

На правах рукописи

Зимовец Иван Викторович

**КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК**

Специальность 01.03.03 – физика Солнца

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Москва 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте космических исследований РАН

**Научный руководитель:**

к.ф.-м.н. Струминский А.Б.  
(ИКИ РАН)

**Официальные оппоненты:**

д.ф.-м.н. Мельников В.Ф.  
(ГАО РАН)

д.ф.-м.н. Богачев С.А.  
(ФИАН)

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

Защита состоится 7 декабря 2010 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного Совета Д 002.113.03 ИКИ РАН по адресу, Москва, Профсоюзная ул., 84/32, 2-й подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН  
Автореферат разослан    ноября 2010 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета,  
к.ф.-м.н. Буринская Т.М.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одним из самых захватывающих и познавательных с точки зрения фундаментальной науки проявлений солнечной активности являются вспышки. Несмотря на интенсивное изучение, их природа еще далека от детального понимания. Тем не менее, есть масса оснований полагать, что движителем вспышек является магнитное пересоединение, происходящее в локальных токовых слоях, спорадически образующихся в активных областях Солнца [1, 2]. Накапливаемая до вспышки магнитная энергия токов во время вспышки преобразуется в кинетическую энергию плазмы, локально прогревая до температур в десятки мегакельвинов, а также в кинетическую энергию ускоренных заряженных частиц.

Естественным следствием этих процессов в солнечной атмосфере является генерация жесткого рентгеновского и микроволнового излучения. Первое испускается в основном за счет кулоновского взаимодействия как тепловых, так и нетепловых электронов с протонами и ионами плазмы, в то время как второе является магнитотормозным излучением тех же популяций электронов [3]. Исследование электромагнитного излучения в указанных спектральных диапазонах важно для получения информации о характере протекания вспышечных процессов энерговыделения. Так, временные профили потоков жесткого рентгеновского и микроволнового излучения вспышек позволяют изучать динамические свойства этих процессов, в то время как спектральный анализ излучения в данных диапазонах позволяет судить об энергетических характеристиках популяций ускоренных заряженных частиц, а также о физических параметрах плазмы вспышечных областей.

Уже на заре космической эры при помощи устройств, еще не способных выполнять пространственно-разрешенные наблюдения Солнца, было обнаружено, что временные профили потоков жесткого рентгеновского и микроволнового излучения многих вспышек представляют собой коррелированные последовательности всплесков, обладающих различной длительностью и временами между пиками, однако, лежащими в узких пределах в каждой конкретной вспышке. Группы таких всплесков принято называть *квазипериодическими пульсациями* (КПП). От вспышки к вспышке их характерные периоды варьируются - от долей секунды до нескольких минут [3, 4, 5]. В некоторых случаях наблюдается *мультипериодичность*, когда в частотных спектрах временных профилей потока излучения выделяется сразу несколько статистически значимых периодов.

КПП свидетельствуют о том, что:

1. Процессы вспышечного энерговыделения протекают отдельными актами, вероятно, происходящими в пространственно-разнесенных по активной области источниках.
2. Эффективность одного источника энерговыделения модулируется извне (посредством граничных условий) квазипериодическим образом.

В первом случае остается загадкой, что представляют собой эти источники: являются ли они отдельными токовыми слоями или же частями единого слоя, разрушающе-

гося специфическим образом? Отчасти, вопрос остается открытым из-за того, что эффективных методов наблюдения токовых слоев в солнечной атмосфере до сих пор не существует. Остается также неясным, посредством каких механизмов источники энерговыделения “включаются” квазипериодическим образом.

Во втором случае, в связи с бурным развитием корональной сейсмологии, вызванным усовершенствованием наблюдательных инструментов, в основном пытаются применять механизмы, основанные на МГД-колебаниях магнитных потоковых трубок [5, 6]. Тем не менее, вследствие того, что до сих пор не удалось осуществить пространственно-разрешенных наблюдений МГД-колебаний во вспышечных областях, испускающих КПП жесткого рентгеновского и микроволнового излучения, проблема остается открытой.

### **Актуальность темы**

Сам факт существования КПП, а также их временные характеристики, такие как средний период и отношение периодов (в случае *мультипериодичности*), глубина модуляции, характерное время затухания или раскачки, фазовые соотношения в различных каналах энергии, динамика энергетических спектров излучения и т.п., несут важную информацию о протекании процессов энерговыделения во вспышках и накладывают существенные ограничения на их модели. Тем не менее, без детального исследования пространственно-временной эволюции источников КПП, так же как и без информации о морфологических свойствах вспышечных областей, не представляется возможным сделать достоверный вывод о механизме генерации КПП, следовательно, и о механизмах вспышечного энерговыделения в целом.

На протяжении двух последних десятилетий солнечная физика активно развивается. На орбите постоянно функционируют сразу несколько обсерваторий, способных выполнять комплексные наблюдения Солнца в различных спектральных диапазонах электромагнитного излучения. Обсерватории космического базирования поддерживаются широкой сетью наземных оптических и радиотелескопов. Представляется необходимым, используя достижения современной наблюдательной техники, детально исследовать пространственно-временную эволюцию источников КПП рентгеновского излучения вспышек, а также физические свойства среды, в которой эти источники генерируются.

С этой точки зрения наиболее актуальным и перспективным выглядит, в первую очередь, использование данных наблюдений космического аппарата *RHESSI*, успешно функционирующего с 2002 г. С его помощью можно исследовать динамику и физические свойства источников жесткого рентгеновского излучения вспышек с недостижимым ранее пространственным (около 2,5") и энергетическим (около 1 кэВ) разрешением. Разрешение по времени *RHESSI* составляет 4 с при построении изображений, этого вполне достаточно для детального анализа КПП во многих вспышечных событиях. Антисовпадательная защита *ACS* на борту астрофизической обсерватории *INTEGRAL*, обладающая очень большой площадью рабочей поверхности и массой детектирующего вещества и, как следствие, хорошей чувствительностью к жестким рентгеновским фотонам, позволяет изучать динамику нетеплового электромагнитного излучения вспышек

с высоким временным разрешением (50 мс), что может дополнить пространственно-разрешенные наблюдения *RHESSI*.

Прецизионные наблюдения магнитоплазменных структур вспышечных областей, выполняемые телескопами мягкого рентгеновского и ультрафиолетового излучения на борту космических аппаратов *Hinode*, *SOHO* и *TRACE*, позволяют детально исследовать физические и морфологические свойства среды, в которой происходит вспышечное энерговыделение и генерация КПП.

Наряду с этим, фотосферные магнитограммы полного видимого диска Солнца, регулярно получаемые магнитографом *MDI/SOHO* с шагом по времени, иногда достигающим одной минуты, дают возможность восстанавливать трехмерную структуру магнитного поля активных областей в моменты времени непосредственно перед вспышками и, следовательно, изучать его морфологические и топологические свойства. Это важно как для решения проблемы вспышек в целом, так и КПП в частности, поскольку есть веские основания считать, что источники первичного энерговыделения вспышек - токовые слои - формируются в окрестности топологических особенностей магнитного поля, таких как нулевые точки и сепараторы [1, 2, 7, 8].

Однако в реальных солнечных событиях далеко не всегда удается отождествить эти особенности с местами первичного энерговыделения. В связи с этим в [9] была высказана гипотеза, предварительно подтвержденная анализом двух вспышечных событий, что источники первичного энерговыделения вспышек могут локализоваться в окрестности *точек самопересечения поверхностей нулевого F-фактора* магнитного поля – дифференциального фактора, характеризующего структурного рода особенность магнитного поля. При  $F < 0$  произвольная точка пространства в плоскости, перпендикулярной вектору магнитного поля в этой точке, представляет собой X-точку магнитного поля, тогда как при  $F > 0$  она X-точкой не является [10].

Представляется интересным и важным проверить данную гипотезу на основе детального анализа серии реальных вспышечных событий по прецизионным данным наблюдений *RHESSI* и *MDI/SOHO* и, в случае подтверждения, воспользоваться ей с целью локализации мест первичного энерговыделения вспышек и изучения их возможных связей с КПП.

**Цель работы** – исследовать пространственно-временную эволюцию источников КПП жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек и пополнить имеющиеся знания о физических процессах, ответственных за квазипериодический характер вспышечного энерговыделения и ускорения электронов. Исходя из обозначенной цели, поставлены следующие задачи:

1. По данным *RHESSI* и сети наземных радиотелескопов исследовать динамику и физические свойства источников КПП жесткого рентгеновского и микроволнового излучения солнечных вспышек, а также, используя пространственно-разрешенные наблюдения *SOHO* и *TRACE* в диапазонах оптического и ультрафиолетового излучения, исследовать морфологические свойства и динамику родительских активных областей отобранных вспышечных событий.

2. Используя фотосферные магнитограммы *MDI/SOHO* провести численный расчет потенциального магнитного поля в исследуемых вспышечных областях для деталь-

ного анализа его морфологических особенностей и их возможной связи с источниками КПП.

3. На основе расчета магнитного поля и его дифференциальных характеристик, а также определенных с помощью *RHESSI* координат источников жесткого рентгеновского излучения исследовать вопрос локализации источников первичного энерговыделения во вспышечных областях.

4. Установить более жесткие ограничения на модели квазипериодического энерговыделения и ускорения электронов в солнечных вспышках.

Подобного рода комплексных исследований, акцентирующих внимание на квазипериодическом характере процессов энерговыделения солнечных вспышек, до сих пор не проводилось в должной мере. Данная диссертационная работа имеет целью восполнить этот пробел.

### **Научная новизна**

- С помощью пространственно-разрешенных наблюдений впервые показано, что КПП нетеплового жесткого рентгеновского излучения с периодами десятка секунд и более имеют тенденцию происходить в эруптивных двухленточных солнечных вспышках и связаны с последовательным вовлечением соседних магнитных петель вспышечных аркад в процесс энерговыделения, по крайней мере, иногда сопровождающийся открытием этих петель.
- Обнаружены неизвестные ранее приборные осцилляции в темпах счета детекторов рентгеновского излучения космического аппарата *RHESSI* и показано, что осцилляции являются следствием нутации вращающегося аппарата.
- В рамках концепции вспышечного энерговыделения в окрестности структурного рода особенности магнитного поля - точки самопересечения поверхностей нулевого F-фактора - предложено объяснение феномена гомологических солнечных вспышек.
- Обнаружены радиобесшумные жесткие рентгеновские предвестники солнечных вспышек. Показано, что источники энерговыделения предвестников, располагающиеся в хромосфере, могут служить триггером вспышек.

### **Научная и практическая ценность работы**

1. Полученные результаты по исследованию КПП нетеплового электромагнитного излучения солнечных вспышек накладывают новые существенные ограничения на их модели и указывают направление, в котором модели должны развиваться.
2. В рамках проведенных исследований обнаружено, что в базе данных рентгеновских детекторов космического аппарата *RHESSI* содержится не учитываемый ранее корректно артефакт – гармоническая модуляция темпов счета детекторов вследствие нутации аппарата. В будущих исследованиях КПП рентгеновского излучения вспышек по данным *RHESSI* этот артефакт необходимо принимать во внимание.

3. Полученные результаты по локализации источников первичного энерговыделения солнечных вспышек и анализу обнаруженных радиобесшумных жестких рентгеновских предвестников могут послужить основой для разработки новых методов прогнозирования вспышек.
4. Разработанный пакет программ для расчета и визуализации магнитного поля в солнечной атмосфере по фотосферным магнитограммам *MDI/SOHO* может быть адаптирован для решения широко круга задач физики Солнца.

### **Личный вклад автора**

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены либо полностью ее автором, либо при равноценном участии автора и его коллег.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- 1) International Symposium “Solar Extreme Events 2007”, Athens, Greece (2007);
- 2) 30<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, Merida, Mexico (2007);
- 3) 12<sup>th</sup> European Solar Physics Meeting, Freiburg, Germany (2008);
- 4) V конференция молодых ученых, посвященная Дню космонавтики, ИКИ РАН, Москва, Россия (2008);
- 5) Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца, Санкт-Петербург, Пулковое, Россия (2008, 2009, 2010);
- 6) 37<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, Montreal, Canada (2008);
- 7) STEREO-3/SOHO-22 Workshop, Bournemouth, England (2009);
- 8) Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике, Иркутск, Россия (2009);
- 9) 52<sup>я</sup> научная конференция МФТИ, Долгопрудный, Россия (2009);
- 10) International Coronal Workshop “The Sun: from active to quiet”, Lebedev Institute of the RAS, Moscow, Russia (2009);
- 11) 5<sup>я</sup> конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, ИКИ РАН, Москва, Россия (2010);
- 12) VII конференция молодых ученых, посвященная Дню космонавтики, ИКИ РАН, Москва, Россия (2010);
- 13) 38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany (2010);
- 14) Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2010, Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика, Россия (2010),

а также на научных *семинарах*:

- 1) семинар “Космическая электродинамика и физика Солнца” под руководством Б.В. Сомова, ГАИШ, Москва, Россия (2008, 2009);
- 2) семинар отдела Extraterrestrial physics, Christian-Albrechts-University, Kiel, Germany (2009);
- 3) семинар отдела Физики космической плазмы ИКИ РАН, Москва, Россия (2009, 2010);
- 4) общеинститутский семинар по физике Солнца, ИЗМИРАН, Троицк, Россия (2009).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 9 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК: 4 (первый автор) + 5 (соавтор). Также опубликовано 3 статьи в трудах конференций: 2 (первый автор) + 1 (соавтор).

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав основного текста, заключения, трех приложений и списка цитированной литературы, содержащего 232 наименования. Полный объем диссертации - 238 страниц, включая 61 рисунок и 3 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** приведено описание современного состояния исследуемой проблемы, обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи.

**Глава 1**, состоящая из десяти подразделов, посвящена комплексному исследованию пространственно-временной эволюции и физических свойств источников КПП жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек, а также их родительских областей.

В **подразделе 1.1** приведено описание предлагаемой методики анализа вспышек и обсуждены ее преимущества и недостатки. Обоснован выбор “штучного” характера (“case study”) исследований. Представлен список исследуемых событий, содержащий их некоторые характеристики.

В **подразделах 1.2-1.5** детально исследуются четыре вспышки: 29 мая 2003 г. (рентгеновский класс X1.2), 19 января 2005 г. (X1.3), 15 января 2005 г. (X2.6) и 21 августа 2002 г. (M1.4). Вспышки отобраны таким образом, чтобы они сопровождались явными КПП жесткого рентгеновского и микроволнового излучения, не требующими применения методов статистического анализа временных рядов для их выявления (рис. 1). Периоды КПП в отобранных вспышках варьировались в пределах 20-160 с. Таким образом, мы имели возможность исследовать динамику источников каждой пульсации при помощи *RHESSI*, разрешение по времени которого составляет около 4 с.

Для всех исследуемых вспышек при помощи анализа энергетических спектров рентгеновского излучения, детектируемого *RHESSI*, в моменты времени наблюдения КПП были определены диапазоны доминирования теплового и нетеплового компонентов излучения. Известно, что источниками теплового рентгеновского излучения вспышек в основном служат корональные участки вспышечных магнитных петель, заполняемых разогретой плазмой, в то время как источники нетеплового жесткого рентгеновского излучения преимущественно располагаются в подножиях вспышечных петель и являются результатом высыпания и торможения в плотной плазме хромосферы электронов, ускоренных в корональных источниках первичного энерговыделения [3]. Аккуратное разделение рентгеновского излучения на тепловой и нетепловой компонент позволяет: 1) судить о процессах генерации КПП; 2) физически обоснованно выбирать энергетические диапазоны для построения информативных серий изображений вспышечных областей по данным *RHESSI*, избегая “засветки” тепловыми источниками нетепловых, что крайне важно для точного определения их положения в пространстве.

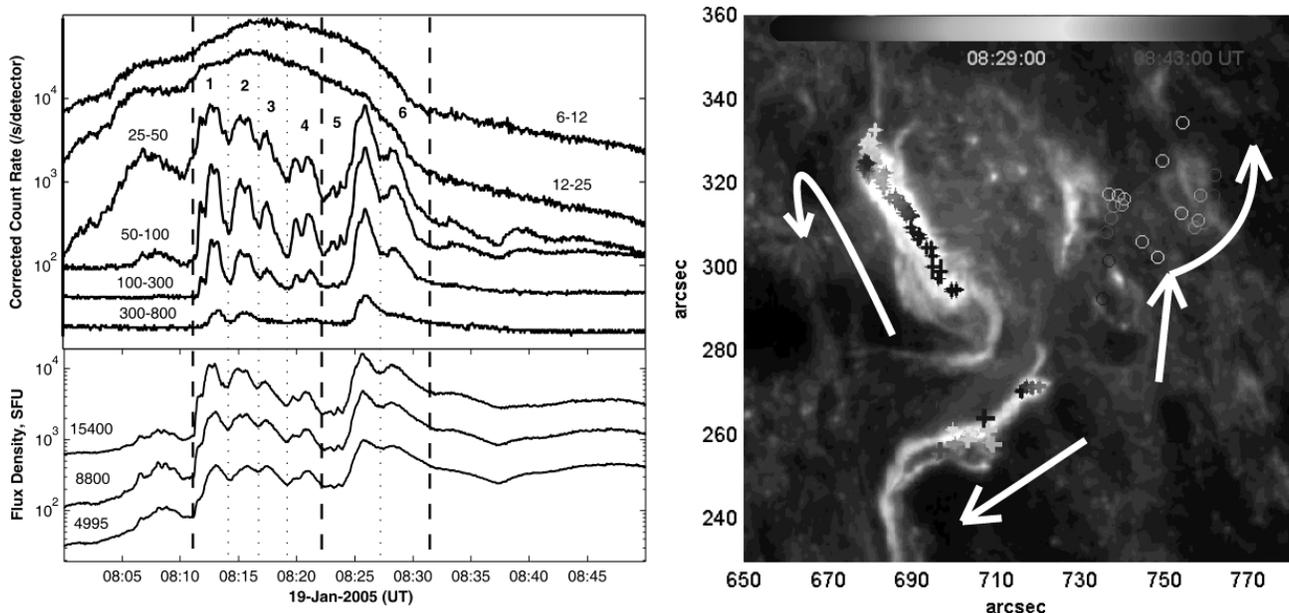
Установлено, что в исследованных событиях КПП проявлялись преимущественно в диапазоне нетеплового жесткого рентгеновского излучения. При этом его энергетический спектр характеризовался динамическим поведением “мягкий-жесткий-мягкий” в ходе практически каждой пульсации.

С учетом результатов спектрального анализа при помощи различных алгоритмов [11] строились серии изображений вспышечных областей отдельно в диапазонах доминирования теплового и нетеплового компонента рентгеновского излучения в моменты наблюдения КПП. В результате было установлено, что в каждой исследованной вспышке тепловое рентгеновское излучение, как и ожидалось, испускалось преимущественно из вершин вспышечных петель, формирующихся в аркаду, наблюдаемую также в диапазоне экстремального ультрафиолетового излучения при помощи телескопов *TRACE* и *EIT/SOHO* над линией инверсии магнитной полярности. В подножиях вспышечных петель аркады, в хромосфере, вдоль линии инверсии магнитной полярности формировались вспышечные ленты, наблюдаемые в ультрафиолетовом диапазоне излучения (см. рис. 1). При этом было обнаружено, что по мере развития вспышки парные источники пульсаций нетеплового жесткого рентгеновского излучения ( $E > 25-50$  кэВ) последовательно зажигались в хромосферных подножиях соседних вспышечных петель (групп петель) аркады. Источники как бы прочерчивали, начиная с одного конца, вспышечные ленты в направлении вдоль линии инверсии магнитной полярности (см. рис. 1). Каждая пульсация нетеплового жесткого рентгеновского излучения была испущена из подножий своей вспышечной петли (групп петель).

Для вспышки 29 мая 2003 г., произошедшей неподалеку от центра диска Солнца, была возможность восстановить магнитное поле в потенциальном приближении в активной области. Силовые линии восстановленного поля, пущенные из центров яркости источников КПП нетеплового жесткого рентгеновского излучения, адекватно прописали вспышечную аркаду, наблюдаемую телескопом *TRACE* на длине волны 171 Å.

По нашим оценкам скорость движения источников КПП варьировалась в пределах  $V = 10-350$  км/с, тогда как альфвеновская и звуковая скорости в магнитных петлях вспышечной аркады (по крайней мере, в событии 29 мая 2003 г., для которого мы имели возможность рассчитать магнитное поле в короне) принимали значения  $V_A > 2000$  км/с и  $V_S = 600-800$  км/с, соответственно. Следовательно, с большой долей вероятности из списка возможных объяснений наблюдаемого явления следует исключить триггерные ме-

ханизмы энерговыведения, основанные на распространении магнитозвуковых возмущений вдоль вспыхечных аркад магнитных петель [12]. Механизмы, основанные на дрейфовых движениях популяций ускоренных и захваченных в магнитных петлях аркады электронов вдоль линии инверсии магнитного поля, также можно исключить из рассмотрения, поскольку для них характерны скорости лишь  $V_D < 1$  м/с.



**Рис. 1.** Левая панель: временные профили рентгеновского и микроволнового излучения солнечной вспышки 19 января 2005 г. Правая панель: пространственно-временная эволюция источников теплового рентгеновского излучения в диапазоне энергий 6-12 кэВ (кружки) и КПП нетеплового жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 50-100 кэВ (крестики) во вспыхечной области. Ход времени указан градиентами цвета рентгеновских источников. Стрелками обозначено направление движения источников. Подложка – изображение вспыхечной области, полученное *TRACE* на длине волны 1600 Å.

При помощи анализа наблюдений, выполненных радиогелиографом *Nobeyama*, установлено, что во время пульсаций нетепловое микроволновое излучение, так же как и тепловое рентгеновское, испускалось преимущественно из окрестности вершин петель вспыхечных аркад. Это указывает на то, что ускорение/инжекция нетепловых популяций электронов также могли происходить в окрестности вершин петель аркады [13]. Более того, для вспышки 21 августа 2002 г. было установлено, что КПП нетеплового жесткого рентгеновского излучения последовательно испускались из подножий соседних шлемовидных (касповых) структур, вдоль вытянутых вершин которых происходила инжекция разогретой вспыхечной плазмы со скоростью около 400 км/с. При этом в предвспыхечной фазе события, до начала пульсаций, во вспыхечной области наблюдалась система замкнутых магнитных петель. Стоит также отметить, что все исследованные вспышки являлись эруптивными событиями, сопровождавшимися корональными выбросами массы.

**Подраздел 1.6** посвящен детальному исследованию солнечной вспышки рентгеновского класса M1.8, произошедшей 20 октября 2002 г. Применение методики построения нормированных периодограмм Ломба к временным профилям темпов счета детекторов *RHESSI* в различных энергетических каналах, позволило обнаружить два

статистически значимых периода осцилляций рентгеновского излучения:  $P_{16}=16$  с и  $P_{36}=36$  с (явление мультипериодичности).

При помощи анализа энергетических спектров рентгеновского излучения установлено, что 36-секундные пульсации были присущи только нетепловому компоненту рентгеновскому излучения в импульсной фазе вспышки, тогда как 16-секундные пульсации одновременно присутствовали в тепловом и нетепловом компоненте рентгеновского излучения как в импульсной, так и в фазе спада вспышки.

Исследование морфологии вспышечной области во время наблюдения КПП по данным *RHESSI*, *EIT/SOHO* и *MDI/SOHO* показало, что область состояла из двух пространственно-разнесенных комплексных систем магнитных петель, взаимодействующих друг с другом посредством третьей системы, расположенной между ними. Было установлено, что 36-секундные пульсации нетеплового рентгеновского излучения в ходе развития вспышки испускались нестационарными источниками, зажигающимися в подножиях различных петель двух вспышечных систем, в то время как источники 16-секундных пульсаций теплового рентгеновского излучения по большей мере концентрировались вблизи вершин петель. Систематического движения рентгеновских источников, как в случае двухленточных вспышек, исследованных в **подразделах 1.2-1.5**, обнаружено не было.

Были получены оценки альфвеновской и звуковой скоростей во вспышечных петлях:  $700 < V_A < 2200$  км/с и  $300 < V_A < 600$  км/с, соответственно. Следовательно, быстрая и медленная магнитозвуковые скорости были ограничены значениями  $760 < V_F < 2280$  км/с и  $280 < V_T < 580$  км/с, соответственно. Длины вспышечных петель по нашим оценкам составляли  $L=20-40$  Мм. При этом оказалось, что  $V_F$  соответствует фазовой скорости  $V_{PH}=2L/P$  глобальной стоячей моды быстрых магнитозвуковых волн (будь то изгибная мода или мода перетяжек) вспышечных петель с периодом  $P=P_{36}=36$  с ( $1100 < V_{PH}=2L/P_{36} < 2200$  км/с). Это дает прямое указание на то, что обнаруженные КПП нетеплового жесткого рентгеновского излучения с периодом  $P_{36}=36$  с вполне могли являться следствием возбуждения МГД-колебаний отмеченного типа во вспышечных петлях. Непосредственно зафиксировать колебания вспышечных петель не удалось, возможно, из-за несовершенства наблюдательных инструментов. Поскольку источники КПП нетеплового жесткого рентгеновского излучения наблюдались одновременно в основаниях петель обеих вспышечных систем, был сделан вывод, что магнитозвуковым колебаниям с большей вероятностью могли быть подвержены петли соединяющей системы. Акты энерговыделения с периодом  $P_{36}=36$  с в обеих вспышечных системах могли вызываться взаимодействием содержащихся в них топологических особенностей магнитного поля (скажем, нулевых точек) с внешними магнитозвуковыми волнами соединяющей системы петель [5, 14]. Аналогичный эффект наблюдался ранее в двух пространственно-разнесенных вспышечных областях, соединенных трансэкваториальной системой магнитных петель [15].

Показано, что КПП рентгеновского излучения с периодом  $P_{16}=16$  с, по всей видимости, не являются следствием возбуждения второй гармоники того же самого типа МГД-колебаний той же магнитной петли, первая гармоника которого могла бы иметь период  $P_{36}=36$  с. В этом случае должно было бы выполняться соотношение  $P_N/P_1 > 1/N$ , где  $P_1$  и  $P_N$  - соответственно период первой и N-й гармоники одного колебательного процесса. В рассматриваемом же случае  $P_{16}/P_{36}=0,44$ , т.е. второй гармоникой колебания с периодом  $P_{16}=16$  с быть не должны. Более высокой гармоникой они, по всей ви-

димости, не могут являться из-за того, что возбуждение второй гармоники не наблюдается, а возбуждение более высокой - менее вероятный процесс. Таким образом, природа КПП рентгеновского излучения с периодом  $P_{16}=16$  с в исследуемой вспышке неочевидна. Однако не исключено, что она также может быть связана с МГД-колебаниями магнитных петель во вспышечной области.

В **подразделе 1.7** произведено обобщение установленных наблюдательных фактов, а в **подразделе 1.8** обсуждаются, какие существующие модели удовлетворяют этим фактам, а какие нет. В частности, сделан вывод, что популярные модели, основанные на идее о подверженных МГД-колебаниям петлях [6], не удовлетворяют выполненным наблюдениям эруптивных двухленточных вспышек.

Часть фактов согласуется с предсказаниями стандартной модели эруптивных вспышек (CSHKP; [2, 3]). Однако в рамках модели ожидается, что мощность энерговыделения, грубо определяемая как  $W(t) \sim V_{\perp}(t)B^2(t)$  ( $V_{\perp}$  - скорость хромосферных источников нетеплового жесткого рентгеновского излучения в направлении, перпендикулярном линии инверсии магнитной полярности,  $B$  - радиальная составляющая магнитного поля на фотосфере), должна коррелировать с потоками нетеплового жесткого рентгеновского и микроволнового излучения. В рассмотренных вспышках это не выполнялось. Более того, поскольку движение парных источников нетеплового жесткого рентгеновского излучения происходило преимущественно вдоль линии инверсии магнитной полярности, сделан вывод, что в прямом виде стандартная модель не применима к рассматриваемому типу вспышечных событий. Однако полученные результаты наблюдений не противоречат идее о неравномерной (асимметричной) вдоль вспышечной аркады эрупции магнитного жгута/волокна или же идее об асимметричном разрушении токового слоя (систем токовых слоев), располагающегося (располагающихся) во вспышечной области вдоль линии инверсии магнитной полярности.

Опираясь на результаты работы [16] по численному моделированию динамики нетепловых электронов во вспышечных петлях события 29 мая 2003 г., а также на полученные результаты наблюдений и оценок физических характеристик вспышечных петель (длина, концентрация плазмы, магнитное поле), мы пришли к выводу: КПП нетеплового жесткого рентгеновского и микроволнового излучения, по крайней мере, в некоторых эруптивных двухленточных солнечных вспышках являются следствием отдельных актов энерговыделения и ускорения электронов, происходящих последовательно в соседних элементах (магнитных петлях/касповых структурах) неоднородных вспышечных аркад. Вероятно, наблюдаемый в таких вспышках квазипериодический характер энерговыделения отражает существование своеобразного квазиинварианта  $P=L_{i,i+1}/v_{i,i+1}$ , где  $L_{i,i+1}$  и  $v_{i,i+1}$  - расстояния между соседними последовательно вовлекаемыми во вспышечный процесс петлями и скорости распространения триггерного возмущения между ними, соответственно. Из наблюдений следует, что этот инвариант  $P$  различается в разных вспышках, но всегда принимает значения из довольно узкого диапазона 1-300 с. Это указывает на то, что параметры  $L_{i,i+1}$  и  $v_{i,i+1}$ , определяющие инвариант  $P$ , во многих вспышках имеют схожие значения. Вполне вероятно, что во вспышках, в которых процесс энерговыделения не проявляет явного квазипериодического характера, по каким-то причинам указанная инвариантность нарушена.

В **подразделах 1.9** и **1.10** сформулированы результаты и выводы **главы 1**, соответственно.

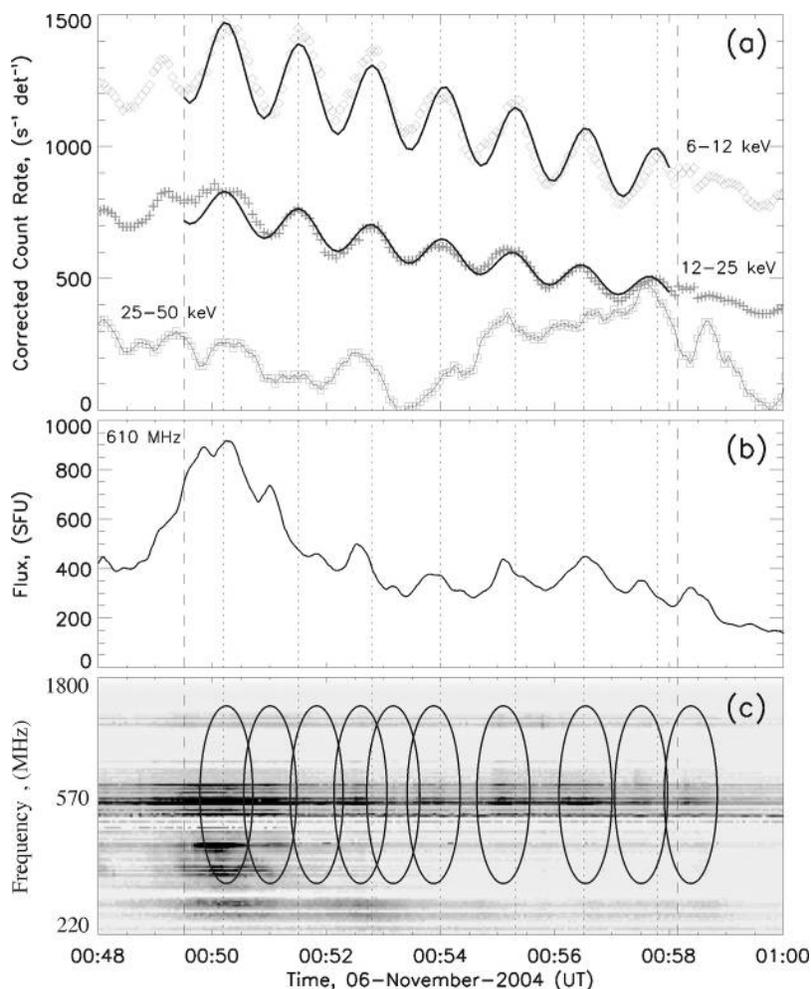
**Глава 2**, состоящая из восьми подразделов, посвящена исследованию гармонических осцилляций с периодом  $P_{75}=75$  с, обнаруженных впервые по данным рентгеновских детекторов космического аппарата *RHESSI* в фазе спада солнечной вспышки класса M9.3, произошедшей 6 ноября 2004 г.

В **подразделе 2.1** перечислены известные приборные осцилляции, проявляющиеся в темпах счета рентгеновских детекторов *RHESSI*, и указаны их причины. В **подразделе 2.2** приведено краткое описание свойств солнечной вспышки 6 ноября 2004 г.

Обнаруженные осцилляции с периодом  $P_{75}=75$  с наблюдались преимущественно в диапазоне энергий 6-25 кэВ. Глубина модуляции сигнала составляла  $m=(J_{\max}-J_{\min})/(J_{\max}+J_{\min})=7-15\%$ . При помощи аппроксимации временных профилей темпов счета детекторов *RHESSI* установлено, что осцилляции затухали необычно медленно для явления КПП рентгеновского излучения солнечных вспышек (добротность составляла  $Q \approx 240$ ). С помощью независимых данных наблюдений радиотелескопов солнечных обсерваторий *Learmonth* и *Culgoora* (Австралия) было обнаружено, что осцилляции темпов счета детекторов *RHESSI* сопровождалась КПП потока радиоизлучения Солнца на частоте 610 МГц, хотя и не обладающими столь явной периодичностью (рис. 2). Этот факт совместно с имеющейся информацией о том, что причин ожидать гармонической модуляции темпов счета детекторов *RHESSI* с периодом  $P_{75}=75$  с за счет приборных эффектов нет, послужили поводом рассматривать осцилляции как результат какого-то реального физического процесса, происходящего во вспышечной области. Вследствие этого были детально изучены физические свойства рентгеновского источника данной вспышки, наблюдаемого *RHESSI* во время осцилляций, с целью определения их природы (**подраздел 2.3**).

Анализ энергетических спектров рентгеновского излучения вспышки во время осцилляций показал, что в диапазоне энергий 6-25 кэВ, в котором наблюдались осцилляции ярче всего, в спектре рентгеновского излучения доминировал тепловой компонент. При помощи построения серий изображений вспышечной области по данным *RHESSI* было установлено, что источник теплового рентгеновского излучения располагался преимущественно в окрестности вершин группы вспышечных магнитных петель, наблюдаемых также в диапазоне ультрафиолетового излучения при помощи телескопа *EIT/SOHO*, и был практически неподвижен во время осцилляций. При этом было установлено, что площадь/объем источника изменялись в противофазе с осциллирующим потоком испускаемого им излучения. Глубина модуляции площади/объема составляли  $m_s=2-6\%$  и  $m_v=3-9\%$ , что, хотя чуть ниже, но сопоставимо с глубиной модуляции потока излучения из источника. Также было установлено, что за время наблюдения осцилляций (примерно за 12 минут), температура плазмы рентгеновского источника упала с  $T_1=22,7$  МК до  $T_2=17,3$  МК преимущественно за счет процесса теплопроводности. По нашим оценкам длина петли, в вершине которой располагался рентгеновский источник, составляла  $L=60-75$  Мм, а концентрация плазмы в ней не превышала  $n=(0,8-1,4) \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup>.

В **подразделе 2.4** показано, что все приведенные выше результаты наблюдений объясняются в рамках модели вспышечной магнитной петли, подверженной захваченной глобальной стоячей моде перетяжек (сосисочной моде) быстрых магнитозвуковых волн. Был сделан предварительный вывод, что выполнены первые пространственно-разрешенные наблюдения предсказываемой теорией моды перетяжек МГД-колебаний магнитной петли в солнечной короне.



**Рис. 2.** Динамика электромагнитного излучения вспышки 6 ноября 2004 г. в окрестности времени исследуемых гармонических осцилляций (между двумя вертикальными пунктирными линиями). **(а)** Скорректированные темпы счета *RHESSI* в диапазонах энергий 6-12, 12-25 и 25-50 кэВ. Жирные черные сплошные линии - аппроксимирующие кривые темпов счета *RHESSI* в каналах энергий 6-12 и 12-25 кэВ. Пики осцилляций рентгеновского излучения отмечены вертикальными линиями. **(б)** Сглаженный по 10 с временной профиль плотности потока радиоизлучения Солнца на частоте 610 МГц по данным обсерватории *Learmonth*. **(с)** Участок динамической спектрограммы радиоизлучения Солнца по данным обсерватории *Culgoora*. Наиболее яркие пульсации радиовсплеска IV типа, видимые на панели **(б)** на частоте 610 МГц, выделены эллипсами.

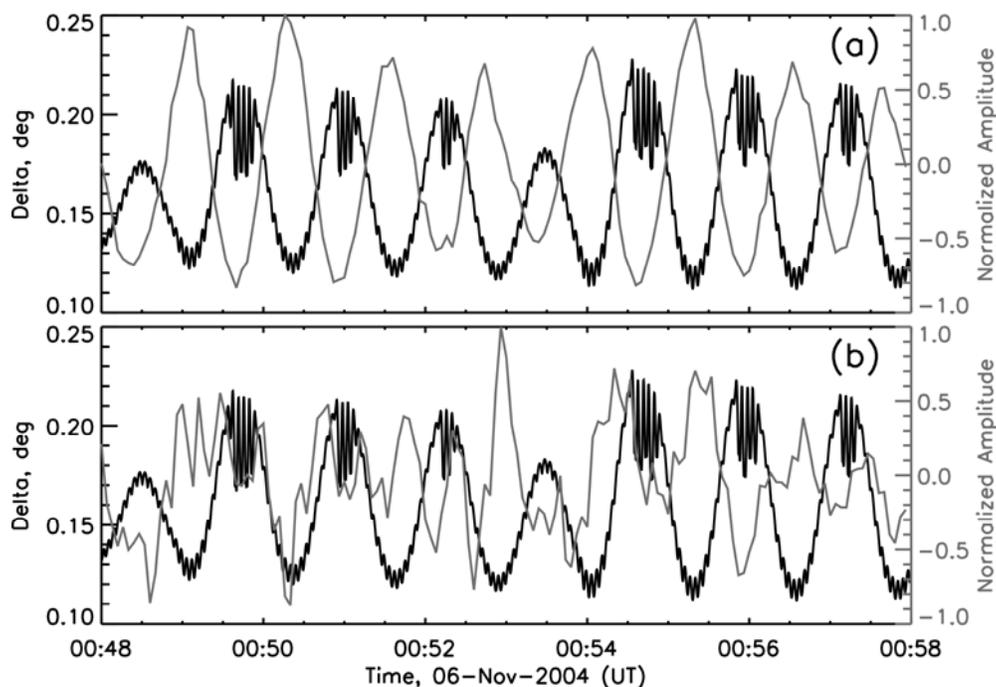
Однако в ходе дальнейших исследований (**подраздел 2.5**) по данным телеметрии было установлено, что ось вращающегося с периодом около 4 с космического аппарата *RHESSI* подвержена значительной прецессии и нутации. Период нутации в исследуемый момент времени составлял 75 с, что четко соответствовало периоду  $P_{75}$  наблюдаемых осцилляций. Поскольку в основе работы *RHESSI* заложены принципы вращающихся модулирующих коллиматоров, то процесс нутации космического аппарата естественным образом (посредством изменения углового расстояния между осью телескопа и положением вспышки на диске Солнца) приводит к модуляции потока рентгеновских фотонов солнечной вспышки, попадающих на детекторы. Чем больше это угловое расстояние ( $\Delta$ ), тем меньше детектируемый поток (рис. 3).

Было установлено, что не все детекторы *RHESSI* в одинаковой мере подвержены модуляции за счет нутации и прецессии. Чем меньше поле зрения решеток коллиматора, тем сильнее модуляция (см. рис. 3). Более того, было обнаружено, что и в некоторых других солнечных вспышках нутация *RHESSI* приводит к схожей существенной гармонической модуляции темпов счета отдельных его детекторов.

Таким образом, был сделан окончательный вывод, что обнаруженные гармонические осцилляции в темпах счета рентгеновских детекторов *RHESSI* являются приборным эффектом, ранее не принимаемым во внимание должным образом и не зафиксированным в литературе.

При дальнейшем исследовании КПП рентгеновского излучения вспышек по данным наблюдений *RHESSI* этот эффект необходимо учитывать. В **подразделе 2.6** приведено краткое руководство по выявлению приборных осцилляций указанного типа.

В **подразделах 2.7 и 2.8** сформулированы результаты и выводы **главы 2**, соответственно.



**Рис. 3.** Сглаженный по 4 с временной профиль углового расстояния между осью телескопа *RHESSI* и положением солнечной вспышки 6 ноября 2004 г. на диске Солнца (Delta; черная кривая), а также нормированные и сглаженные по 20 с темпы счета детекторов *RHESSI* (а) №5 с полем зрения 1 градус и (б) №8 с полем зрения 7.5 градусов (Normalized Amplitude; серая кривая), приведенные в интервале времени, когда осцилляции наблюдались наиболее ярко.

На примере материала, изложенного в **главе 2**, показано, как легко можно ошибиться при интерпретировании наблюдаемых во время солнечных вспышек квазипериодических пульсаций, обладая лишь ограниченной дополнительной информацией. Возможности современных солнечных телескопов обеспечивают наблюдателей именно ограниченной информацией. В большинстве работ, в которых исследуются квазипериодические пульсации рентгеновского и радиоизлучения вспышек, предлагаются объяснения в рамках концепции МГД-колебаний магнитных петель активных областей [5, 6]. Однако до сих пор не было выполнено ни одного пространственно-разрешенного

наблюдения МГД-колебаний петель, однозначно связанных с КПП электромагнитного излучения вспышек. Поэтому на сегодняшний день необходимо крайне осторожно эксплуатировать идею о МГД-колебаниях петель для интерпретации КПП в солнечных, а тем более в звездных вспышках.

В **главе 3**, состоящей из четырех подразделов, исследуется вопрос местонахождения источников первичного энерговыделения солнечных вспышек. В качестве мест локализации источников анализируются предложенные О. Г. Деном [9] особенности потенциального магнитного поля, а именно точки самопересечения поверхностей нулевого F-фактора – дифференциального фактора, характеризующего структурного рода особенность магнитного поля [10]:

$$F = \frac{1}{4} \frac{\partial B_{x_4}}{\partial x_4} \frac{\partial B_{y_4}}{\partial y_4}.$$

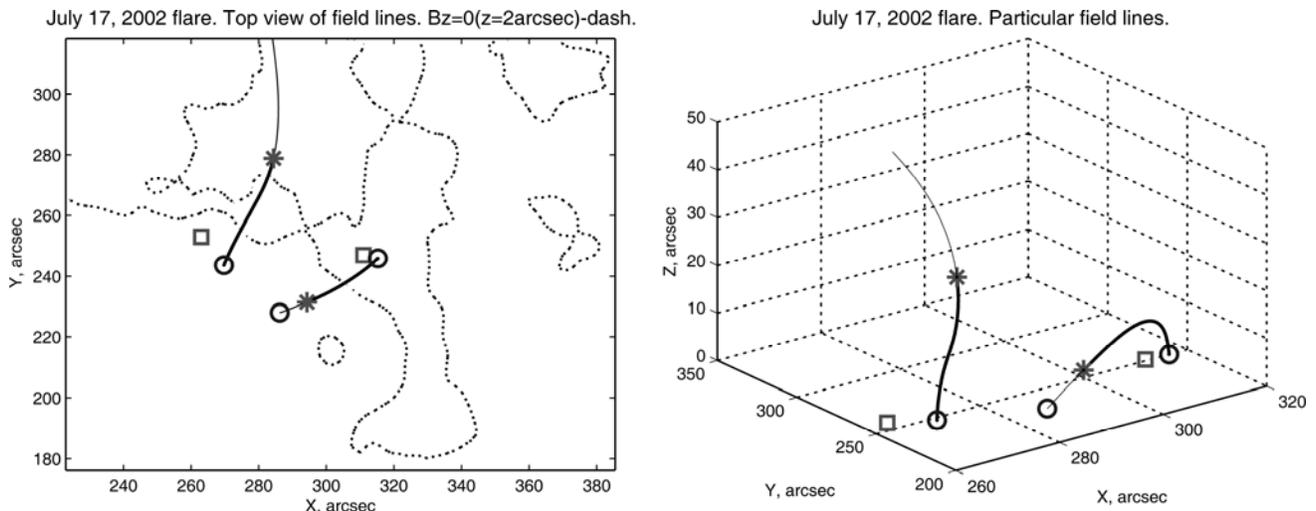
При  $F < 0$  произвольная точка пространства в плоскости  $X_4Y_4$ , перпендикулярной вектору магнитного поля в этой точке, является X-точкой магнитного поля. Оси  $X_4$  и  $Y_4$  являются главными, по ним направлены компоненты магнитного поля в окрестности рассматриваемой точки в плоскости  $X_4Y_4$ . При  $F > 0$  точка в плоскости  $X_4Y_4$  представляет собой уже O-точку магнитного поля. Таким образом, точка самопересечения поверхностей нулевого F-фактора разделяет пространство на четыре сектора с различной топологической структурой магнитного поля. В [9] было высказано предположение (назовем его *гипотезой Дена*), предварительно подтвержденное анализом двух вспышечных событий, что места первичного энерговыделения солнечных вспышек могут располагаться в окрестностях таких особых точек. В **данной главе** эта гипотеза апробируется на основе анализа шести вспышечных событий, а также применяется к анализу обнаруженного радиобесшумного жесткого рентгеновского предвестника вспышки 13 декабря 2006 г.

В **подразделе 3.1** кратко описывается состояние проблемы локализации мест первичного энерговыделения солнечных вспышек и обосновывается выбор методики их нахождения, основанной на *гипотезе Дена*.

Далее приводится критерий отбора вспышечных событий, их список с основными характеристиками, описание и обсуждение методики их анализа. Прежде всего, обсуждается следующий принципиальный момент. Формализм исследуемых особенностей магнитного поля был разработан в [10] пока только для случая потенциального магнитного поля. Однако из общих соображений и из наблюдений следует, что магнитное поле во вспышечных областях Солнца в целом не является потенциальным – в нем могут течь значительные электрические токи. Более того, считается, что электрические токи играют одну из ключевых ролей в солнечных вспышках [1, 2, 6, 7, 8]. Мы придерживаемся той точки зрения, что, по крайней мере, в некоторых вспышечных областях магнитное поле в целом может считаться потенциальным, в то время как значительные электрические токи могут течь только в окрестности локальных особенностей магнитного поля [9], формируя токовые слои в окрестности этих особенностей [1, 8].

Вспышки для анализа были отобраны на основе каталога, представленного в работе [17], исходя из следующих критериев: 1) вспышки должны были располагаться вблизи центра солнечного диска, что связано с методикой расчета магнитного поля по фотосферным магнитограммам; 2) для вспышечных областей должны были иметься магнитограммы *MDI/SOHO* продольной по лучу зрения компоненты магнитного поля на

уровне фотосферы; 3) вспышки должны были обладать умеренной мощностью (быть ниже рентгеновского класса X); 4) в импульсной фазе вспышек при помощи *RHESSI* должны были наблюдаться только два доминирующих источника нетеплового жесткого рентгеновского излучения (согласно проделываемому спектральному анализу) по разные стороны от линии инверсии магнитной полярности на фотосфере. Последние два критерия обусловлены тем, что, по нашему мнению, магнитное поле в родительских областях вспышек подобного рода может обладать характером, близким к потенциальному. В итоге мы ограничились шестью событиями.



**Рис. 4.** Силовые линии магнитного поля, пущенные из двух найденных магнитных особенностей (звездочки) в области вспышки 17 июля 2002 г. Кружками отмечены концы силовых линий на фотосфере, квадратиками - центры яркости источников нетеплового жесткого рентгеновского излучения. Пунктирная кривая на левой панели – линия инверсии магнитной полярности на высоте  $Z=2''$  над фотосферой.

Для каждой анализируемой вспышки были определены координаты центров яркости парных источников нетеплового жесткого рентгеновского излучения в хромосфере. После этого, с помощью алгоритмов, предложенных О.Г. Деном, рассчитывались дифференциальные характеристики потенциального магнитного поля во вспышечных областях по фотосферным магнитограммам *MDI*. Строились карты распределения знака дифференциального F-фактора в плоскостях, параллельных касательным плоскостям, проведенным через центры исследуемых участков фотосферы, на различных высотах. При помощи визуального анализа построенных карт отыскивались точки самопересечения изолиний нулевого F-фактора в рассматриваемых плоскостях и определялись координаты этих точек. Оказалось, что в каждой исследуемой вспышечной области отыскивались такие точки самопересечения изолиний нулевого F-фактора, что силовые линии магнитного поля, пущенные из этих точек, оканчивались в окрестности (в пределах  $10-15''$ ) центров яркости источников нетеплового жесткого рентгеновского излучения в хромосфере. Было установлено, что эти парные источники могут быть не связаны между собой одной силовой линией – каждому источнику соответствовала своя магнитная особенность (рис. 4). В ней, по всей видимости, и происходило вспышечное энерговыделение и ускорение электронов, следствием высыпания которых по силовым линиям и торможения в плотной плазме хромосферы и являлись эти источники.

Отдельное внимание уделено двум гомологическим вспышкам, произошедшим 4 и 6 ноября 2004 г. в одной активной области NOAA 10696. Промежуток времени между вспышками составлял 27 часов. Показано, что одна и та же магнитная особенность (точка самопересечения поверхностей нулевого F-фактора) 4 ноября вызвала источник нетеплового жесткого рентгеновского излучения в восточной части вспышечной области, а 6 ноября – в западной. Предложена интерпретация этого наблюдения посредством изменения электрического поля, ускоряющего электроны, в магнитной особенности вспышки 6 ноября на противоположное по сравнению со вспышкой 4 ноября, вызванным соответствующими изменениями магнитного поля в активной области.

В **подразделе 3.2** проводится многоволновое исследование необычного предвестника жесткого рентгеновского излучения, обнаруженного по данным антисовпадающей защиты ACS астрофизической обсерватории *INTEGRAL* за десять минут до солнечной вспышки рентгеновского класса X3.4, произошедшей 13 декабря 2006 г.

Уникальность предвестника заключалась в необычном для солнечных вспышек поведении его жесткого рентгеновского и радиоизлучения. Было установлено, что предвестник представлял собой мощный всплеск жесткого рентгеновского излучения ( $E > 80$  кэВ), обладавший сходными характеристиками (интенсивность, длительность) с коррелированными всплесками жесткого рентгеновского и микроволнового излучения, наблюдавшимися в импульсной фазе вспышки примерно через 10-20 минут после предвестника. При этом предвестник сопровождался лишь слабым и плавным возрастанием потока микроволнового излучения и был бесшумным в метровом и дециметровом диапазонах [18, 19].

С помощью данных наблюдений телескопа мягкого рентгеновского излучения *XRT* на борту космического аппарата *HINODE* было показано, что энерговыделение предвестника произошло неподалеку от места энерговыделения импульсной фазы самой вспышки. Установлено, что энерговыделение предвестника произошло в окрестности точек самопересечения поверхностей нулевого F-фактора магнитного поля, располагавшихся в хромосфере, вблизи линии инверсии магнитной полярности, на высоте не более 2000 км над фотосферой. На основе анализа динамики электромагнитного излучения вспышечной области показано, что предвестник мог служить триггером для последующей вспышки.

Обосновано предположение, что радиобесшумность предвестника на метровых-дециметровых длинах волн и отсутствие во время него значительных всплесков микроволнового излучения могли быть связаны с замкнутостью системы энерговыделения и сложностью ускорения достаточного количества электронов до необходимых энергий в плотной плазме хромосферы. Анализ энергетического спектра нетеплового жесткого рентгеновского излучения, выполненный по данным наблюдений *RHESSI* для аналогичного радиобесшумного предвестника, обнаруженного во вспышке 21 августа 2002 г., показал, что его спектр был более мягким ( $\gamma \approx -4$ ) по сравнению со спектром, наблюдавшимся во всплесках в импульсной фазе вспышки ( $\gamma \approx -3$ ). Этот факт свидетельствует в пользу высказанного предположения. К сожалению, *RHESSI* не наблюдал предвестник вспышки 13 декабря 2006 г., поскольку находился в тени Земли.

В **подразделах 3.3 и 3.4** сформулированы результаты и выводы **главы 3**, соответственно.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

В **Приложении А** приведены элементы корональной магнитной гидростатики и рассмотрен возможный характер магнитных полей и электрических токов в активных областях Солнца.

В **Приложении Б** представлен список всех космических и наземных обсерваторий, данные которых использованы в диссертации. Приведено описание их основных функциональных возможностей.

В **Приложении В** приведено описание методики построения периодограмм Ломба для частотного анализа временных рядов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. На основе анализа пространственно-разрешенных наблюдений установлено, что квазипериодические пульсации нетеплового жесткого рентгеновского излучения с периодами более десятка секунд имеют тенденцию происходить в эруптивных двухленточных солнечных вспышках и являются результатом последовательного вовлечения соседних магнитных петель (групп петель) вспышечных аркад в процесс энерговыделения. Квазипериодический характер энерговыделения указывает на существование квазиинварианта  $P=L_{i,i+1}/v_{i,i+1}$ , где  $L_{i,i+1}$  и  $v_{i,i+1}$  - расстояния между соседними последовательно вовлекаемыми во вспышечный процесс петлями и скорости распространения триггерного возмущения между ними, соответственно.
2. Показано, что мультипериодичность, наблюдаемая во временных профилях жесткого рентгеновского излучения, по крайней мере, некоторых солнечных вспышек, не является следствием возбуждения одной моды МГД-колебаний вспышечной магнитной петли сразу на нескольких гармониках. Квазипериодические пульсации излучения испускаются из различных петель комплексных вспышечных областей.
3. Обнаружены неизвестные ранее приборные осцилляции с периодом в несколько десятков секунд в темпах счета детекторов рентгеновского излучения космического аппарата *RHESSI*. Показано, что осцилляции являются следствием нутации вращающегося аппарата.
4. Подтверждена гипотеза о том, что источники первичного энерговыделения солнечных вспышек могут располагаться в окрестности точек самопересечения поверхностей нулевого F-фактора магнитного поля.
5. Установлено, что точки самопересечения поверхностей нулевого F-фактора магнитного поля могут сохраняться в активных областях в течение нескольких десятков часов и служить местами первичного энерговыделения в серии гомологических вспышек.
6. Обнаружены радиобесшумные жесткие рентгеновские предвестники, являющиеся триггерами солнечных вспышек. Показано, что радио-бесшумность предвестников может быть следствием низкого расположения источников их энерговыделения в хромосфере.

### Публикации по теме диссертации

- 1) Zimovets I. V., Struminsky A. B. *Observations of Double-Periodic X-Ray Emission in Interacting Systems of Solar Flare Loops* // Solar Phys. 2010. V. 263. P. 163-174.
- 2) Зимовец И. В. *Гармонические осцилляции рентгеновского излучения солнечной вспышки* // Астрон. Ж. 2010. Т. 87. № 7. С. 717-736.
- 3) Ден О. Г., Зимовец И. В. *Области первичного энерговыделения солнечных вспышек и их связь с особенностями магнитного поля* // Астрон. Ж. 2010. Т. 87. № 5. С. 503-512.
- 4) Струминский А. Б., Зимовец И. В. *Наблюдения солнечной вспышки 6 декабря 2006 г.: ускорение электронов и нагрев плазмы* // Письма в Астрон. Ж. 2010. Т. 36. № 6. С. 453-461.
- 5) Zimovets I. V., Struminsky A. B. *Imaging Observations of Quasi-Periodic Pulsatory Nonthermal Emission in Two-Ribbon Solar Flares* // Solar Phys. 2009. V. 258. P. 69-88.
- 6) Zimovets I. V., Gros M., Struminsky A. B. *Evidence of the radio-quiet hard X-ray precursor of the 13 December 2006 solar flare* // Adv. Space Res. 2009. V. 43. P. 680-686.
- 7) Струминский А. Б., Зимовец И. В. *К оценке времени прихода первых релятивистских солнечных протонов на Землю* // Известия РАН. Серия Физич. 2009. Т. 73. № 3. С. 332-335.
- 8) Струминский А. Б., Зимовец И. В. *Длительное нетепловое излучение солнечных вспышек и эффект Нойперта* // Письма в Астрон. Ж. 2008. Т. 34. № 10. с. 777-787.
- 9) Струминский А. Б., Зимовец И. В. *Динамика развития интенсивных солнечных протонных вспышек* // Письма в Астрон. Ж. 2007. Т. 33. № 9. С. 690-697.
- 10) Зимовец И. В., Струминский А. Б. *Наблюдение квазипериодического энерговыделения как результат возбуждения МГД-осцилляций в системе вспышечных петель* // Труды БШФФ-2009. 2009. С. 238-243.
- 11) Struminsky A., Zimovets I., Heber B., and Klassen A. *The role of large scale magnetic field for distribution of SEP in the 3D Heliosphere* // Proc. of the 31<sup>st</sup> ICRC. 2009. P. 1-4.
- 12) Zimovets I. *Acceleration of solar cosmic rays in stochastic non-Gaussian electric fields* // Proc. of the 30<sup>th</sup> ICRC. 2007. V. 1(SH), P. 113-116.

### Цитированная литература

1. Сыроватский С. И. *Ключевые вопросы теории вспышек* // Изв. АН СССР. Сер. Физич. 1979. Т. 43. №4. С. 695.
2. Прист Э., Форбс Т. *Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения*. М: ФИЗМАТЛИТ, 2005.

3. Aschwanden M. J. *Physics of the Solar Corona. An Introduction with Problems and Solutions*. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2009.
4. Lipa B. *Pulsations in solar hard X-ray bursts* // Solar Phys. 1978. V. 57. P. 191.
5. Nakariakov V. M., Melnikov V. F. *Quasi-Periodic Pulsations in Solar Flares* // Space Sci. Rev. 2009. V. 149. Is. 1-4. P. 119.
6. Зайцев В. В., Степанов А. В. *Корональные магнитные арки* // УФН 2008. Т. 178. № 11. С. 1165.
7. Longcope D. W. *Topological methods for the analysis of solar magnetic fields* // Living Rev. Solar Phys. 2005. V. 2. № 7. P.1
8. Somov B. V. *Plasma Astrophysics. Part II: Reconnection and flares*. Springer, 2006.
9. Ден. О. Г. *Связь возникновения солнечных вспышек с особенностями дифференциальных характеристик магнитного поля* // Астрон. Ж. 2008. Т. 85. № 11. С. 1035.
10. Ден. О. Г. *Определение областей магнитного пересоединения по дифференциальным характеристикам магнитного поля* // Астрон. Ж. 2007. Т. 84. № 2. С. 185.
11. Hurford G. J., Schmahl E. J., Schwartz R. A., et al. *The RHESSI imaging concept* // Solar Phys. 2002. V. 210. P. 61.
12. Vorpahl J. A. *The triggering and subsequent development of a solar flare* // Astrophys. J. 1976. V. 205. P. 868.
13. Melnikov, V.F., Gorbikov S.P., Reznikova V.E., Shibasaki K. *Dynamics of electron spatial distribution in microwave flaring loops* // Proc. of the 11<sup>th</sup> ESPM 2005. P. 132.
14. McLaughlin J. A., De Moortel I., Hood A. W., and Brady C. S. *Nonlinear fast magnetoacoustic wave propagation in the neighbourhood of a 2D magnetic X-point: oscillatory reconnection* // Astron. & Astrophys. 2009. V. 493. P. 227.
15. Foullon C., Verwichte E., Nakariakov V.M., Fletcher L. *X-ray quasi-periodic pulsations in solar flares as magnetohydrodynamic oscillations* // Astron. & Astrophys. 2005. V. 440, P. L59.
16. Minoshima T., Yokoyama T., and Mitani N. *Comparative analysis of nonthermal emissions and electron transport in a solar flare*. // Astrophys. J. 2008. V. 673. P. 598.
17. Saint-Hilaire P., Krucker S., Lin R. P. *A statistical survey of hard X-ray spectral characteristics of solar flares with two footpoints* // Solar Phys. 2008. V. 250. P. 53.
18. Rieger E., Treumann R.A., Karlicky M. *The radio-silent start of an intense solar gamma-ray flare* // Solar Phys. 1999. V. 187. P. 59.
19. Benz A.O., Brajsa R., Magdalenic J. *Are there radio-quiet solar flares?* // Solar Phys. 2007. V. 240. P. 263.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН  
117997, Москва, Профсоюзная 84/32

Подписано к печати 21.10.2010

Заказ 2219

Формат 70x108/32

Тираж 100

1 уч. – изд. л.