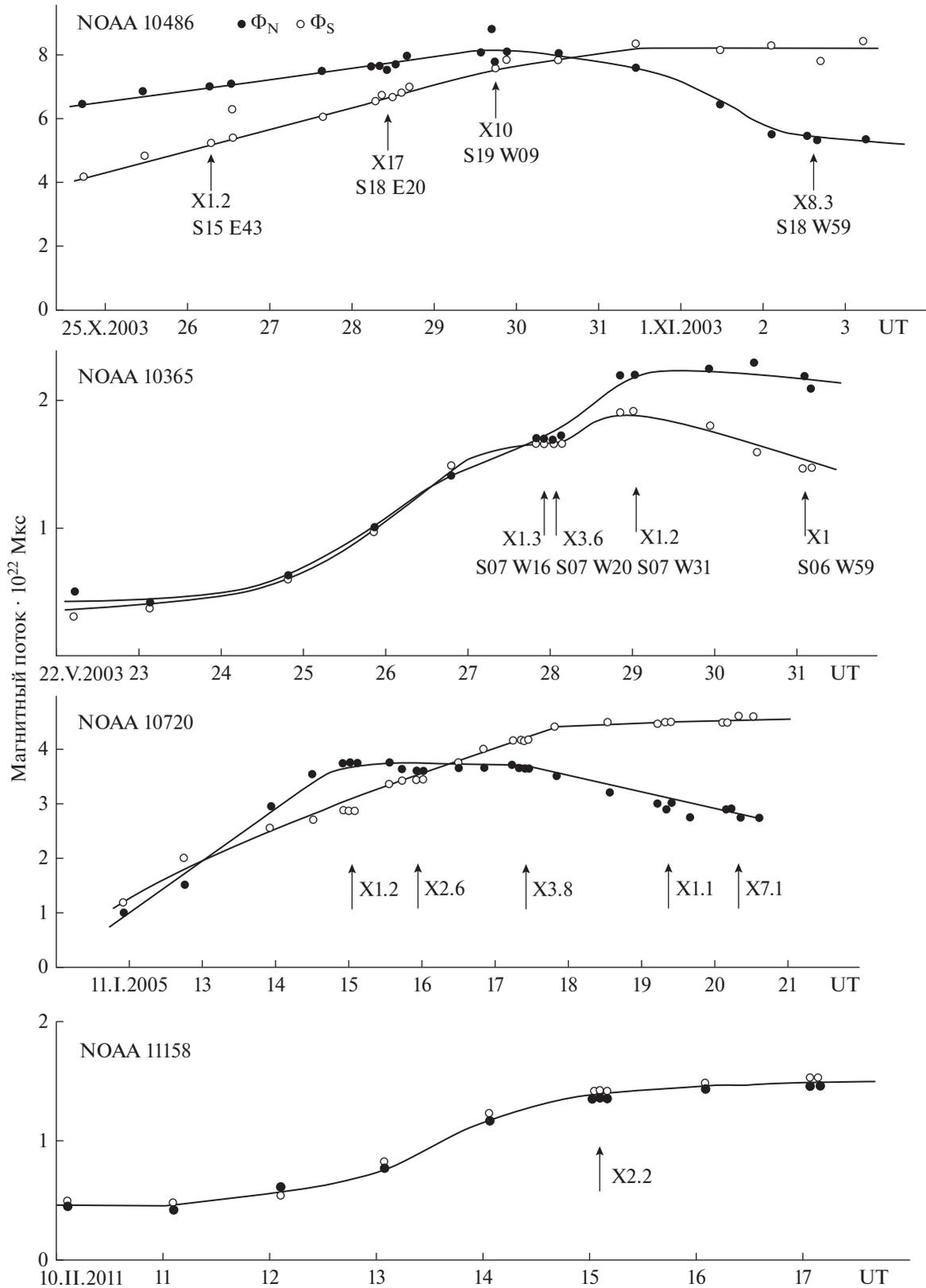
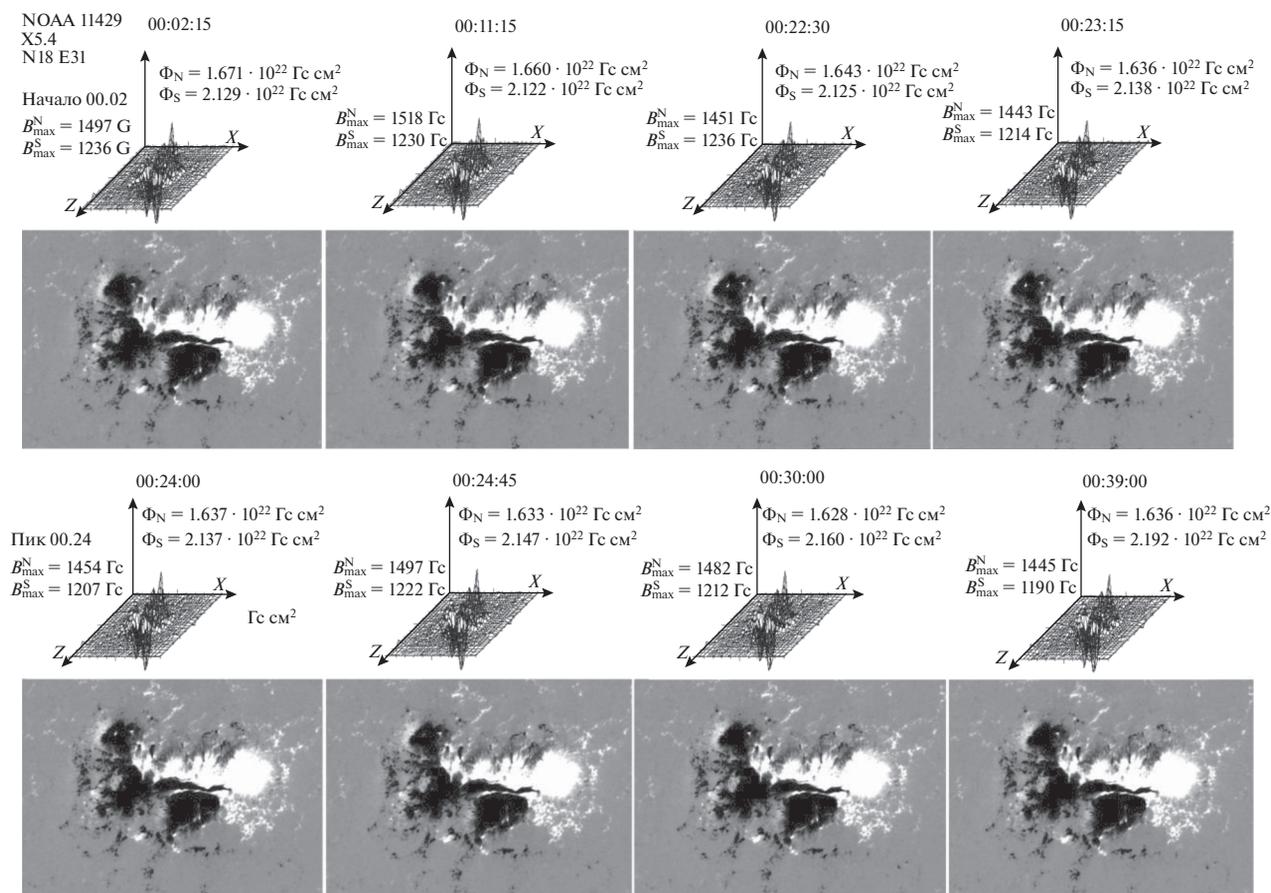


Рис. 1. Динамика типичных активных областей, давших мощные солнечные вспышки. Стрелками показаны моменты появления вспышек.



**Рис. 2.** Распределения нормальной составляющей магнитного поля и магнитограммы вспышки X5.4, произошедшей 7.III.2012 г. в активной области AO11429. Масштаб по вертикальной оси для распределения нормальной составляющей магнитного поля  $B = 2500$  Гс.

потока величины, превышающей  $\Phi = 10^{22}$  Мкс происходят большие солнечные вспышки (рис. 1). Во время вспышки магнитный поток практически не меняется. Наиболее отчетливо неизменность распределений всех компонент поля во времени демонстрирует рис. 2 для вспышки X5.4 N18E31 в АО11429. Северный магнитный поток во время 22-минутного возрастания интенсивности рентгеновского излучения уменьшился на  $\sim 2\%$ , а южный возрос на  $\sim 0.5\%$ . Здесь использовались данные SDO/HMI, получаемые через каждые 45 с. Аналогичное поведение исследуемых распределений компонент поля для других исследованных вспышек указывает на неизменность магнитного поля на солнечной поверхности во время вспышек.

Исследованные 16 вспышек в 5 активных областях показали отсутствие изменений нормальной компоненты магнитного поля на фотосфере. Неизменность компоненты поля вдоль луча зрения у более 10 вспышек, расположенных западнее W20 или восточнее E20, для которых вклад параллельной фотосфере компоненты в

компоненту поля вдоль луча зрения составляет более 30%, означает отсутствие изменений в распределениях компоненты поля параллельной фотосфере. Отсутствие изменений распределения магнитного поля на фотосфере во время вспышек является независимым доказательством появления вспышки в короне, где исчезновение магнитного поля при освобождении магнитной энергии не влияет на поле на фотосфере.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В КОРОНЕ ПЕРЕД ВСПЫШКАМИ И ВО ВРЕМЯ ВСПЫШЕК ПУТЕМ АНАЛИЗА НАБЛЮДЕНИЙ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ЛИНИЯХ ВЫСОКОИОНИЗОВАННОГО ЖЕЛЕЗА

Ультрафиолетовое излучение в линиях ионов высокоионизованного железа возникает в плазме с высокой температурой (5–20 МК), которая появляется в солнечной короне во время предвспышечного нагрева плазмы и вспышки за счет диссипации магнитного поля. Поэтому, анализ излу-

чения в линиях высокоионизованного железа помогает изучить процессы, происходящие перед вспышкой и во время вспышки. Кроме того, такой анализ потребует в дальнейшем, для сравнения места предвспышечного накопления энергии и вспышки с положением вспышки, найденном в конфигурации магнитного поля, полученной МГД моделированием в короне над активной областью.

Наиболее удобными для анализа вспышки являются линии коротковолнового ультрафиолетового излучения 94, 131 и 193 Å. Линия 94 Å принадлежит иону FeXVIII и соответствует температуре 6.3 МК. Линия 131 Å излучается плазмой с температурой 10 и 16 МК, а линия 193 Å содержит излучение из плазмы с температурой 1.2 и 20 МК. Если бы солнечная вспышка происходила в хромосфере при характерной для хромосферы невысокой температуре, то фотографии в спектральных линиях 94, 131 и 193 Å не показывали бы резкого возрастания яркости изображения в короне во время вспышки. Возрастание яркости эмиссии структур, наблюдаемых в спектральных линиях 94, 131 и 193 Å в короне во время вспышек должно указывать на развитие вспышки в высокотемпературной разреженной плазме короны.

Развитие вспышки хорошо демонстрируется в спектральных линиях высокоионизованных атомов [13, 14], обнаруженных прибором Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на аппарате *SDO* (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/data>). Типичное развитие солнечной вспышки показано на рис. 3. Слева от вертикальной пунктирной линии показаны кадры, снятые перед вспышкой. Вспышка X3.1 возникла над активной областью в центральной части солнечного диска 24.X.2014 г. в  $t_0 = 21:07$ . На рис. справа от вертикальной линии показано развитие вспышки. Первая строка показывает одно из наиболее фундаментальных свойств вспышки – практическое постоянство на протяжении полутора часов распределения источников фотосферного магнитного поля непосредственно перед вспышкой и во время вспышки. Вторая строка показывает очень слабое возрастание эмиссии линии горячей плазмы 193 Å FeXXIV перед вспышкой, но ее резкое возрастание при вспышке. Третья строка (линия 131 Å FeXXIII) также демонстрирует начало нагревания облачка корональной плазмы во время формирования токового слоя над активной областью и быстрый разогрев плазмы при вспышке. Четвертая строка указывает на предварительный нагрев облачка корональной плазмы при формировании токового слоя и развитие эмиссии линии 94 Å FeXVIII при вспышке. Пятая строка показывает хромосферные структуры, являющиеся следствием взрывного процесса в короне – вспышечные ленты, которые долгое время считались главными проявлениями вспышки.

На фотографиях, сделанных перед вспышкой 10.IX.2014 г. (рис. 4) в линии 94 Å, можно видеть светящуюся структуру, форма которой явно не соответствует форме отдельных магнитных линий над активной областью, отчетливо проявляющихся на этих фотографиях. Локальное предвспышечное свечение в линии 94 Å показывает появление горячей предвспышечной структуры, температура которой значительно превосходит не только температуру хромосферы, но и короны, следовательно, предвспышечный процесс развивается в короне над активной областью, а не в хромосфере. Типичный размер области локального предвспышечного свечения составляет около  $10^{10}$  см. Такая предвспышечная структура появляется перед половиной больших вспышек за 10–30 ч, т.е. тогда, когда численное МГД моделирование показывает формирование над активной областью токового слоя и накопление в нем магнитной энергии [4, 15, 16] которая может выделяться при вспышке. Перед вспышкой яркость свечения линии 94 Å постепенно возрастает, а затем во время вспышки происходит быстрое возрастание свечения этой линии. Несколько иначе ведет себя линия 131 Å и особенно линия 193 Å, содержащие излучение плазмы, соответствующее температурам 16 и 20 МК. Эмиссия в этих линиях перед вспышкой выражена очень слабо, и ее структура быстро меняется в отличие от четко выраженной структуры эмиссии линии 94 Å в предвспышечном состоянии. Изменяющиеся изображения в линиях 131 и 193 Å невозможно идентифицировать. Для слабых эмиссий в высокотемпературных линиях 131 и 193 Å невозможно говорить о какой-либо определенной предвспышечной структуре. Это значит, что температура плазмы в предвспышечных состояниях не достигает температуры  $\sim 20$  МК. Однако, как следует из рис. 4, эмиссии высокотемпературных линий, особенно линии 193 Å, резко возрастают во время вспышки. Возникновение на диске Солнца четко проявляющейся предвспышечной эмиссии в линии 94 Å может служить признаком для прогноза больших вспышек.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВСПЫШЕЧНОЙ СИТУАЦИИ ПУТЕМ ЧИСЛЕННОГО МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ В КОРОНЕ НАД РЕАЛЬНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ

В настоящее время конфигурацию магнитного поля в короне над реальной активной областью из наблюдений определить невозможно. Для определения конфигурации поля, распределений скорости, плотности плазмы и температуры проводилось численное МГД моделирование, в котором все условия брались из наблюдений. При постановке условий никаких предположений о механизме солнечной вспышки не делось. Цель

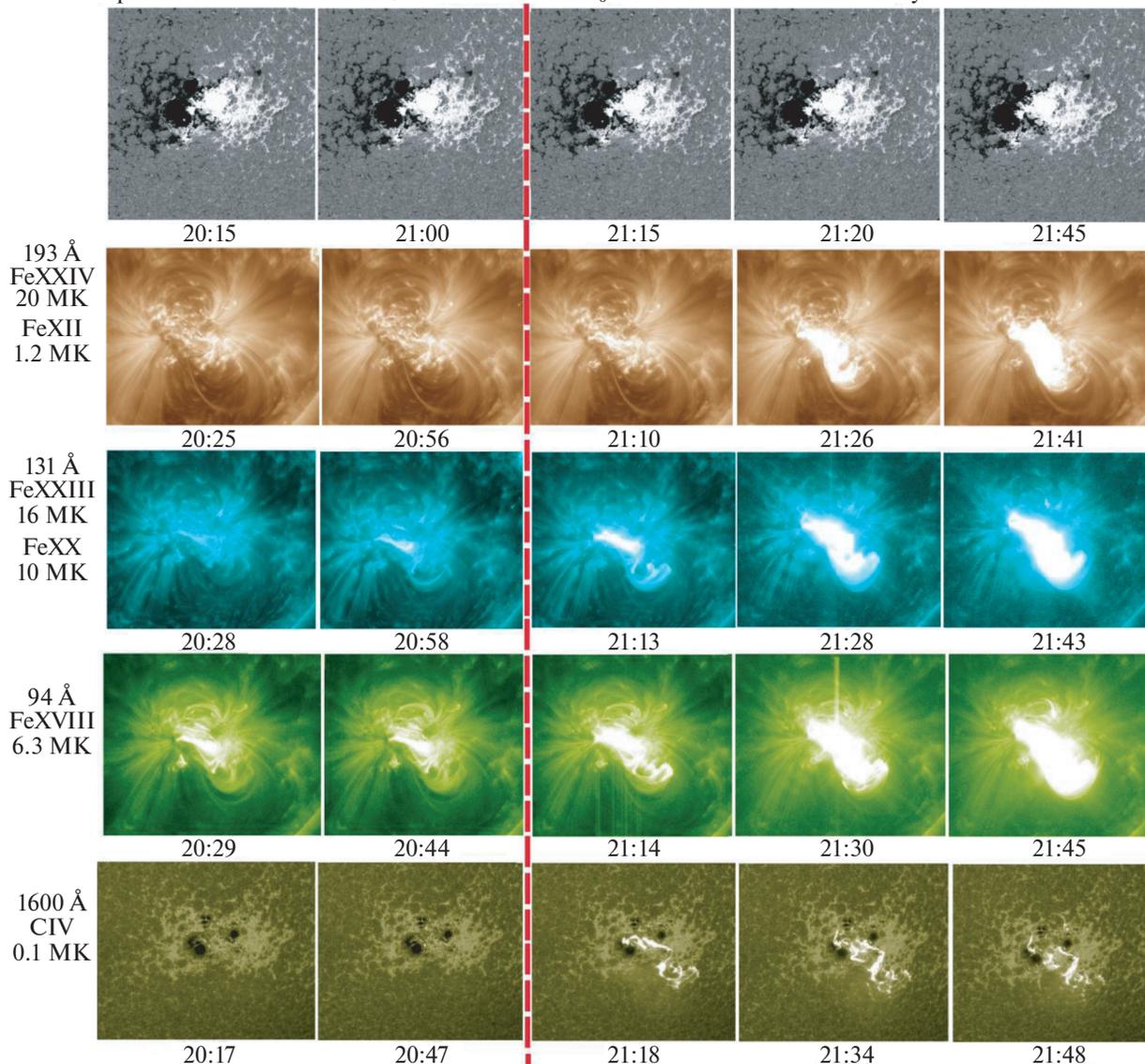
Магнитограммы 24.X.2014 AR12192 S12W21 X3.1  $t_0 = 21:07$  No solar cosmic rays

Рис. 3. Излучение ионов различной кратности ионизации в предвспышечном состоянии и во время вспышки, происшедшей в середине солнечного диска.

моделирования — установить механизм солнечной вспышки. Имеются серьезные соображения, что механизм вспышки связан с освобождением энергии, накопленной в поле токового слоя, но при этом численное МГД моделирование над реальной активной областью должно установить механизм солнечной вспышки независимо от того какой это механизм (токовый слой, магнитный жгут или какой-то другой, возможно никем еще не предложенный механизм). Для постановки граничных условий моделирования использовались наблюдаемые на фотосфере распределения магнитного поля. Расчет начинался за несколько суток перед вспышкой, когда сильные возмущения отсутствовали, и, поэтому, потенциальное

магнитное поле в кроне, рассчитанное по наблюдаемому распределению поля на фотосфере, можно использовать для задания начального условия. Все остальные условия как на фотосферной, так и на нефотосферной границах аппроксимировались условиями свободного выхода.

Моделирование проводилось для активной области AO10365, которая дала серию вспышек 27.V.2003. Чтобы учесть все особенности поля моделирование проводилось в расчетной области размером  $4 \cdot 10^{10}$  см в несколько раз превышающем размер активной области. Для нахождения потенциального поля численно решалось уравнение Лапласа (1) с наклонной производной в качестве граничного условия. Для этой цели исполь-

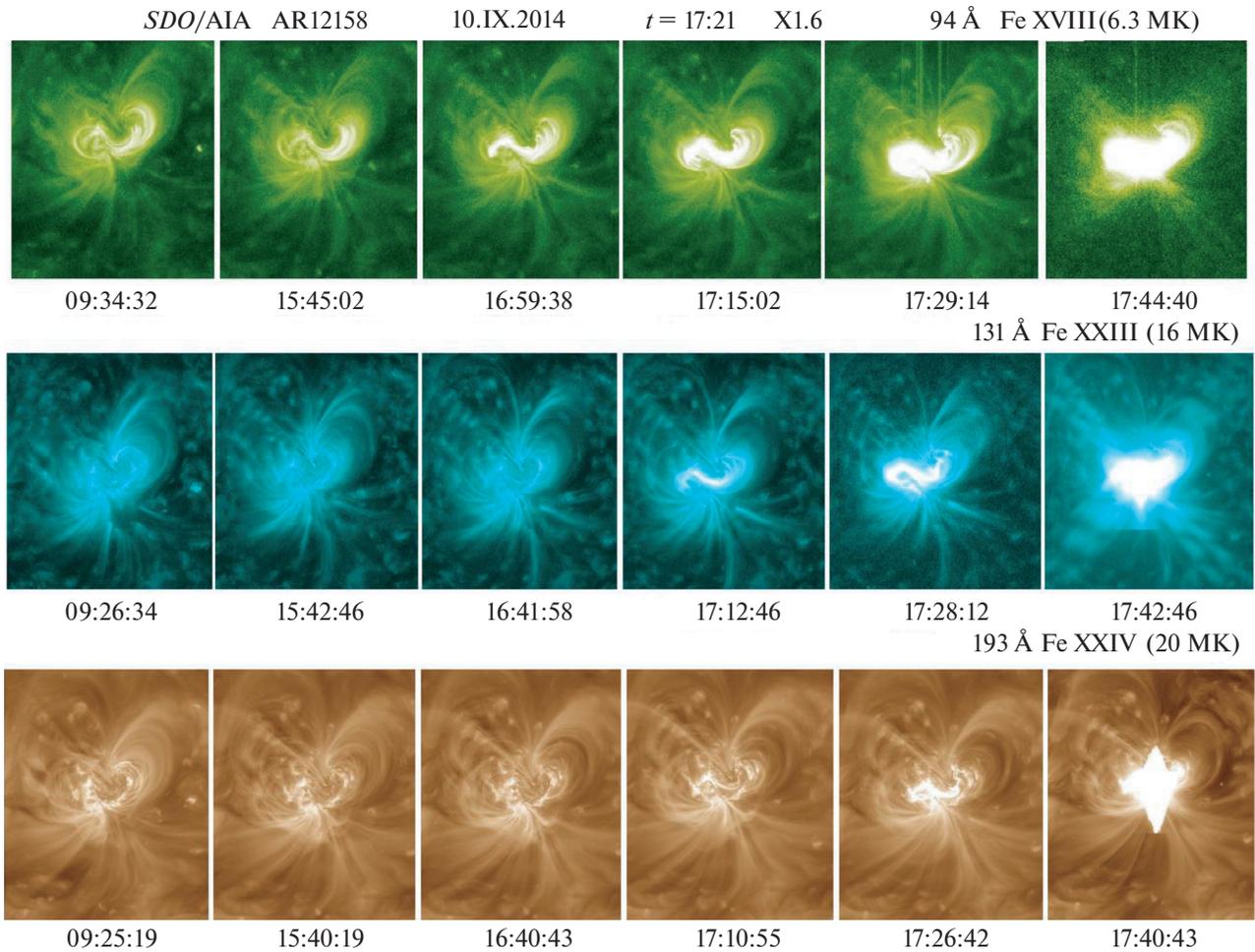


Рис. 4. Излучение активной области AO12158 в линиях 94, 131 и 193 Å перед вспышкой и во время вспышки X1.6.

зовались карты компоненты магнитного поля вдоль луча зрения на фотосфере, полученные прибором *SOHO/MDI* (<http://soi.stanford.edu/magnetic/index5.html>).

Численное решение МГД уравнений проводилось в расчетной области ( $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq y \leq 0.3$ ,  $0 \leq z \leq 1$ , в безразмерных единицах). Единица длины выбиралась равной  $L_0 = 4 \cdot 10^{10}$  см. Ось  $Y$  направлена от Солнца нормально фотосфере. Плоскость  $XZ$  ( $y = 0$ ) – это плоскость фотосферы с осью  $X$  в направлении с востока на запад и осью  $Z$  с севера на юг. Характерная величина поля в активной области  $B_0 = 300$  Гс выбиралась в качестве единицы магнитного поля. Безразмерными единицами концентрации плазмы и ее температуры взяты типичные их значения в короне над активной областью, которые полагаются постоянными в пространстве в начальный момент:  $\rho_0/m_i = 10^8$  см $^{-3}$ ,  $T_0 = 10^6$  К ( $m_i$  – масса иона). Безразмерные единицы скорости, времени и плотности тока имеют вид:  $V_0 = V_A = B_0/\sqrt{4\pi\rho_0}$ ,  $t_0 = L_0/V_0$ ,  $j_0 = cB_0/4\pi L_0$ . Трех-

мерная безразмерная система МГД уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \frac{1}{\text{Re}_m} \text{rot} \left( \frac{\sigma_0}{\sigma} \text{rot} \mathbf{B} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{V}\rho), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -(\mathbf{V}, \nabla) \mathbf{V} - \frac{\beta_0}{2\rho} \nabla(\rho T) - \frac{1}{\rho} (\mathbf{B} \times \text{rot} \mathbf{B}) + \frac{1}{\text{Re}_p} \Delta \mathbf{V} + G_g \mathbf{G}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -(\mathbf{V}, \nabla) T - (\gamma - 1) T \text{div} \mathbf{V} + (\gamma - 1) \times \\ & \times \frac{2\sigma_0}{\text{Re}_m \sigma \beta_0 \rho} (\text{rot} \mathbf{B})^2 - (\gamma - 1) G_g \rho L'(T) + \\ & + \frac{\gamma - 1}{\rho} \text{div} (\mathbf{e}_{\parallel} \kappa_{dl} (\mathbf{e}_{\parallel}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp 1} \kappa_{\perp dl} \times \\ & \times (\mathbf{e}_{\perp 1}, \nabla T) + \mathbf{e}_{\perp 2} \kappa_{\perp dl} (\mathbf{e}_{\perp 2}, \nabla T)). \end{aligned} \quad (5)$$

Ограничения, связанные с конечным шагом разностной схемы, не позволяют использовать реальные величины безразмерных параметров в диффузионных членах уравнений (2)–(5), поэтому для выбора величин параметров использовался принцип ограниченного моделирования [17]. Согласно этому принципу, много большие и много меньшие единицы безразмерные параметры задаются в расчетах много большими и много меньшими единицы без точного сохранения их значений. В вычислениях использовались следующие значения параметров:  $\gamma = 5/3$ ,  $Re_m = 1000$ ,  $Re = 300$ ,  $\beta_0 = 0.6 \cdot 10^{-5}$ ,  $\Pi = 100$ ,  $\Pi_B = 10^4$ ,  $G_q = 0.3 \cdot 10^{-5}$ . Силой гравитации можно пренебречь по сравнению с магнитной силой и силой давления плазмы:  $G_g = 0$ .

Для численного решения системы МГД уравнений разработана абсолютно неявная схема, консервативная относительно магнитного потока, позволяющая получать устойчивые решения в активной области короны [18]. Схема реализована в программе ПЕРЕСВЕТ. Высокая устойчивость схемы обеспечивается тем, что как диссипативные члены, так и члены переноса брались на последующем временном шаге ( $j + 1$ ), и при этом аппроксимация первого порядка членов переноса осуществлялась несимметричными конечными разностями в направлении против потока. Схема решалась методом итераций. Хорошая сходимость итераций обеспечивалась тем, что значения в центральной точке шаблона, входящие в конечно-разностные аналоги в правой части уравнений, брались на следующей итерации [19].

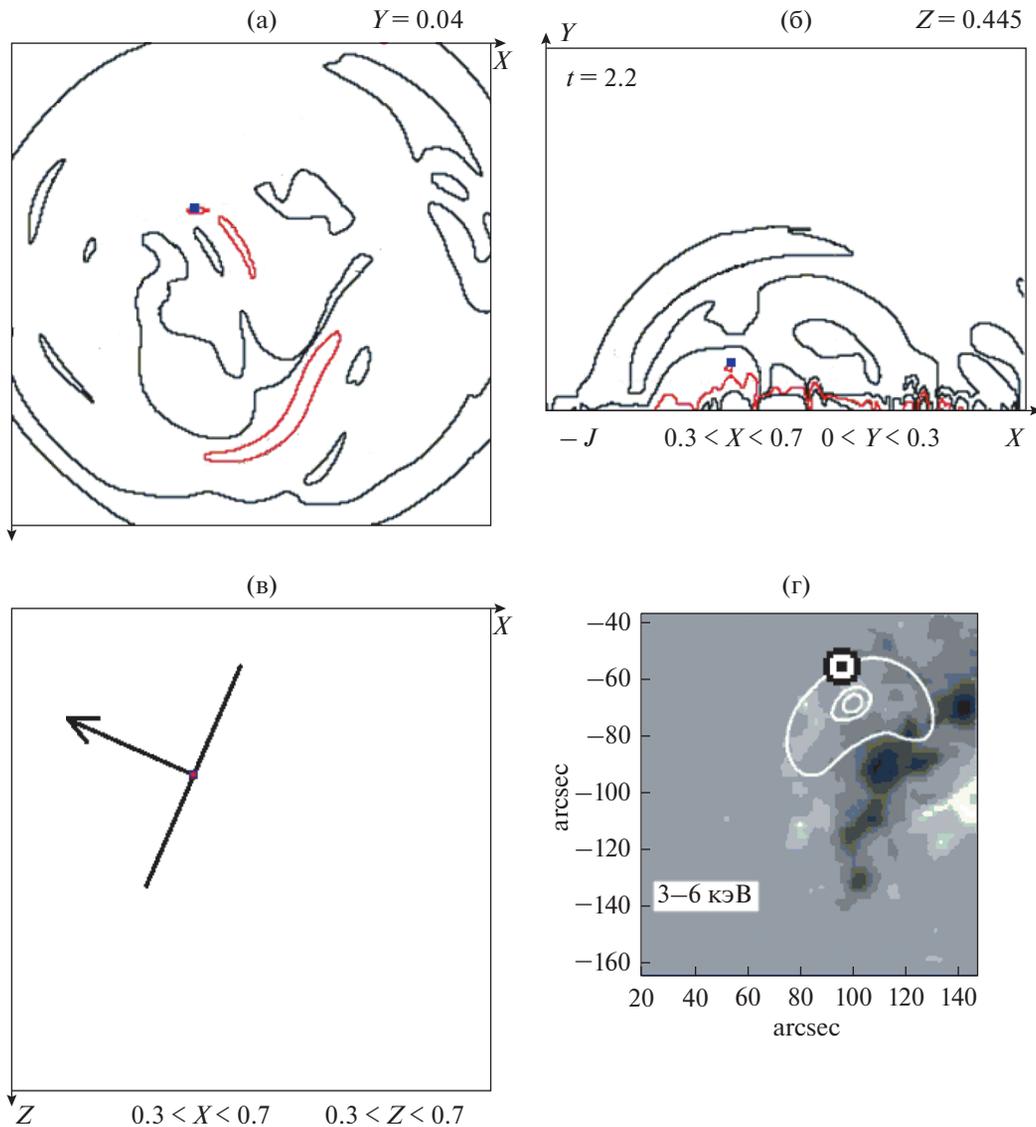
При решении МГД уравнений на фотосферной границе необходимо задавать две компоненты поля, параллельные границе. Компонента, перпендикулярная границе, определяется из условия  $\text{div} \mathbf{V} = 0$ . Поэтому, если есть наблюдательные данные только относительно компоненты поля по лучу зрения, то необходимо в различные моменты времени находить две компоненты поля, параллельные границе, из потенциального поля, решая уравнение (1). Задание для  $\rho$ ,  $\mathbf{V}$  и  $T$  на всей границе и параллельных границе компонент  $\mathbf{V}$  на нефотосферной границе аппроксимировалось условиями свободного выхода. Компонента поля, перпендикулярная границе, определялась из условия  $\text{div} \mathbf{V} = 0$ . Распределения двух параллельных фотосфере компонент магнитного поля находились из потенциального магнитного поля, вычисленного по распределениям поля вдоль луча зрения из SOHO MDI магнитограмм в моменты 24.V.2003 г. 20:47:59; 25.V.2003 г. 20:47:59; 26.V.2003 г. 20:47:59; 27.V.2003 г. 20:47:59 UT. Граничные условия в каждый момент времени находились интерполяцией между этими моментами времени. Такая интерполяция может быть использована, поскольку магнитные потоки и рас-

пределения магнитных полей на фотосфере меняются достаточно медленно [10–12].

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 общем случае магнитное поле на особой линии не должно быть равным нулю и особая линия не должна быть прямой. Поэтому конфигурация магнитного поля вблизи токового слоя, образовавшегося в окрестности особой линии, бывает настолько сложной, что по форме магнитных линий не возможно определить положение токового слоя, найденного путем численного решения МГД уравнений. Для определения положения токового слоя (положения вспышки) в конфигурации поля, найденного при помощи МГД моделирования, которое фактически является местом вспышки, разработана графическая система поиска, которая также осуществляет визуализацию решения МГД уравнений. 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 [20].

Использование разработанной системы поиска позволило определить по результатам МГД моделирования положение вспышки M1.4 27.V.2003 г. в 02:40. Вспышка располагалась на высоте 16000 км. Положение максимума плотности тока для токового слоя в момент вспышки (0.46, 0.04, 0.445) в безразмерных координатах, изображено на рис. 5а и 5б в плоскости, параллельной фотосфере, и плоскости, перпендикулярной фотосфере, пересекающей фотосферу вдоль солнечного экватора. Рис. 5г демонстрирует достаточно хорошее совпадение в картинной плоскости (перпендикулярной лучу зрения) найденного положения вспышки (на диске  $(x, y) = (96'', 56'')$  в угловых секундах гелиоцентрической системы координат) с положением источника теплового рентгеновского из-

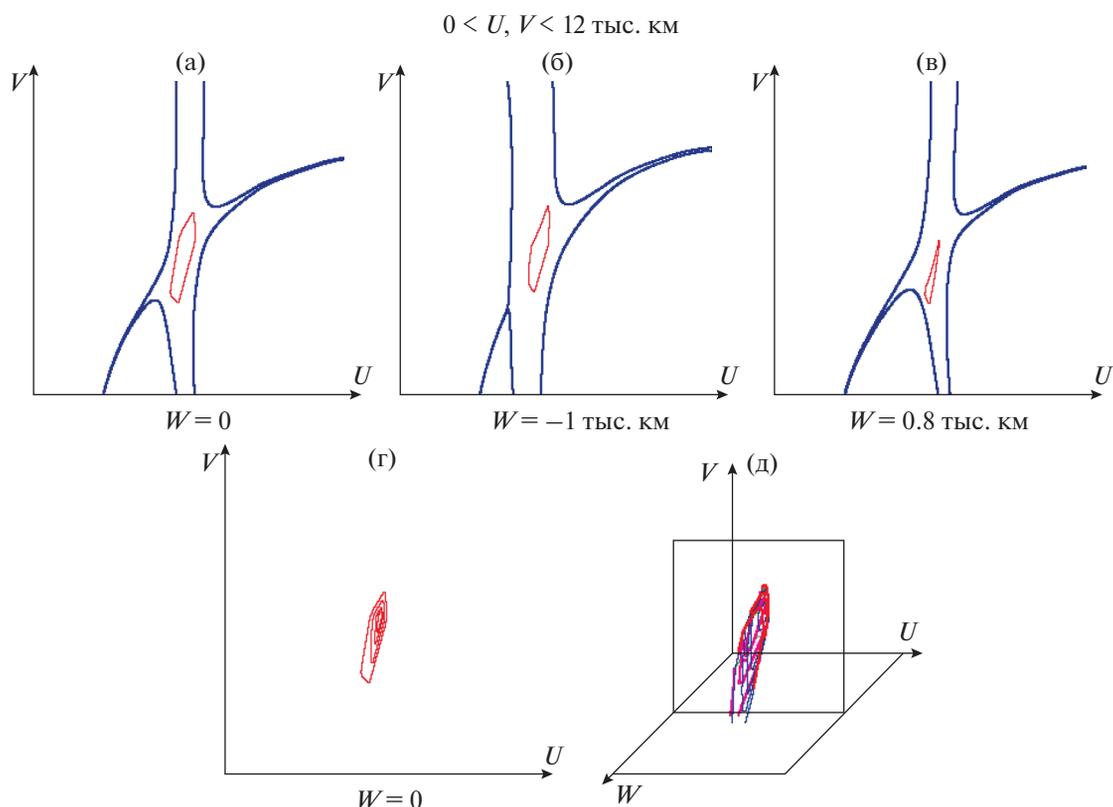


**Рис. 5.** Положение вспышки, найденное при помощи МГД моделирования (жирная точка), показаны линии равной плотности тока (а, б). Расположение плоскости конфигурации токового слоя, перпендикулярной вектору магнитного поля  $\mathbf{V} = (0.179, 0.066, 0.093)$  (в безразмерных единицах) в точке максимума плотности тока (в). Найденное положение вспышки в картинной плоскости нанесено на распределение теплового рентгеновского излучения 3–6 кэВ, полученное на космическом аппарате *RHESSI* (<http://rhessidatcenter.ssl.berkeley.edu>) 27.V.2003 г. в 02:53, которое наложено на магнитограмму *SOHO/MDI*, полученную 27.V.2003 г. в 03:12 (г).

лучения (99", 64"). Небольшое различие может появиться из-за неопределенности момента времени при моделировании в сокращенном масштабе времени. В плоскости, проходящей через точку максимума плотности тока и расположенной перпендикулярно вектору магнитного поля в этой точке (перпендикулярно касательной этому вектору особой линии поля), соответствующая токовому слою магнитная конфигурация наиболее ярко выражена. Эту плоскость будем называть плоскостью конфигурации токового слоя. Рис. 5в в плоскости фотосферы дает представление о расположении плоскости конфигурации токового слоя

для вспышки M1.4: представлена линия пресечения плоскости конфигурации с фотосферой и стрелкой показано направление наклона на 18° плоскости конфигурации к фотосфере.

Конфигурация поля на рис. 6а, 6б и 6в представлена плоскими линиями, поскольку по сложному расположению линий магнитного поля в трехмерном пространстве вблизи токового слоя практически невозможно получить представление о конфигурации поля. Процесс образования токового слоя, также как и процесс быстрой диссипации поля при неустойчивости слоя в значительной мере определяется магнитными силами

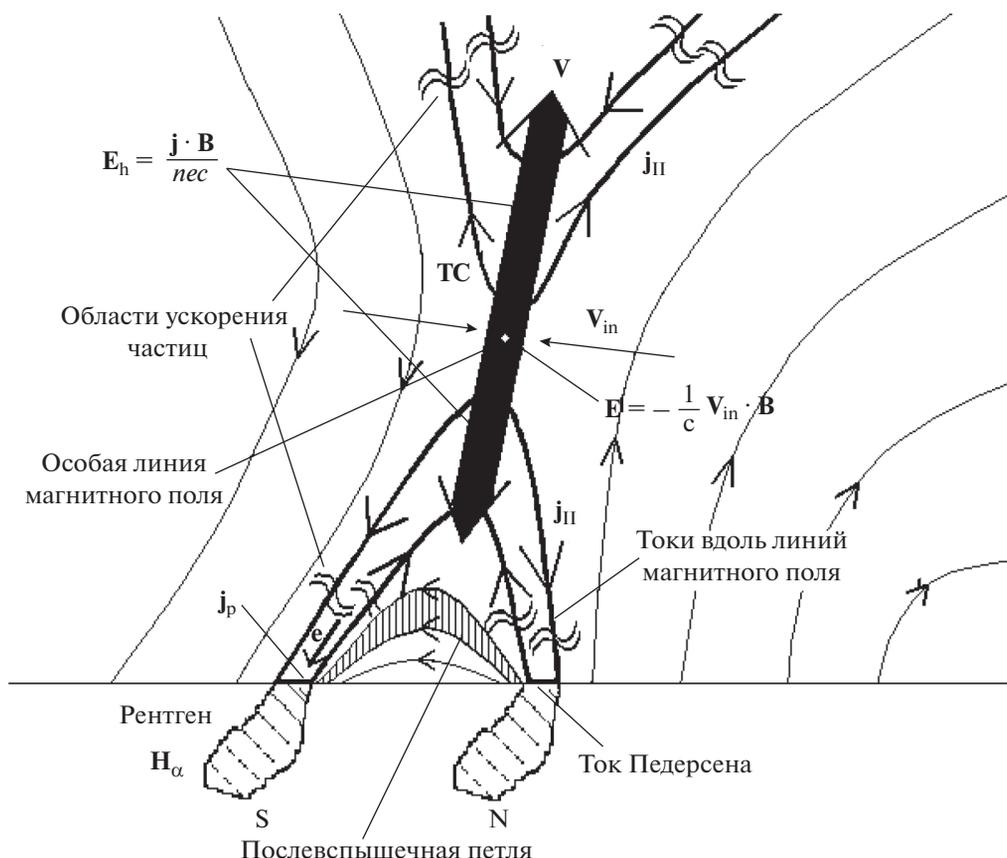


**Рис. 6.** Конфигурации магнитного поля в плоскости конфигурации токового слоя и двух параллельных ей плоскостях, линии равной плотности тонкие (а, б, в). Линии равной плотности тока в плоскости конфигурации (г) и поверхность равной плотности тока в пространстве (д) с координатами в плоскости конфигурации и вдоль особой линии.

$\mathbf{j} \times \mathbf{V}/c$ , вызывающими движение плазмы, которое деформирует магнитное поле. Поскольку основной ток в слое направлен вдоль особой линии магнитного поля, перпендикулярная плоскости конфигурации компонента магнитного поля, параллельная особой линии, будет параллельна току и, поэтому не будет вносить вклад в магнитную силу  $\mathbf{j} \times \mathbf{V}/c$ . Магнитная сила будет определяться компонентами магнитного поля в плоскости конфигурации токового слоя, т.е. векторами, которые являются проекциями вектора магнитного поля на плоскость конфигурации. Основные процессы в токовом слое определяются проекциями магнитных векторов на плоскость конфигурации токового слоя, т.е. линиями, касательными проекциям магнитных векторов на плоскость конфигурации. Векторы магнитных сил  $\mathbf{j} \times \mathbf{V}/c$  будут располагаться в плоскости конфигурации перпендикулярно этим линиям. Линии, касательные проекциям магнитных векторов на плоскости изображены на рис. ба, бб и бв. Рисунки отчетливо показывают, что эти линии образуют деформированную конфигурацию X-типа вблизи токового слоя. Представление о форме вспышеч-

ных активных областей с большим током дают рис. бг и бд.

Совпадение найденного положения токового слоя для вспышки 27.V.2003 г. в 02:40 в магнитной конфигурации, полученной МГД моделированием над реальной активной областью, с положением источника вспышечного теплового рентгеновского излучения является независимым доказательством механизма солнечной вспышки, основанного на освобождении энергии, накопленной в магнитном поле токового слоя. Исследование конфигурации магнитного поля вблизи токового слоя в короне над активной областью 10365 для вспышки 27.V.2003 г. в 02:40 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.



**Рис. 7.** Электродинамическая модель солнечной вспышки. Тонкими линиями показаны линии магнитного поля. Полужирные линии – токи вдоль линий магнитного поля. Жирная полоса – токовый слой. Векторами показаны направления втекания плазмы в слой со скоростью  $V_{in}$  (эту скорость также называют скоростью пересоединения). Электрическое поле Холла  $E_h$  направлено вдоль слоя вверх и вниз. Магнитное натяжение выбрасывает плазму из слоя. Поток вверх создает корональный выброс. Поток вниз создает послевспышечную петлю.

Предложенные методы МГД моделирования, поиска положений токовых слоев и визуализации понадобятся для дальнейшего уточнения положения вспышек и конфигурации поля с использованием расчетов в реальном масштабе времени.

### 5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Электродинамическая модель солнечной вспышки (рис. 7) [15, 21] предложена на основании результатов численного МГД моделирования в короне над активной областью и сравнения результатов моделирования с наблюдениями. Модель объясняет основные наблюдательные проявления солнечной вспышки: появление в короне источника теплового рентгеновского излучения и источника ультрафиолетового излучения в линиях высокоионизованного железа, которое образуется в горячей плазме; появление источников жесткого пучкового излучения на солнечной поверхности; появление солнечных космических лучей – протонов, ускоренных до энергий  $\sim 20$  ГэВ, и

электронов, ускоренных до нескольких сотен кэВ; выброс плазмы во время вспышки; всплывание послевспышечных петель; появление нескольких (чаще всего двух) лент  $H_\alpha$  на фотосфере, которые расходятся в течение вспышки, и аналогичным образом ведущих себя лент в видимых и ультрафиолетовых линиях фотосферы, хромосферы и переходного слоя. Возникновение этой совокупности вспышечных проявлений является следствием взрывного освобождения магнитной энергии токового слоя при переходе токового слоя в неустойчивое состояние. Диссипация магнитной энергии, запасенной в поле токового слоя, приводит к нагреву плазмы в слое до 30–50 МК и появлению источника теплового рентгеновского излучения, впервые зарегистрированного на аппаратах *Yohkoh* и *RHESSI* [1, 22, 23] и источника излучения в линиях высокоионизованного железа  $94 \text{ \AA FeXVIII}$ ,  $131 \text{ \AA FeXXIII}$  и  $193 \text{ \AA FeXXIV}$  зарегистрированного на аппарате *SDO* (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/data>).

Плазма вместе с линиями магнитного поля втекает в токовый слой с обеих его сторон и после

магнитного пересоединения в окрестности X-линии поля ускоряется силой  $\mathbf{j} \times \mathbf{V}/c$  вдоль слоя. Ускоренная вверх плазма создает корональный выброс. Поток нагретой при пересоединении линий поля плазмы вниз вместе с сокращающимися линиями поля создает горячие послевспышечные петли.

Направленное вдоль слоя электрическое поле Холла  $\mathbf{E} = \mathbf{j} \times \mathbf{V}/c$  вызывает систему продольных (параллельных магнитным линиям) токов. Продольные токи и их направления показаны жирными синими линиями. Направленные к солнечной поверхности продольные токи замыкающихся в хромосфере токами Педерсена, текущими поперек магнитного поля. Проводимость Педерсена обеспечивается столкновениями заряженных частиц с нейтральными атомами и сопротивлением низкотемпературной плазмы хромосферы. Ускоренные в этих токах электроны высыпаются на поверхность Солнца и вызывают свечение вспышечных лент в жестком пучковом рентгеновском излучении. Нагрев плазмы пучками ускоренных электронов приводит к появлению лент в видимых и ультрафиолетовых линиях низкотемпературной плазмы фотосферы, хромосферы и переходного слоя. Расположения линий на рис. 7 показывает, что с течением времени увеличивается расстояние между расположенными по обе стороны токового слоя местами пересечения с фотосферой магнитных линий, пересоединившихся в токовом слое, что объясняет наблюдаемое расхождение вспышечных лент. Вспышечное субтерагерцовое излучение с частотой 400 ГГц может быть вызвано на ленгмюровской частоте в плазме с концентрацией  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  пучками электронов, ускоренных в продольных токах. Плазма с такой концентрацией существует в нижних плотных слоях солнечной атмосферы, где концентрация плазмы меняется от  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  (хромосфера) до  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  (фотосфера).

На рис. 7 изображены, также, направленные вверх продольные токи, вызванные электрическим полем Холла. Эти токи распространяются вдоль магнитных линий вместе с альвеновской волной, вызванной потоком электронов, переносящих основной ток в токовом слое, в которые вморожено магнитное поле. Направленные вверх продольные токи замыкаются токами смещения в месте, до которого в данный момент дошла альвеновская волна. Ускоренные в направленных вверх продольных токах электроны в разреженной плазме вызывают слабое жесткое пучковое рентгеновское излучение на тонкой мишени, которое удалось зарегистрировать в [24] только для вспышки над областью, расположенной за лимбом. В этом случае мощное жесткое излучение толстой мишени на солнечной поверхности экранируется Солнцем и поэтому не мешает наблюдению жесткого излуче-

ния в короне, вызванного ускоренными электронами, в направленных вверх продольных токах. Взаимодействие этих ускоренных электронов с межпланетной плазмой вызывает излучение на плазменной частоте – радиоизлучение III типа. Ускорение протонов до сверхвысоких энергий вдоль X-линии магнитного поля в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка, в электрическом поле  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$  подробно описано в главе 7.

## 6. О ВОЗМОЖНОСТИ И НЕОБХОДИМОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВСПЫШЕЧНОЙ СИТУАЦИИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Для проведенного МГД моделирования применялась специально разработанная конечно-разностная схема устойчивая для достаточно больших шагов с целью максимально ускорить вычисления. Несмотря на использование таких методов, моделирование в короне над реальной активной областью осуществляется достаточно медленно. Моделирование над AO10365 удалось выполнить только в сильно сокращенном (в  $10^4$  раз) масштабе времени, расчет занял  $\sim 3$  мес. Неестественно быстрое изменение магнитного поля привело к численной неустойчивости вблизи фотосферной границы, однако применение разработанных методов не позволило неустойчивости распространиться внутрь расчетной области и ограничило развитие неустойчивости вблизи фотосферной границы, так что проведение моделирования стало возможным. Такое моделирование позволило установить появление токового слоя, достаточно хорошо совпадающего с наблюдаемым источником вспышечного теплового рентгеновского излучения. Разработаны и опробованы методы численного решения МГД уравнений, поиска положения токового слоя и графического представления решения МГД уравнений в короне. Эти методы понадобятся при проведении МГД моделирования в реальном масштабе времени, которое необходимо для уточнения полученной к настоящему моменту информации о приводящих к вспышке процессах в короне, и получения информации о процессах, которые не удалось получить путем численного моделирования в короне в сокращенном масштабе времени.

МГД моделирование в реальном масштабе времени даст возможность более точно определить момент образования и положение токового слоя для сравнения с наблюдениями. Появится возможность достаточно точно определить форму области сильного тока в картинной плоскости для сравнения с областью горячей плазмы, наблюдаемой в линиях высокоионизованного железа  $94 \text{ \AA FeXVIII}$ ,  $131 \text{ \AA FeXXIII}$  и  $193 \text{ \AA FeXXIV}$  и величину энергии для вспышки, накопленной в

магнитном поле токового слоя. Должна быть точно найдена конфигурация магнитного поля как вблизи токового слоя, так и в области короны значительных размеров, содержащей токовый слой. Здесь надо будет обратить особое внимание на области вблизи фотосферной границы, где при расчете в реальном масштабе времени поле не будет искажено неустойчивостью. Это даст возможность точно определить места пересечения с фотосферой магнитных линий, пересекающих токовый слой, для сравнения с наблюдениями жесткого рентгеновского излучения. В таких местах, согласно электродинамической модели вспышки, должны появляться источники пучкового жесткого рентгеновского излучения. Проведенный расчет в сокращенном масштабе времени, возможно, вследствие неустойчивости вблизи фотосферной границы, не выявил четкого совпадения наблюдаемых источников жесткого рентгеновского излучения с местами пересечения с фотосферой магнитных линий, пересекающих токовый слой. Результаты расчета показывают только принципиальную возможность такого совпадения. Точно определенные в результате расчета в реальном масштабе времени электрическое и магнитное поля дадут возможность более аккуратно исследовать ускорения солнечных космических лучей путем расчета траекторий частиц в найденных полях (см. гл. 7). Согласно наблюдениям, солнечные космические лучи появляются только для ~30% мощных вспышек класса X. Расчет движения частиц в полученных полях, полученным моделированием в реальном масштабе, в области большого размера, возможно, определит, смогут ли частицы, ускоренные в токовом слое выйти за пределы сильного магнитного поля над активной областью, т.е. появятся ли частицы от данной вспышки. Последнее важно с практической точки зрения для предупреждения космонавтов, чтобы были приняты меры защиты от облучения солнечными космическими лучами.

На возможность получения всей необходимой информации относительно вспышечного состояния в короне указывает отсутствие неустойчивости на фотосферной границе, которое показало МГД моделирование в реальном масштабе, проведенное в течении первых семи минут эволюции активной области. Это означает, также, отсутствие появившихся в результате неустойчивости локальных максимумов плотности тока, маскирующих токовый слой, и необходимости дополнительного исследования конфигурации поля вблизи таких максимумов, чтобы понять, являются ли они токовыми слоями.

Результаты моделирования в короне в течение первых семи минут (рис. 8) показывают начало образования токового слоя. Проведенное моделирование показало, что расчет на обычном со-

временном компьютере эволюции над активной областью в течение 3-х сут должен занять ~3 года.

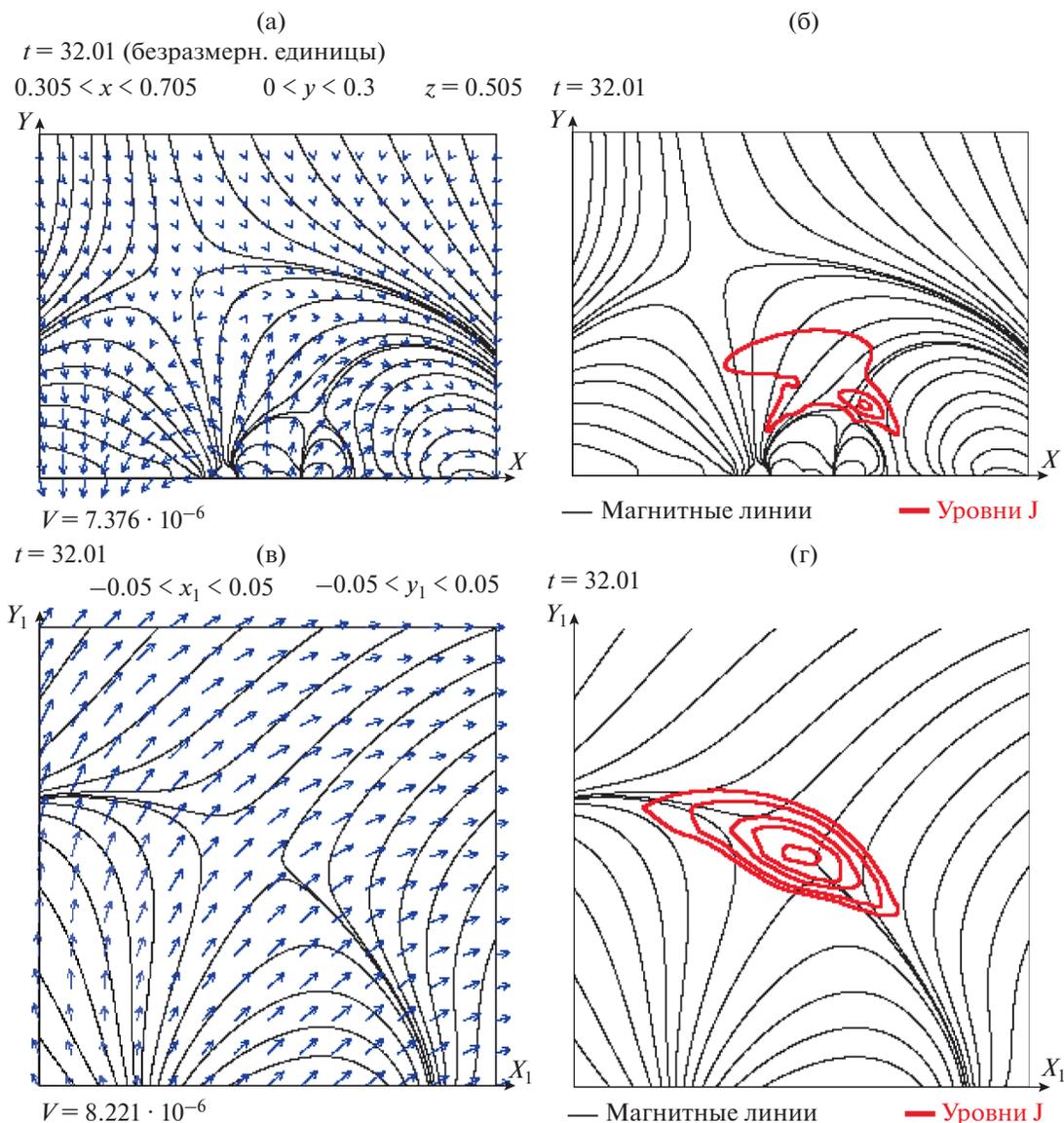
Для МГД моделирования в короне в реальном масштабе времени А.В. Борисенко налажено аппаратно-программное обеспечение для суперкомпьютера на базе видеокарты CUDA NVIDIA Tesla M2050 [25]. Тестовые расчеты решения простого уравнения Пуассона, по разностной схеме, аналогичной неявной схеме, применяемой для решения МГД уравнений, показали ускорение вычислений в 20–150 раз, в зависимости от деталей выбора разностной схемы и условий выбора режима вычислений, проводимых параллельно многими процессорами видеокарты. Такое ускорение вычислений даст возможность провести МГД моделирование в реальном масштабе времени. В настоящее время проводится распараллеливание численного решения МГД уравнений.

## 7. УСКОРЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Солнце представляет собой единственный астрономический объект, генерирующий импульсы протонов с энергией не менее 20 ГэВ, происхождение которых доступно непосредственным исследованиям. Ускорение заряженных частиц до релятивистских энергий может происходить вдоль особой линии магнитного поля в электрическом поле Лоренца  $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$ , возникающем при втекании плазмы в слой [26, 27]. Эффективность ускорения частиц электрическим полем Лоренца, направленным вдоль особой линии магнитного поля, следует из лабораторных экспериментов с мощным импульсным разрядом (рис. 9). Такие эксперименты ставились в связи с проблемой управляемого термоядерного синтеза [28]. Измерения показали, что во время максимальной скорости сжатия плазменного разряда частицы приобретают энергию большую 300 кэВ при приложенной к электродам разности потенциалов около 15 кэВ [29].

Для выяснения характера спектра частиц, ускоряемых в токовом слое, был проведен расчет методом пробных частиц [30, 31], в котором использовалась конфигурация полей, полученная в трехмерном численном магнитогидродинамическом эксперименте для вспышки Бастилия (14.VII.2000). Расчет показал экспоненциальный показатель спектра, который совпадает с измеренным, при скорости магнитного пересоединения  $10^7$  см/с (рис. 10). Таким образом, был оценен главный параметр вспышки – скорость магнитного пересоединения.

МГД моделирование, также, как и ранее сделанные приближенные оценки, показывает величину магнитного поля вблизи токового слоя  $B = 100$  Гс, так что величина электрического поля в

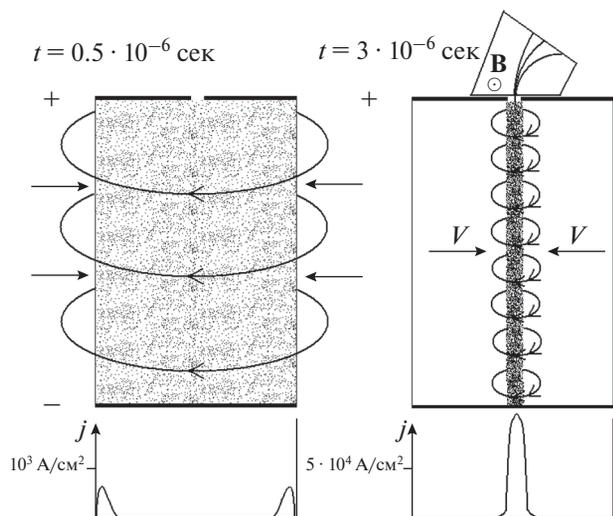


**Рис. 8.** Результаты МГД моделирования эволюции над активной областью AO10365 в реальном масштабе времени в момент  $t = 7.5$  мин. в центральной плоскости  $z = 0.505$  (а, б), и в плоскостях, содержащих точки максимума плотности тока и расположенных перпендикулярно векторам магнитного поля в этих точках (в, г). Тонкими линиями показаны линии магнитного поля, полужирные линии — линии равной плотности тока.

слое  $\mathbf{E} = \mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$  составляет  $\sim 20$  в/см, и для длины слоя  $L = 10^9$  частица наберет максимальную энергию  $2 \cdot 10^{10}$  эВ, пройдя путь, на котором разность потенциалов составляет  $EL$ . Эта энергия соответствует максимальной наблюдаемой энергии солнечных космических лучей.

Не все солнечные вспышки вызывают появление солнечных космических лучей. Только около 30% вспышек класса X вызывают потоки космических лучей. Это объясняется тем, что во многих случаях конфигурация поля над активной областью удерживает частицы, ускоренные в токовом слое, не давая им возможности выйти в межпла-

нетное пространство. В настоящее время широкое распространение получил механизм Ферми ускорения как галактических, так и солнечных космических лучей на ударных волнах. Согласно этому механизму, частица несколько раз пересекает фронт ударной волны, отражаясь от плазменных неоднородностей, и при этом набирает энергию вследствие различия средней скорости движения неоднородностей по обе стороны от фронта ударной волны. Для солнечных космических лучей такой механизм рассматривается на фронте ударной волны, распространяющейся перед выбросом плазмы. Появление вспышек, сопровождающихся быстрыми выбросами с мощ-

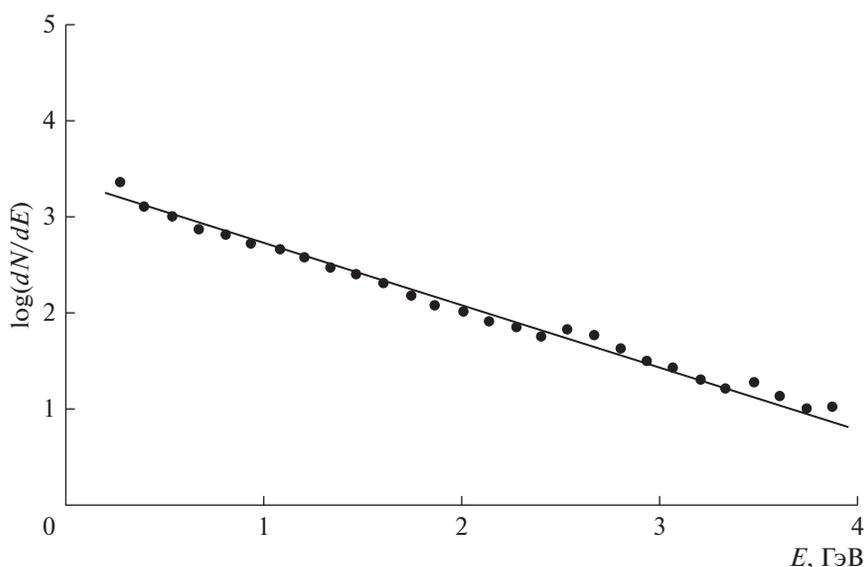


**Рис. 9.** Лабораторный эксперимент с мощным импульсным разрядом, демонстрирующий ускорение частиц при сжатии разряда собственным магнитным полем. Внизу распределение плотности разрядного тока. Показаны моменты  $t = 0.5 \cdot 10^{-6}$  и  $t = 3 \cdot 10^{-6}$  сек. Ток возрастал со скоростью  $dI/dt = 10^{11}$  А/с и достиг максимальной величины 200 кА. При скорости сжатия плазмы  $V \sim 10^7$  см/с и магнитном поле  $B \sim 4 \cdot 10^4$  Гаусс появляется электрическое поле  $E = -V \times B/c$  равное  $E \sim 4 \cdot 10^3$  В/см, ускоряющее заряженные частицы.

ными ударными волнами, которые не вызывали солнечных космических лучей (например, вспышки 17 и 18.III.2003 г.), доказывает, что солнечные космические лучи ускоряются в токовом слое, а не на ударных волнах. Это связано с отсутствием достаточного количества неоднородностей вбли-

зи ударной волны, от которых частицы смогли бы отразиться, чтобы произошло их эффективное ускорение. Действительно, ларморовский радиус протона с энергией  $\sim 2$  ГэВ в магнитном поле солнечного ветра  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  Гс составляет  $\sim 10^{10}$  см, он соответствует размеру плазменной неоднородности от которой частица смогла бы отразиться. Скопление таких огромных неоднородностей в солнечном ветре никогда не наблюдалось.

Измерения потоков космических лучей и теплового рентгеновского излучения, пики которого указывают времена появления вспышек (данные космического аппарата *GOES* <http://www.solar-monitor.org/index.php?date>), показывают, что для вспышек вблизи западного края солнечного диска ускоренные протоны приходят с задержкой 15–20 мин, что соответствует пролетному времени от западной части диска вдоль магнитной линии, имеющей форму спирали Архимеда. Время нарастания фронта потока частиц от западных вспышек составляет 15–30 мин [32]. Время задержки прихода ускоренных частиц от вспышек, произошедших на восточной части солнечного диска составляет 3–5 ч, что объясняется отсутствием силовой линии, соединяющей место вспышки с космическим аппаратом на орбите Земли, из-за чего прямой пролет частиц от места ускорения до места регистрации невозможен. Частицы от восточных вспышек могут достигнуть космического аппарата, двигаясь поперек магнитного поля вместе с солнечным ветром (дрейф в скрещенных магнитном и электрическом полях). Однако, в этом случае, задержка прихода частиц составила бы  $\sim 3$  сут (время движения между Солнцем и Землей со скоростью солнечного вет-



**Рис. 10.** Расчетный спектр релятивистских протонов, ускоренных в токовом слое, при скорости втекания в слой  $10^7$  см/с (точки), и спектр, измеренным на сети нейтронных мониторов.

ра), что значительно больше наблюдаемой задержки прихода частиц. Наблюдаемую задержку можно объяснить диффузией ускоренных частиц поперек магнитного поля вследствие их рассеяния на плазменных неоднородностях, появившихся в результате пучковой неустойчивости, вызванной потоком ускоренных частиц вдоль силовой линии [33]. Время нарастания фронта потока частиц от восточных вспышек составляет  $\sim 1$  сут.

Время существования вызванного вспышкой потока солнечных космических лучей (обычно  $\sim 3$  сут, иногда достигает 10 сут [27]), больше чем на два порядка превышает время вспыхивающего процесса, которое оценивается по времени теплового рентгеновского излучения вспышки. Часть протонов, которые не проходят все расстояние вдоль силовой линии до наблюдателя, распространяются диффузионным образом в межпланетном пространстве в течение нескольких суток, рассеиваясь на плазменных неоднородностях. В ходе рассеяния спектр ускоренных протонов меняется и эта часть протонов, называемая медленной компонентой, регистрируется сетью нейтронных мониторов уже со степенным спектром [27, 30, 31]. Медленная компонента солнечных космических лучей состоит из частиц, распространяющихся диффузионным образом поперек магнитного поля, поэтому, в отличие от быстрой компоненты, она появляется не только от западных, но и от восточных вспышек.

При использовании самых быстрых современных суперкомпьютеров, планируемое МГД моделирование над активной областью и моделирование движения пробных частиц в полях, найденных над активной областью, предполагается использовать для прогноза появления вспышек и потоков солнечных космических лучей. Поскольку нет информации о плазменных неоднородностях, а, следовательно, коэффициент диффузии в уравнении распространения ускоренных частиц неизвестен, прогноз распространения в межпланетном пространстве космических лучей, способных вызвать облучение космонавтов, предполагается проводить на основании проведенного анализа наблюдательных данных.

Импульсы релятивистских протонов, сопровождающие некоторые вспышки, регистрируются на фоне непрерывного потока космических лучей с энергией более  $10^{15}$  эВ. Их ускорение происходит за пределами солнечной системы. Более 100 лет исследуется ускорение космических лучей, но физические механизмы ускорения остаются не выясненными. Наиболее популярной, но ничем не доказанной, гипотезой является ускорение протонов в межзвездных ударных волнах. Однако нет никаких оснований полагать, что механизмы ускорения частиц на Солнце и на других звездах имеют различную природу. С другой стороны,

энергия галактических космических лучей на несколько порядков величины превышает максимальную энергию протонов, ускоренных на Солнце. Этот факт долгое время не позволял однозначно утверждать, что ускорение звездных и солнечных космических лучей происходит одним и тем же механизмом. Обнаружение гигантских вспышек на звездах карликах класса G [34, 35] с энергией, значительно превышающей энергию солнечной вспышки, указывает на возможность ускорения протонов за пределами солнечной системы до энергий значительно больших чем энергия солнечных космических лучей. Результаты работ [34, 35] можно рассматривать, как новый независимый аргумент в пользу генерации космических лучей во вспышках, а не в ударных волнах. Возникновение “супервспышек” с энергией значительно большей, наблюдаемой при больших солнечных вспышках, обнаружено аппаратом Кеплер на различных звездах карликах класса G. Некоторые из карликов, генерирующих мощные вспышки, вращаются быстро, а некоторые со скоростью вращения порядка скорости вращения Солнца [34]. В этой работе сообщается о 365 сверхвспышках на звездах, вращающихся с угловой скоростью меньшей угловой скорости Солнца. Всего на аппарате Кеплер было исследовано 83000 звезд в течение 120 дней. Ранее считавшееся значительное различие максимальных энергий галактических и солнечных космических лучей не способствовало представлению об их одинаковых механизмах происхождения, однако обнаружение супервспышек сделало гипотезу об ускорении космических лучей более основательной. Данные работы [35] показали, что энергия звездной вспышки может превосходить  $10^{35}$  эрг, т.е. превосходить энергию большой солнечной вспышки на 3–4 порядка величины, а, по-видимому, энергия протонов, ускоренных в этих звездных вспышках, может значительно превышать энергию, частиц, регистрируемых от вспышек на Солнце. Таким образом, вспышка может быть универсальным астрономическим процессом, ответственным за ускорение протонов на Солнце и на звездах.

## ВЫВОДЫ

1. Неизменность магнитного поля на фотосфере, показанная для более десяти вспышек нескольких активных областей доказывает появление вспышки в короне.
2. Наблюдения ультрафиолетового излучения в линиях высокоионизованных ионов железа, которые появляются при температурах, значительно превышающих температуру короны, дают независимое подтверждение появления вспышки в короне.

3. Появление за несколько десятков часов перед вспышкой светящейся структуры в линии  $94 \text{ \AA}$  Fe XVIII, которая излучает при температуре 6.3 МК (выше температуры короны  $\sim 1$  МК, но ниже температуры в месте вспышки 30–50 МК) можно использовать для прогноза солнечных вспышек.

4. Совпадение положения токового слоя в магнитном поле, полученном МГД моделированием в короне над активной областью, с положением вспышечного источника теплового рентгеновского излучения, является независимым доказательством механизма солнечной вспышки, согласно которому происходит освобождение энергии, накопленной в магнитном поле токового слоя.

5. В токовом слое, образовавшемся в сложном поле солнечной короны, 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.

6. На основании результатов МГД моделирования и наблюдений предложена электродинамическая модель солнечной вспышки, объясняющая ее основные наблюдательные проявления.

7. Подготовлены методы МГД моделирования в короне над активной областью в реальном масштабе времени, необходимого для более точного исследования вспышечной ситуации в короне.

8. Солнечные космические лучи ускоряются электрическим полем в токовом слое во время основного вспышечного процесса. Открытие на звездах карлика класса G “супервспышек”, энергия которых на 3–4 порядка превышает энергию вспышек на Солнце, указывает на возможность одинакового механизма генерации галактических и солнечных космических лучей.

Проводимое исследование физических процессов, происходящих во время солнечных вспышек, может помочь улучшить прогноз появления вспышек и солнечных космических лучей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lin R.P., Krucker S., Hurford G.J. et al.* RHESSI observations of particles acceleration and energy release in an intense gamma-ray line flare // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. № 2. P. L69.
2. *Сыроватский С.И.* Динамическая диссипация магнитной энергии в окрестности нейтральной линии магнитного поля // *ЖЭТФ.* 1966. Т. 50. № 4. С. 1133.
3. *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* МГД-моделирование образования токового слоя над биполярной активной областью // *Астрон. журн.* 2003. Т. 80. № 8. С. 753.
4. *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Магнитогидродинамическое моделирование солнечной вспышки. 1. Токовый слой в короне // *Геомаг. Аэрон.* 2012. Т. 52. № 2. С. 163.
5. *Forbes T.G.* Magnetic reconnection in solar flares // *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics.* 1991. V. 62. Issue 1. P. 15.
6. *Torok T., Kliem B.* Confined and Ejective Eruptions of Kink-unstable Flux Ropes // *Astrophys. J.* 2005. V. 630. № 1. P. L97.
7. *Aulanier G., Torok T., Demoulin P., DeLuca E.E.* Formation of torus-unstable flux ropes and electric currents in erupting sigmoids. // *The Astrophysical Journal.* 2010. V. 708. № 1. 314.
8. *Zuccarello F.P., Aulanier G., Dudik J. et al.* Vortex and Sink Flows in Eruptive Flares as a Model for Coronal Implosions // *Astrophysical J.* 2017. V. 837. № 2.
9. *Jiang C., Wu S.T., Yurchyshyn V. et al.* How Did a Major Confined Flare Occur in Super Solar Active Region 12192? // *Astrophysical J.* 2016. V. 828. № 1.
10. *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Магнитный поток активной области и его связь со вспышками // *Астрон. журн.* 2011. Т. 88. № 7. С. 684.
11. *Podgorny I.M., Podgorny A.I.* Magnetic field distribution in the flare productive active region NOAA 10720 // *J. Atmospheric and Solar Terrestrial Phys.* 2013. V. 92. P. 59.
12. *Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С.* Динамика магнитного поля активных областей в предвспышечном состоянии и во время солнечных вспышек // *Астрон. журн.* 2015. Т. 92. № 8. С. 669.
13. *Podgorny I.M., Podgorny A.I.* Использование ультрафиолетового излучения для диагностики развития предвспышечного состояния солнечной короны и солнечной вспышки // *Proc. 40th Annual Apatity Seminar (2–6 March, Apatity).* 2017.
14. *Podgorny I.M., Podgorny A.I.* Solar flares dynamics investigation using UV diagnostics // *Sun and Geosphere.* 2018. V. 13. № 1. P. 69.
15. *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Магнитогидродинамическое моделирование солнечной вспышки. 2. Модель вспышки и моделирование с использованием магнитных карт активных областей // *Геомаг. Аэрон.* 2012. Т. 52. № 2. С. 176.
16. *Podgorny A.I., Podgorny I.M.* MHD Simulation of Solar Flare Current Sheet Position and Comparison with X-ray Observations in active region NOAA 10365 // *Sun and Geosphere.* 2013. V. 8. № 2. P. 71.
17. *Podgorny I.M.* Simulation Studies of Space // *Fundamentals of Cosmic Physics.* 1978. V. 1. № 1. P. 1.
18. *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Образование нескольких токовых слоев над активной областью АО10365 перед серией вспышек // *Астрон. журн.* 2008. Т. 85. № 8. С. 739.
19. *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* МГД моделирование явлений в солнечной короне с использованием абсолютно неявной схемы // *Журн. вычислительной мат. и мат. физ.* 2004. Т. 44. № 10. С. 1873.
20. *Podgorny A.I., Podgorny I.M.* Positions of X-ray emission sources of solar flare obtained by mhd simulation // *Proc. Physics of Auroral Phenomena, 36 Annual Seminar. Apatity.* 2013. P. 117.

21. *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Модель солнечной вспышки: сопоставление с наблюдением высокоэнергетических процессов // *Астрон. журн.* 2006. Т. 83. № 10. С. 940.
22. *Hiei E., Hundhausen A.J.* Development of a coronal helmet streamer of 24 January 1992 // *Magnetodynamic phenomena in the solar atmosphere/ Ed. by Uchida Y., Kosugi T., Hudson S. Kluwer Acad. Pub., 1996. P. 125.*
23. *Masuda S., Kosugi T., Hara H. et al.* A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection // *Nature.* 1994. V. 371. № 6497. P. 495.
24. *Krucker S., Wuelsel J.-P., Vourlidas A. et al.* STEREO and RHESSI observations of electron acceleration in a partially Disk-Occulted Solar Flare // *Proc. of ESPM-12.* 2008.
25. *Борисенко А.В., Подгорный И.М., Подгорный А.И.* Использование суперкомпьютера в изучении механизма солнечной вспышки путем МГД-моделирования в короне // Конференция “Астрономия-2018”. М., ГАИШ МГУ, 22–26 октября 2018. Солнечно-земная физика – современное состояние и перспективы. С. 39.
26. *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Ускорение частиц в токовом слое // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1997. Т. 61. № 6. С. 1067.
27. *Podgorny I.M., Podgorny A.I.* Solar cosmic ray acceleration and propagation // *Sun Geosphere* 2016. V. 11. № 2. P. 85.
28. *Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М.* Жесткое рентгеновское излучение, сопровождающее разряд в газе // *Атомная энергия.* 1956. Т. 1. № 3. С. 97.
29. *Подгорный И.М., Ковальский Н.Г., Пальчиков В.Е.* Электроны, вызывающие жесткое рентгеновское излучение импульсных разрядов // *ДАН.* 1958. Т. 123. С. 825.
30. *Подгорный И.М., Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В. и др.* О механизмах генерации жесткого рентгеновского излучения и релятивистских протонов в солнечной вспышке // *Астрон. журн.* 2010. Т. 87. № 7. С. 704.
31. *Podgorny I.M., Balabin Yu.V., Podgorny A.I. et al.* Spectrum of solar flare protons // *J. Atmos. Solar. Terr. Phys.* 2010. V. 72. № 13. P. 988.
32. *Podgorny I.M., Podgorny A.I.* Proton acceleration in the solar flare // *J. Atmospheric and Solar Terrestrial Phys.* 2018. V. 180. P. 9.
33. *Istomin Ya.N.* Relativistic jets in active galactic nuclei: time variability // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2010. V. 408. P. 1307.
34. *Maehara H. et al.* Superflares on solar-type stars // *Nature.* 2012. V. 485. Issue 7399. P. 478.
35. *Shibayama T. et al.* Superflares on solar-type stars observed with Kepler. I. Statistical properties of superflares // *Astrophysical J. Supplement.* 2013. V. 209. Issue 1.