

*На правах рукописи*

**Шабалин Александр Николаевич**

**КИНЕТИКА УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВСПЫШЕЧНЫХ  
ПЕТЛЯХ И ПОТОК ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ  
ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Специальность 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2020

Работа выполнена в лаборатории космических лучей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель:

**Чариков Юрий Евгеньевич**

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Официальные оппоненты:

**Цап Юрий Теодорович**

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Отдела физики Солнца и Солнечной системы Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук»

**Остряков Валерий Митрофанович**

доктор физико-математических наук,  
профессор Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук» (САО РАН)

Защита состоится 16 октября 2020 г. в 12 часов 45 минут на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук», по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, ГАО РАН, Пулковское шоссе 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН ([www.gaoran.ru](http://www.gaoran.ru)).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

С.Д. Булига

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Одним из наиболее ярких проявлений солнечной и звёздной активности является кратковременное выделение энергии из локальных областей в атмосфере звезды, регистрируемое в широком диапазоне длин волн от радио до гамма-излучения. Основным структурным элементом короны и хромосферы звезд являются магнитные петли. Общая энергия самых мощных кратковременных вспышечных событий на звёздах часто превышает солнечные на несколько порядков. Последнее может быть связано с вовлечением в процесс большего числа магнитных структур, так как число пятен на поверхности атмосферы, например, красных карликовых звезд, оказывается в десятки раз выше, чем на Солнце [34]. Ввиду схожести процессов, происходящих в атмосферах звезд средних и малых масс, с солнечными, для интерпретации кривых и спектров излучения вспышек на звездах активно используют солнечно-звездные аналогии. Тем не менее, необходимо учитывать и отличия звезд других классов от Солнца. Например, больший размер магнитных петель, более высокая яркостная температура радиовсплесков на звёздах типа dMe [9, 14]. Различия обусловлены особенностями переноса энергии в подфотосферных слоях звезды и скоростью ее вращения. Однако удаленность подобных космических объектов не позволяет получать детальную информацию о процессах и параметрах излучающих областей.

Что касается Солнца (класс G2V), то ввиду своей близости к Земле возможно проведение уникальных наземных и космических наблюдений с высоким временным, пространственным и энергетическим разрешением. Современные наземные телескопы и космическая аппаратура позволяют изучать структуры на Солнце с характерным размером порядка 100 км, с разрешением по времени вплоть до десятков миллисекунд [3, 10, 18, 24, 29] и энергетическим разрешением  $\sim 1$  кэВ в рентгеновском диапазоне энергий. В последние годы на космических аппаратах *Yohkoh* и *RHESSI* зарегистрированы локальные источники жесткого рентгеновского излучения с максимумами яркости не только в основаниях, но также над вершиной петли [20] и/или в вершине петли [17, 21, 33]. Кроме того, наблюдались смещения положения локальных источников рентгеновского (мягкого 3-15 кэВ и жесткого 15-500 кэВ), ультрафиолетового и радио излучений в пространстве [7, 12, 13], оцениваются изменения размеров локальных рентгеновских источников в разных диапазонах энергии [6, 26]. В отдельных вспышках регистрируется гамма излучение (0.5МэВ – 1ГэВ), в континууме, и в линиях в результате ядерных реакций (0.5-8МэВ) и аннигиляции позитронов и электронов (511кэВ) [16]. Однако, следует отметить, что несмотря на существенный прогресс в наблюдениях локальных источников в рентгеновском, радио-, ультрафиолетовом диапазонах электромагнитного спектра во время вспышек, непосредственные наблюдения процесса энерговыделения, связанного с перестройкой магнитного поля и ускорением заряженных частиц, в настоящее время осуществить не удастся. Поэтому, чтобы подойти к решению

центральной задачи физики солнечных и звездных вспышек о механизмах накопления, энерговыделения и ускорения, необходимо решать задачи о распространении ускоренных частиц в плазме вспышечных магнитных петель с привлечением данных наблюдений электромагнитного излучения.

Наиболее часто обсуждаются модели энерговыделения в основе которых лежат процессы магнитного пересоединения [27, 31, 32]. Развиваются и альтернативные модели, например, основанные на баллонной неустойчивости [30] или представлении магнитной петли в виде электрической цепи [35]. Ускорение частиц может происходить на квазистационарных электрических полях, фронтах ударных волн и плазменной турбулентности [36].

Для объяснения наблюдательных данных активно развиваются аналитические и численные методы. В основном, развиваются подходы на основе решения уравнений магнитной гидродинамики и уравнений физической кинетики [1, 8, 15, 22, 23, 28]. Ускорение заряженных частиц, их распространение в плазме вспышечной петли и гидродинамический отклик (нагрев и испарение) рассматриваются, как правило, отдельно ввиду сложности каждого из этих процессов. Только в последнее время появились единичные работы, объединяющие эти процессы [2, 19]. Помимо сложности объединения кинетических и динамических процессов, множество неопределенностей вызывает диагностика параметров среды, таких как распределение магнитного поля в короне и хромосфере, распределение концентрации плазмы вдоль петли, степень ионизации плазмы в хромосфере и ее зависимость от высоты.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов определения параметров ускоренных электронов и тепловой плазмы во вспышечных магнитных петлях по результатам наблюдений в микроволновом и жестком рентгеновском излучении. Особое внимание уделяется определению характеристик ускоренных электронов в момент их инжекции в магнитную петлю: энергетический спектр, питч-угловое распределение, временные и пространственные характеристики. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены задачи, которые можно подразделить на:

#### ***методические***

1. Разработка метода численного интегрирования одномерного нестационарного многопараметрического релятивистского кинетического уравнения Фоккера-Планка для моделирования процессов переноса ускоренных электронов в плазме вспышечной петли.
2. Разработка методов расчета потока жесткого рентгеновского излучения и степени его поляризации во вспышечной магнитной петле с учетом положения на диске Солнца.

#### ***модельные***

1. Расчет эволюции (пространственной и временной) функции распределения ускоренных электронов для модельно задаваемых распределений:

- стационарного магнитного поля, распределения концентрации плазмы в хромосфере, полученного на основе наблюдений в жестком рентгеновском диапазоне RHESSI;
  - параметров пучка: энергетического спектра, питч-углового распределения, локализации инжекции в петле.
2. Анализ влияния эффектов магнитного отражения электронов, обратного тока, ионно-звуковой турбулентности, магнитных флуктуаций на распределение яркости жесткого рентгеновского излучения вдоль петли в различные фазы вспышки.

#### ***для реальных солнечных вспышек***

1. Отбор солнечных вспышечных событий, зарегистрированных на приборах RHESSI, радиогелиографе Нобейма, SDO, SOHO для последующего моделирования.
2. Проведение сравнительного анализа наблюдательных данных с целью определения начальных и граничных условий для задачи численного моделирования распространения ускоренных электронов в отобранных событиях.
3. Определение угловых, энергетических, пространственных, временных характеристик, инжектируемых в магнитные петли ускоренных электронов в событиях, отобранных на предыдущем этапе, с целью ограничения параметров моделей ускорения заряженных частиц.
4. Определение спектра временных задержек жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек.
5. Определение степени линейной поляризации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек.

#### **Научная новизна**

- Создан алгоритм расчета эволюции функции распределения ускоренных электронов с учетом дополнительных к кулоновскому процессов рассеяния на магнитных неоднородностях и ионно – звуковой турбулентности.
- Впервые с учётом данных процессов рассчитаны распределение яркости жесткого рентгеновского излучения, степени его поляризации и потока микроволнового радиоизлучения вдоль вспышечной петли с учетом положения на диске Солнца.
- Впервые исследовано влияние ионно-звуковой турбулентности и магнитных флуктуаций на энергетическое, питч-угловое и пространственное распределение ускоренных электронов в магнитной петле с учетом парных столкновений, магнитного отражения электронов, индукционного электрического поля.
- Разработанная методика впервые применена к реальным солнечным вспышкам, в результате чего для нескольких событий дано объяснение пространственных, спектральных характеристик рентгеновского и радиоизлучения, определены оптимальные параметры плазмы вспышечной магнитной петли и пучка ускоренных электронов.

- Впервые изучено влияние ионно-звуковой турбулентности, магнитных флуктуаций и эффектов, связанных с распространением электронов, на спектры временных задержек и степень линейной поляризации в жестком рентгеновском диапазоне из локальных источников.

### **Научная и практическая значимость**

*Научная значимость определяется*

- Созданием алгоритма расчета пространственно-временной эволюции пучков ускоренных электронов в неоднородной плазме магнитных петель в активных областях атмосферы Солнца и звезд. Кинетика распространения ускоренных электронов определяется функцией инжекции электронов, столкновительными процессами в кулоновском поле и индуцированном поле обратного тока, рассеянием на флуктуациях магнитного поля и турбулентных модах, таких как ионно-звуковая. Учитываются процессы магнитного отражения в неоднородном магнитном поле.
- Возможностью проведения диагностики вспышечной плазмы - определения концентрации тепловой плазмы и ее изменения вдоль магнитной петли, определения основных характеристик ускоренных электронов в момент инжекции в замкнутую магнитную структуру: спектра, пространственного и углового распределений *in situ*.
- Возможностью ограничения параметров моделей ускорения электронов (распределения по энергии и питч - углам) по данным регистрации электромагнитного излучения наземными и космическими средствами для конкретных солнечных событий и рассматриваемой кинетической модели системы плазма - пучок.

*Практическая значимость*

Ввиду распространенности процессов ускорения заряженных частиц в космосе (звездные вспышки, магнитосферы планет, космические лучи, атмосферы нейтронных звезд, радио джеты), разработанный пакет программ по расчету функции распределения ускоренных электронов с учетом различных мод турбулентности, вычислению тормозного жесткого рентгеновского излучения с учетом ориентации магнитных структур относительно наблюдателя, может быть применён для решения широкого круга астрофизических задач. Например, для моделирования переноса ускоренных протонов в солнечных и звездных вспышках, моделирования распространения заряженных частиц в межпланетной среде.

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

1. Разработка алгоритма диагностики питч-углового, энергетического и пространственного распределений ускоренных электронов, инжектируемых во вспышечную магнитную петлю. Метод основан на решении релятивистского нестационарного кинетического уравнения для ускоренных электронов, в котором учитываются процессы переноса электронов в неоднородном магнитном поле и коронально-хромосферной плазме вспышечных петель, рассеяние на ионах плазмы, ионно-звуковой

турбулентности и магнитных флуктуациях, а также магнитное отражение и эффекты обратного тока.

2. Результаты расчета характеристик жесткого рентгеновского и микроволнового излучений для различных моделей системы пучок ускоренных электронов - плазма вспышечной петли.
3. Результаты обработки данных, полученных в наблюдениях на спутниках RHESSI, SOHO, SDO и радиоастрономической обсерватории Nobeyama. Анализ пространственных и энергетических характеристик электромагнитного излучения вспышечных областей на диске Солнца, определение геометрии и величины магнитного поля в области вспышки.
4. Результаты расчета характеристик жесткого рентгеновского и микроволнового излучений для вспышечных событий 10 ноября 2002г, 03:06UT и 23 сентября 2014г, 23:11UT для различных моделей источника ускоренных электронов и вспышечной плазмы. Определение параметров источника ускоренных электронов и плазмы для вспышечных событий 10 ноября 2002г, 03:06UT и 23 сентября 2014г, 23:11UT.
5. Результаты анализа энергетических спектров временных задержек для различных моделей источника ускоренных электронов и вспышечной плазмы. Обоснование трех типов спектров энергетических задержек.

### **Достоверность полученных результатов**

Алгоритм и разностные методы численного счета проверены путем сравнения численных результатов при решении упрощенного по числу операторов уравнения Фоккера - Планка с аналогичными частными аналитическими решениями. Достоверность полученных результатов подтверждена признанием полученных результатов при их обсуждении на Всероссийских и международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

### **Личный вклад автора**

Постановка задач и интерпретация результатов производились совместно с соавторами. Обработка наблюдательных данных, разработка пакета программ по расчету кинетики электронов и жесткого рентгеновского излучения проводились автором самостоятельно.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих Всероссийских и международных конференциях:

Российская молодежная конференция по физике и астрономии «ФизикА.СПб» (Санкт-Петербург 2013); конференция "Физика плазмы в солнечной системе" (ИКИ РАН, Москва 2014-2020); всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика» (ГАО РАН, Санкт-Петербург 2014-2020); RadioSun WorkShop on Solar Flares and Energetic Particles, Saint-Petersburg, Russia, 2014; The 5th RadioSun Workshop and Summer School, České Budějovice, Czech Republic, 2016; а также на научных семинарах ФТИ им.

А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), Ondrejov observatory (Чехия), ГАО РАН (Санкт-Петербург).

Практической апробацией работы является успешное выполнение проектов: ФЦП «Кадры» 1.5 №8524; Программа РАН №9, 22, 28; РФФИ №14-02-00924 «Радио и рентгеновская диагностика ускоренных электронов в солнечных вспышках»; Международного проекта RadioSun FP7-PEOPLE-2011-IRSES-295272- Marie Curie Action "International Research Staff Exchange Scheme"; РФФИ №17-12-01378 «Транзиентные события солнечного, галактического и внегалактического происхождения в жестком рентгеновском и гамма-диапазоне: наблюдения и моделирование»; РФФИ мол\_а № 18-32-00405 «Разработка модели инжекции и распространения ускоренных электронов в солнечных вспышках»

### **Публикации по теме диссертации**

Автор имеет 34 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 15 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК, и 19 работ в материалах Всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 229 страниц, включая 103 рисунка и 8 таблиц. Список литературы содержит 185 библиографических наименований.

### **Краткое содержание диссертационной работы**

Во **Введении** обсуждается новизна, научная и практическая значимость, актуальность и цель данной работы, приведены результаты, выносимые на защиту, кратко изложено содержание работы и личный вклад автора.

Материал **Главы 1** изложен в работах [A1-3, A5, A9, A13, A15]. В главе 1 обоснован кинетический подход при решении задачи эволюции системы вспышечная плазма - пучок ускоренных электронов. Детально обсуждаются процессы взаимодействия электронов с частицами вспышечной плазмы. Взаимодействие электронов с полями турбулентных мод рассматривается отдельно в Главе 2. Особое внимание уделено анализу моделей пучка и плазмы при которых становится возможным наблюдение жестких рентгеновских источников в **вершине магнитной вспышечной петли в активных областях на Солнце**. В диссертации рассматривается магнитная структура, которую мы будем соотносить со вспышечной петлей. Здесь и далее под вспышечной петлей понимается трубка магнитного поля, в сечении которой сохраняется магнитный поток. Площадь сечения в вершине принимается порядка  $\sim 10^{16-18} \text{см}^2$ . Длина петли порядка  $10^9-10^{10} \text{см}$ . Рассмотрено влияние на распределение жесткого рентгеновского излучения и распределение электронов *in situ* питч-угловой, энергетической, пространственной зависимости ускоренных электронов в

источнике, градиента и симметрии магнитного поля, распределения концентрации и степени ионизации фоновой плазмы. Исследовано влияние индуцированного электрического поля на характеристики жесткого рентгеновского излучения. Рассмотрены изменения в пространственно - временном распределении степени поляризации рентгеновского излучения и в спектрах временных задержек рентгеновского излучения.

В параграфе 1.1 приведен краткий обзор литературы, посвященной вопросам моделирования вспышечных магнитных петель, ускорения и переноса электронов, задания магнитного поля и профиля концентрации ионизованной плазмы в короне и хромосфере. В параграфе 1.2 сформулирована задача кинетики распространения пучка ускоренных электронов в магнитоактивной плазме вспышечных петель. Приведено нестационарное одномерное релятивистское кинетическое уравнение Фоккера-Планка для функции распределения ускоренных электронов и выражения, учитывающие потери энергии и угловое рассеяние ускоренных электронов при кулоновских соударениях с частицами плазмы вспышечной петли и в результате возникновения индуцированного электрического поля, рассеяние на магнитных неоднородностях, ионно-звуковой турбулентности, а также влияние обратного тока на питч-угловое распределение ускоренных электронов.

В параграфе 1.3 приводятся результаты расчета эволюции вдоль петли и во времени функции распределения ускоренных электронов для различных значений градиента и конфигурации (симметрии/асимметрии) магнитного поля, феноменологически заданного распределения концентрации плазмы вспышечной петли, различных энергетического и питч-углового распределений ускоренных электронов в момент их инжекции в вершину замкнутой магнитной петли. По рассчитанным распределениям электронов вычисляются распределения потока жесткого рентгеновского излучения вдоль петли в различные моменты времени в разных диапазонах энергии. Плотность потока энергии ускоренных электронов задавалась значением  $F_{el}=10^{10}$  эрг  $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , что соответствует вспышкам GOES M-класса. Особое внимание уделено моделям, в которых яркий рентгеновский источник возникает в корональной части петли. В модели **изотропного** распределения ускоренных электронов в вершине петли с симметричным магнитным полем и отношением  $V_{\max}/V_0=7$ , жестким энергетическим спектром  $\delta=3$  распределение яркости ЖР излучения локализовано в основаниях и вершине вспышечной петли. Яркость источника в вершине составляет  $\sim 15\%$  от общей яркости вдоль петли и возрастает до значений  $\sim 38\%$  при повышении концентрации плазмы в вершине от  $6.5 \cdot 10^9 \text{см}^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{10} \text{см}^{-3}$ . При этом яркость ЖР излучения в основаниях практически не меняется. Возрастание потока ЖР излучения в вершине наблюдается также и при смягчении энергетических спектров электронов в источнике - с возрастанием показателя спектра  $\delta$  от значения 3 до (5-7), поскольку поток ЖР излучения в основаниях уменьшается из-за снижения количества высокоэнергичных электронов. При уменьшении отношения  $V_{\max}/V_0$  с 7 до 2

количество захваченных электронов в вершине уменьшается, что приводит к уменьшению яркости ЖР излучения в этой части петли на  $\sim 5\%$ .

Для **квазипродольного** пичч-углового распределения электронов  $S(\alpha)=\cos^6(\alpha)$  в модели симметричной магнитной ловушки с инжекцией электронов в вершину петли, с высоким градиентом магнитного поля  $V_{\max}/V_0=7$  и высокой концентрацией плазмы в корональной части петли  $5 \cdot 10^{10} \text{см}^{-3}$  рентгеновская яркость источника ЖР излучения в вершине размывается вдоль петли вплоть до переходного слоя, то есть локализованный в вершине источник **не возникает**. Изменение параметров плазмы и магнитного поля в сторону их уменьшения также не приводит к локализации ЖР излучения в вершине петли.

Противоположная ситуация возникает при начальном **квазипоперечном** распределении ускоренных электронов  $S(\alpha)=\sin^8(\alpha)$ . Даже при низкой концентрации плазмы в вершине  $6.5 \cdot 10^9 \text{см}^{-3}$  существенная доля ускоренных электронов оказывается захваченной в ловушке из-за эффективного отражения в магнитном поле в верхней её части, что обеспечивает **яркость ЖР излучения в вершине  $\sim 94\%$  яркости всей петли**. Фактически должен наблюдаться одиночный яркий источник.

Таким образом, процессы кулоновского рассеяния и магнитного отражения в симметричном магнитном поле вспышечной петли обуславливают возникновение ЖР источников: одного в вершине и двух в основаниях **при изотропном** распределении ускоренных электронов в момент инжекции; двух источников, локализованных в основаниях петли **при квазипродольном** угловом распределении и одного одиночного источника ЖР излучения в вершине **при квазипоперечном** распределении электронов.

Магнитные поля в активных областях обычно имеют сложную пространственную конфигурацию - симметрия относительно вершины петли может отсутствовать. В модельной задаче рассматривалось асимметричное относительно вершины распределение магнитного поля. Задавалось смещение минимума магнитного поля в область петли, отстоящую от вершины на  $s=b_1= -2 \cdot 10^9 \text{см}$ . При этом, в правом основании сходимость поля задается высоким значением отношения  $V_{\max}/V_0=7$ , а в левом она существенно уменьшается до 1.6. Как показали расчеты, влияние отношения  $V_{\max}/V_0$  и концентрации плазмы в вершине нивелируется при нарушении симметрии магнитного поля.

Следует подчеркнуть, что первоначально задаваемое распределение ускоренных электронов (независимое по энергии и пичч-углу) в процессе распространения вдоль вспышечной петли видоизменяется и для разных энергий пичч-угловая зависимость электронов становится также различной.

Анализ динамики спектров излучения и ускоренных электронов представлен в **параграфе 1.4**. Современные измерения с высоким пространственным разрешением позволяют получить вид энергетических спектров ЖР излучения из локальных источников для мощных солнечных вспышек. При моделировании эволюции пучка ускоренных электронов были рассчитаны функции распределения электронов вдоль петли (параграф 1.3) после чего они были использованы при расчете энергетических спектров ЖР

излучения как из локальных источников, так и интегральных по всей петле в целом. Расчеты показали, что спектры ЖР излучения в **вершине** более **жесткие в случае изотропного источника электронов** и симметричного распределения магнитного поля. Причина этого - более эффективный захват электронов более высоких энергий в сравнении с анизотропными моделями, в которых уход электронов из области инжекции в конус потерь происходит достаточно быстро, особенно для малых значений магнитного отражения. Разница показателей ЖР спектров в среднем составляет порядка 0.7. Данный эффект слабо зависит от градиента магнитного поля, и от концентрации плазмы в вершине. Показано, что ЖР спектры в **основаниях** магнитной петли не зависят от питч-углового распределения электронов в области инжекции и от асимметрии магнитного поля в фазе роста и пика ЖР излучения. Интегральные по петле спектры ЖР излучения становятся мягче при параметрах модели, благоприятных к захвату ускоренных электронов (питч-угловая изотропия, сильный градиент магнитного поля) и при низкой концентрации плазмы в вершине.

**В параграфе 1.5** проанализированы условия, при которых становится существенным влияние индукционного электрического поля. Электродинамический отклик на процесс внедрения прямого тока ускоренных электронов - возникновение индукционного электрического поля и обратного тока плазменных электронов, что приводит к нейтральности по заряду и току системы плазма-пучок. Причем, величина индукционного поля возрастает при возрастании потока (тока) прямых электронов. Электрическое индукционное поле оказывает влияние на изменение функции распределения ускоренных электронов только при высоких значениях плотности потока энергии электронов  $F_{el} \geq 10^{11}$  эрг/см<sup>2</sup>с, то есть для мощных вспышек класса не ниже X. Для изотропного распределения электронов  $S(\alpha)=1$  и жесткого энергетического спектра  $\delta=3$  это влияние практически не существенно. Для мягких спектров при  $\delta=7$  яркость в вершине в сравнении с основаниями возрастает на 35%. В случае анизотропных источников влияние индукционного электрического поля заметно только для очень «мягких» энергетических спектров с показателем спектра электронов  $\delta \geq 5$ , т.е. при условии, когда основная часть энергии вспышки приходится на низкоэнергичную область спектра. Наибольшие изменения во временных зависимостях спектров излучения при увеличении потока энергии в источнике выявлены в моделях с более мягкими показателями  $\delta=5,7$  спектра электронов в источнике и составили в среднем  $\sim 0.3$  единицы. Причем спектр становится более жестким во всех частях магнитной петли.

**В параграфе 1.6** рассмотрено влияние частичной ионизации плазмы в рамках решения кинетического уравнения в форме Фоккера-Планка для электронов. Очевидно, что в корональной части вспышечной петли степень ионизации близка к 1. Эффект частичной ионизации может проявить себя в переходной зоне корона-хромосфера. В результате численного анализа установлено, что уменьшение степени ионизации плазмы в хромосфере приводит к смещению максимума излучения в более глубокие слои солнечной атмосферы и к усилению излучения в диапазоне энергий 29-135 кэВ в

основаниях в 1.6-2 раза в зависимости от профиля концентрации. Вывод справедлив для изотропных и анизотропных источников ускоренных электронов энергетические спектры которых степенные с показателем  $\delta < 5$  и при малых значениях  $V_{\max}/V_0$ . В случае мягкого спектра ( $\delta \geq 5$ ) и высоких значений  $V_{\max}/V_0 > 5$  увеличение интенсивности излучения в основаниях петли не превышает 30-50% для изотропных и анизотропных источников. Причем эффект более выражен в диапазоне высоких энергий 75-134кэВ. Профиль степени ионизации в хромосфере (зависимость от высоты) не оказывает существенного влияния на эволюцию показателя спектра рентгеновского излучения во времени, в отличие от профиля концентрации плазмы. Профиль концентрации оказывает существенное влияние на интегральные по петле временные задержки ЖР излучения во всех случаях, кроме моделей свободного пролета высокоэнергичных электронов – анизотропных с малым отношением  $V_{\max}/V_0$  и  $\delta < 5$ .

В **параграфе 1.7** представлен расчет линейной степени поляризации жесткого рентгеновского излучения, которая в изотропных моделях в вершине петли может достигать значений 16-26% в диапазоне энергий 29-135кэВ и минус 26-35% в случае анизотропного источника электронов. Увеличение концентрации плазмы в короне или отношения  $V_{\max}/V_0$ , эффекты обратного тока уменьшают степень поляризации на 5-12%. Отметим, что высокие отрицательные значения поляризации, как правило, соответствуют областям с малой интенсивностью излучения, что делает невозможным ее детектирование, кроме случая залимбовых событий. Асимметричность магнитной петли или источника электронов приводит к появлению области со сменой знака поляризации. Величина степени поляризации слабо чувствительна к энергетическому спектру электронов.

**Параграф 1.8** посвящен анализу модельных спектров временных задержек жесткого рентгеновского излучения. В параграфе выделяется зависимость формы спектров (спадающий, растущий, U- или П-образные) от параметров магнитной петли и инжектора электронов. Выявлены закономерности, которые позволяют проводить независимую диагностику плазмы при моделировании вспышечного события, причем установлено, что форма спектра задержек зависит от профиля концентрации плазмы в хромосфере и вершине петли, что позволяет косвенно подтвердить эффект Ньюперта в фазе роста и пика энергосвечения. В **параграфе 1.9** кратко обсуждено влияние длительности инъекции на пространственные и временные характеристики жесткого рентгеновского излучения. Установлено, что основные изменения происходят в интегральных спектрах временных задержек за исключением моделей параметры которых располагают к захвату электронов, либо с высокой концентрацией плазмы в вершине, либо в присутствии стационарной турбулентности.

В **Главе 2**, основанной на работах [A4, A6, A11], подробно рассмотрены механизмы дополнительного рассеяния электронов, которые могут присутствовать во вспышечной петле – магнитные флуктуации и ионно-

звуковая турбулентность. Привлечение к анализу различных мод турбулентности связано с тем, что многие проявления вспышечных событий, такие как поперечная по отношению к силовым линиям магнитного поля диффузия электронов [6], длительное остывание пост-вспышечных петель [5], жесткие рентгеновские источники (12-150кэВ) в вершине магнитных петель [17, 33] не находят объяснения в рамках существующих моделей распространения электронов. Дополнительные рассеивающие механизмы в петле существенно меняют времена удержания заряженных частиц в магнитной ловушке, что непосредственно влияет на энергетический спектр, локализацию, временные задержки рентгеновского и гамма-излучения ионов и электронов [4]. Роль магнитных флуктуаций рассмотрена в **параграфе 2.2**. Особенностью данного механизма является увеличение коэффициента диффузии с ростом энергии электрона до некоторого предела, зависящего от характерной продольной длины корреляции магнитных флуктуаций. В результате возникает сложный отклик рентгеновского и радио излучений на инъекцию ускоренных электронов в магнитную петлю. Например, рассеяние электронов в изотропных моделях с симметричным распределением магнитного поля приводит к усилению рентгеновского излучения в основаниях в 2-2.5 раза и ослаблению яркости вершины. Эффекты усиления источника в вершине в анизотропных моделях возможно наблюдать в радио диапазоне, так как в рентгеновском диапазоне основания магнитной петли по-прежнему сохраняют доминантное положение. Интересным с наблюдательной точки зрения оказалось, что асимметрия магнитного поля нивелирует вышеперечисленные эффекты от присутствия магнитных флуктуаций. Ионно-звуковая турбулентность, рассмотренная в **параграфе 2.3**, напротив, оказывается достаточно эффективной чтобы препятствовать уходу частиц в конус потерь при асимметричном магнитном поле и формирует яркий рентгеновский источник в вершине в диапазоне энергий 28-135кэВ даже при достаточно умеренном уровне ионно-звуковой турбулентности  $W^s/nk_B T_e = 5 \cdot 10^{-5}$ . Необходимо отметить различие областей локализации высокоэнергичных электронов при рассмотренных модах турбулентности и изотропном источнике электронов. В случае магнитных флуктуаций область локализации ускоренных электронов располагается ближе к верхней хромосфере. Примечательно, что в присутствии ионного звука в анизотропном случае (а также при асимметричном магнитном поле) спектр излучения в вершине петли становится более жестким на  $\sim 0.6$ . Влияние магнитных флуктуаций и ионного звука на степень поляризации представлено в **параграфе 2.4**. В случае магнитных флуктуаций уменьшение степени поляризации зависит от многих факторов, и составляет приблизительно 6-15%, причем заметнее для анизотропных распределений электронов в источнике. В случае ионно-звуковой турбулентности происходит практически полная изотропизация электронов и, как следствие, падение степени поляризации до значений вблизи нуля по всей петле. Влияние ионно-звуковой турбулентности и магнитных флуктуаций на спектры временных задержек рассматривается в **параграфе 2.5**. При асимметричном и симметричном магнитном поле

тенденция к появлению растущих спектров задержек тем выше, чем больше факторов, предрасполагающих к захвату частиц, коими являются магнитные флуктуации и ионно-звуковая турбулентность. При этом, если существенны другие факторы, усиливающие излучение из вершины – высокая концентрация плазмы в вершине или сильный градиент магнитного поля, то выделить влияние турбулентности становится сложно. Примечательно, что в случае жесткого энергетического спектра электронов  $\delta=3$  при магнитных флуктуациях,  $n_0^{LT} < 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $B_{\text{max}}/B_0=2$ , изотропного источника электронов  $S(\alpha)=1$  в спектрах задержек, несмотря на наличие дополнительного рассеяния, появляются спадающие части, либо весь спектр становится спадающим. В анизотропном случае растущие области могут появляться в высокоэнергичной области с сохранением спадающих спектров до 75 кэВ. В **параграфе 2.6** показано, что на основе численных расчетов простых моделей распространения ускоренных электронов в магнитных петлях можно указать какие условия реализуются во вспышке при ограниченном наблюдательном материале.

**В главе 3**, основанной на работах [A7, A8, A10, A12, A14], разработанный в первых двух главах метод анализа излучения вспышечной петли применен при исследовании событий SOL2002-11-10T03:06 и SOL2014-09-23T23:11. В **параграфе 3.1.1** представлены результаты анализа события 10 ноября 2002г по данным MDI/SOHO, RHESSI, Nobeyama Radioheliograph. GOES класс M2.6. Спектр рентгеновского излучения простирается до энергий выше 100 кэВ, имеются четкие изображения рентгеновских и радиоисточников. Локализация вспышки на диске Солнца позволяет восстановить магнитное поле по данным MDI/SOHO. Определены временные, спектральные и пространственные характеристики жесткого рентгеновского (в диапазоне 3-130 кэВ) и радио (17, 34 ГГц) излучений. Распределение магнитного поля в окрестности локальных источников восстановлено в бессиловом приближении по данным магнитограммы MDI/SOHO [11, 25]. Наблюдаются два источника жесткого рентгеновского излучения – южный и северный на энергиях 28-58 кэВ и 70-130 кэВ, а также источник мягкого рентгеновского излучения 6-12 кэВ – между северным и южным источниками. Впоследствии данные источники были ассоциированы с двумя основаниями магнитной петли и вершиной. Гиротронное излучение на частотах 17 и 34 ГГц совпадают с областью чуть выше южного основания. В результате моделирования распространения ускоренных электронов, подбора параметров источника ускоренных электронов и распределения концентрации плазмы вдоль петли, были согласованы значения потоков излучения из источников, отношение яркостей источников, наклон спектра, их пространственное положение. Таким образом, разработанная методика позволила наложить ограничения на эволюцию функции источника ускоренных электронов – на энергетический спектр, пич-угловое и пространственное распределения электронов, а также на временную эволюцию концентрации фоновой плазмы и высокоэнергичного пучка. Источник электронов в данном событии располагается в вершине петли. Оценка длины вспышечной петли  $L \sim 5.5 \times 10^9 \text{ см}$ . Величина индукции магнитного поля в

вершине петли составляет 66 Гс, в южном основании – 400 Гс и 1000 Гс в северном основании. Концентрация фоновой плазмы в вершине петли составляет  $\sim 10^9 \text{см}^{-3}$  в начальной фазе вспышки и увеличивается до значений  $\sim 10^{10} \text{см}^{-3}$  в фазе максимума и спада в результате эффекта испарения. Питч-угловая анизотропия электронов определяется анизотропной функцией инжекции  $S(\alpha) = \cos^8(\alpha)$ , энергетический спектр состоит из двух популяций электронов, низкоэнергичная часть спектра до энергии излома  $\sim 350$  кэВ характеризуется степенным законом с показателем  $\delta_1 = 2.7-2.9$ , выше  $\sim 420$  кэВ энергетический спектр более жесткий  $\delta_2 = 2-2.3$ . В параграфе 3.2 представлены результаты моделирования распространения ускоренных электронов сразу в нескольких характерных магнитных структурах вспышечной аркады события SOL2014-09-23T23:11. Вспышка выбрана исходя из следующих критериев: достаточно мощная – GOES класс M2.5, наличие нескольких локальных источников ЖР излучения, расположение активной области вдали от лимба Солнца (чтобы была возможность производить экстраполяцию магнитного поля), а также наличие данных космического аппарата RHESSI на энергиях  $> 30 \text{keV}$  и радиогелиографа Nobeyama. Магнитная структура представляет собой систему петель аркады и поперечного к ним магнитного жгута. Одной из важных особенностей данного события является динамика жесткого рентгеновского излучения: локальные источники (данные RHESSI) наблюдаются в разные моменты времени, максимумы интенсивности которых приходятся на разные фазы вспышки. Для каждого локального источника ЖР излучения эвристически подобраны функции инжекции ускоренных электронов, зависящие от координаты вдоль магнитной петли, питч-угла и энергии, которые позволили согласовать данные наблюдений с результатами моделирования таким образом, чтобы рассчитанные параметры излучения соответствовали наблюдаемым распределениям яркости жесткого рентгеновского излучения в диапазоне 28–135 кэВ и гиротронного излучения 17, 35 ГГц. Энергетический спектр пучка электронов при этом соответствовал одно и двух степенным функциям с показателями спектра в диапазонах  $\delta_1 \approx 4-5$ ,  $\delta_2 \approx 2.0-2.4$ , и энергией излома спектра  $E_{br} \approx 240-320$  кэВ, в зависимости от конкретной магнитной структуры. Питч-угловое распределение ускоренных электронов представляет собой анизотропный поток электронов с углом раствора  $\sim 80^\circ$  из вершин магнитных петель в направлении основания с доминирующим жестким рентгеновским источником.

В **Заключении** приведены основные выводы диссертации. Обсуждаются актуальные проблемы, решение которых необходимо для понимания процессов, происходящих в активных областях Солнца.

## **Основные результаты работы**

К основным результатам, полученным в диссертации можно отнести следующие:

1. Разработан алгоритм диагностики питч-углового, энергетического и пространственного распределений ускоренных электронов, инжектируемых во

вспышечную магнитную петлю. Метод основан на решении релятивистского нестационарного кинетического уравнения для ускоренных электронов, в котором учитываются процессы переноса электронов в неоднородном магнитном поле и коронально-хромосферной плазме вспышечных петель, рассеяние на ионах плазмы, ионно-звуковой турбулентности и магнитных флуктуациях, а также магнитное отражение и эффекты обратного тока.

2. На модельных данных, не противоречащих наблюдениям, произведен расчет влияния на поток, спектр, временные задержки и степень линейной поляризации ЖР излучения частичной ионизации плазмы в хромосфере, обратного тока, ионно-звуковой турбулентности, магнитных флуктуаций, параметров источника ускоренных электронов и магнитного поля. Получены обширные сведения об изменениях в локализации источников вдоль вспышечной магнитной петли, спектрах, временной эволюции ЖР излучения в зависимости от указанных параметров.

3. Проведена диагностика пучка ускоренных электронов, магнитного поля и плазмы во вспышечных событиях 10 ноября 2002г, 03:06UT и 23 сентября 2014г, 23:11UT. В результате найдены параметры пичч-углового, энергетического распределений ускоренных электронов в момент их инжекции в вершины магнитных петель, а также параметры плазмы и магнитного поля, что позволило объяснить наблюдаемые в данных событиях, пространственные и спектральные характеристики рентгеновского и радиоизлучения.

### **Публикации по теме диссертации**

#### *Рецензируемые журналы:*

1. Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н., Кудрявцев И.В. Жесткое рентгеновское излучение ускоренных электронов в петельной структуре магнитного поля во время солнечных вспышек // Научно-Технические ведомости Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета. - 2013. - Vol. 4–1, № 182. - С. 154–165.
2. Charikov Y.E., Aptekar R.L., Golenetsky S. V., Kudryavtsev I. V., Kuznetsov S.A., Melnikov V.F., Pal'shin V.D. [и др.]. Analysis of hard X- and gamma-rays and microwave emissions during the flare of July 18, 2002 // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2014. - Vol. 54, № 8. - P. 1058–1066.
3. Charikov Y.E., Globina V.I., Shabalin A.N., Elfimova E.P. Simulation of hard X-ray time delays in solar flares // *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. - 2015. - Vol. 1. - P. 199–206.
4. Charikov Y.E., Shabalin A.N. Influence of magnetic turbulence on the propagation of accelerated electrons and hard X-ray brightness distribution in solar flares // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2015. - Vol. 55, № 8. - P. 1104–1111.
5. Charikov Y.E., Globina V.I., Shabalin A.N., Elfimova E.P. Localization of electron acceleration in solar flares based on the spectrum analysis of hard X-ray time delays // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2015. - Vol. 55, № 7. - P. 1000–1007.

6. Charikov Y.E., Shabalin A.N. Hard X-ray generation in the turbulent plasma of solar flares // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2016. - Vol. 56, № 8. - P. 1068–1074.
7. Charikov Y.E., Shabalin A.N., Kuznetsov S.A. Modeling of Physical Processes by Analysis of Hard X-Ray and Microwave Radiations in the Solar Flare of November 10, 2002 // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2017. - Vol. 57, № 8. - P. 1009–1017.
8. Ovchinnikova E.P., Charikov Y.E., Shabalin A.N., Vasilyev G.I. The contribution of the albedo for photons to the intensity of hard X-ray emission of solar flares // *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. - 2017. - Vol. 3, № 3. - P. 284–291.
9. Charikov Y.E., Shabalin A.N., Ovchinnikova E.P., Lysenko A.L., Kuznetsov S.A. Energy Spectra and Time Delays of Hard X-Rays of Solar Flares in Konus-Wind and RHESSI Experiments // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2018. - Vol. 58, № 8. - P. 1050–1056.
10. Ovchinnikova E.P., Charikov Y.E., Shabalin A.N., Vasilyev G.I. Compton Scattering of the Hard X-Ray Flux of Solar Flares with Various Angular Anisotropies of Hard X-Ray Sources // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2018. - Vol. 58, № 7. - P. 1008–1013.
11. Charikov Y.E., Shabalin A.N., Ovchinnikova E.P. Time evolution of the Energy Spectra of Accelerated Electrons and Hard X-Rays from Local Sources of Solar Flares // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2018. - Vol. 58, № 7. - P. 1001–1007.
12. Shabalin A.N., Ovchinnikova E.P., Globina V.I., Charikov Y.E. Accelerated Electron Propagation Model for the Flare Arcade of the September 23, 2014, Event from RHESSI, SDO, and Nobeyama Radioheliograph Observations // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2019. - Vol. 59, № 8. - P. 1128–1138.
13. Globina V.I., Shabalin A.N., Ovchinnikova E.P., Charikov Y.E. Quasi-Periodic Hard X-Ray Pulsations in Solar Flares Based on RHESSI and Konus-Wind Data // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2019. - Vol. 59, № 7. - P. 890–897.
14. Ovchinnikova E.P., Charikov Y.E., Shabalin A.N. X-ray of the 2017 September 10 Solar Flare // 2019, *J.Phys.:Conference Series*, 1400, 022028
15. Charikov Y.E., Shabalin A.N., Ovchinnikova E.P. Simulation of Accelerated Electron Beam with a Fine Time Structure in Flare Loop Plasma // *Geomagnetism and Aeronomy*. - 2019. - Vol. 59, № 7. - P. 870–877.

*Сборники трудов конференций:*

1. Чариков Ю.Е., Глобина В.И., Шабалин А.Н., Елфимова Е. Пространственная локализация процесса ускорения электронов в магнитных петлях на основе анализа спектров временных задержек жесткого рентгеновского излучения в солнечных вспышках // Сборник трудов XVIII всероссийской ежегодной конференции с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика 2014», ГАО РАН
2. Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е. Моделирование процессов распространения ускоренных электронов в солнечных вспышках // Труды XVIII

- всероссийской ежегодной конференции с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика 2014», ГАО РАН
3. Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е. Влияние флуктуаций магнитного поля вспышечной петли на энергетический спектр и пространственное распределение жесткого рентгеновского излучения // Сборник трудов XIX Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика - 2015», ГАО РАН
  4. Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е. Моделирование физических процессов на основе анализа жесткого рентгеновского и микроволнового излучений в солнечной вспышке 10 ноября 2002г // Сборник трудов XX Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика - 2016», ГАО РАН
  5. Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е. Жесткое рентгеновское излучение ускоренных электронов в частично ионизованной плазме солнечных вспышек // Сборник трудов XXI Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика - 2017», ГАО РАН
  6. Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н., Овчинникова Е.П., Лысенко А.Л., Ватагин П.В., Кузнецов С.А. Энергетические спектры и временные задержки жесткого рентгеновского излучения вспышек, зарегистрированных в эксперименте КОНУС – ВИНД, RHESSI // Сборник трудов XXI Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика - 2017», ГАО РАН
  7. Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е. Жесткое рентгеновское излучение ускоренных электронов в частично ионизованной плазме солнечных вспышек // Сборник трудов XXI Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика - 2017», ГАО РАН, с.377-380, 2017
  8. Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н., Овчинникова Е.П., Лысенко А.Л., Ватагин П.В., Кузнецов С.А. Энергетические спектры и временные задержки жесткого рентгеновского излучения вспышек, зарегистрированных в эксперименте КОНУС – ВИНД, RHESSI // Сборник трудов XXI Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика - 2017», ГАО РАН
  9. Чариков Ю.Е., Овчинникова Е.П., Шабалин А.Н. Динамика энергетических спектров ускоренных электронов и жесткого рентгеновского излучения локальных источников солнечных вспышек // Сборник трудов XXI Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика - 2017», ГАО РАН, с.369-372, 2017
  10. Овчинникова Е.П., Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н., Васильев Г.И. Влияние комптоновского рассеяния на поток жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек // Сборник трудов XXI Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика - 2017», ГАО РАН
  11. Овчинникова Е.П., Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е., Опарин И.Д. Определение параметров вспышечной плазмы и пучка ускоренных электронов в

- солнечной вспышке 10 сентября 2017 г. по данным RHESSI, SDO // Труды XXII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2018» (8 – 12 октября 2018 года, ГАО РАН, Санкт-Петербург), Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2018, С. 319-322. DOI: 10.31725/0552-5829-2018-319-322
12. Овчинникова Е.П., Шабалин А.Н., Глобина В.И., Чариков Ю.Е. Анализ пространственной структуры, спектра жесткого рентгеновского излучения, временных задержек в событии 23 сентября 2014 г по данным наблюдений RHESSI, SDO, Nobeyama Radioheliograph // Труды XXII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2018» (8 – 12 октября 2018 года, ГАО РАН, Санкт-Петербург), Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2018, С. 315-318. DOI: 10.31725/0552-5829-2018-315-318
  13. Глобина В.И., Шабалин А.Н., Овчинникова Е.П., Чариков Ю.Е. Квазипериодические пульсации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек по данным RHESSI, Konus-Wind // Труды XXII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2018» (8 – 12 октября 2018 года, ГАО РАН, Санкт-Петербург), Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2018, С. 107-110. DOI: 10.31725/0552-5829-2018-107-110
  14. Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е., Овчинникова Е.П. Моделирование процессов распространения пучков электронов с тонкой временной структурой в плазме вспышечной петли // Труды XXII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2018» (8 – 12 октября 2018 года, ГАО РАН, Санкт-Петербург), Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2018, С. 405-408. DOI: 10.31725/0552-5829-2018-405-408
  15. Шабалин А.Н., Овчинникова Е.П., Глобина В.И., Чариков Ю.Е., Кузнецов С.А. Модель распространения ускоренных электронов для вспышечной аркады события 23 сентября 2014 г. с учетом данных наблюдений RHESSI, SDO, Nobeyama Radioheliograph // Труды XXII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2018» (8 – 12 октября 2018 года, ГАО РАН, Санкт-Петербург), Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2018, С. 409-412. DOI: 10.31725/0552-5829-2018-409-412
  16. Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н. Кинетика пучка ускоренных электронов с учетом гидродинамического отклика вспышечной плазмы // Труды XXIII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2019» (7 – 11 октября 2019 года, ГАО РАН, Санкт-Петербург), Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2019, С. 435-438. DOI: 10.31725/0552-5829-2019-435-438
  17. Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е. Субсекундные спайки рентгеновского излучения в солнечных вспышках: кинематика ускорения и распространения ускоренных электронов // Труды XXIII Всероссийской ежегодной

- конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2019» (7 – 11 октября 2019 года, ГАО РАН, Санкт-Петербург), Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2019, С. 443-446. DOI: 10.31725/0552-5829-2019-443-446
18. Шабалин А.Н., Глобина В.И., Чариков Ю.Е., Овчинникова Е.П. Моделирование квазипериодических вариаций жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек в системе плазма – пучок ускоренных электронов // Труды XXIII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2019» (7 – 11 октября 2019 года, ГАО РАН, Санкт-Петербург), Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2019, С. 439-442. DOI: 10.31725/0552-5829-2019-439-442
19. Опарин И.Д., Чариков Ю.Е., Овчинникова Е.П., Шабалин А.Н. Влияние электрон – электронного тормозного излучения на поток и энергетический спектр жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек // Труды XXIII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2019» (7 – 11 октября 2019 года, ГАО РАН, Санкт-Петербург), Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2019, С. 313-316. DOI: 10.31725/0552-5829-2019-313-316

### Цитируемая литература

1. Горбиков С.П., Мельников В.Ф. Численное решение уравнения Фоккера-Планка в задачах моделирования распределения частиц в солнечных магнитных ловушках // Математическое моделирование. – 2007. – Т. 19. № 2. – С. 112–122.
2. Allred J.C., Kowalski A.F., Carlsson M. A unified computational model for solar and stellar flares // *Astrophys. J.* – 2015. – Vol. 809. № 1. – P. 104.
3. Aptekar R.L. и др. Konus-W gamma-ray burst experiment for the GGS Wind spacecraft // *Space Sci. Rev.* – 1995. – Vol. 71. – P. 265–272.
4. Bessipov P.A., Zaitsev V. V., Stepanov A. V. Consequences of strong pitch-angle diffusion of particles in solar flares // *Astrophys. J.* – 1991. – Vol. 374. – P. 369.
5. Bian N.H. и др. Anomalous cooling of coronal loops with turbulent suppression of thermal conduction // *Astrophys. J.* – 2016. – Vol. 833. № 1. – P. 76.
6. Bian N.H., Kontar E.P., MacKinnon A.L. Turbulent cross-field transport of non-thermal electrons in coronal loops: theory and observations // *Astron. Astrophys.* – 2011. – Vol. 535. – P. A18.
7. Bogachev S.A. и др. The Motions of the Hard X - Ray Sources in Solar Flares: Images and Statistics // *Astrophys. J.* 2005. – Vol. 630. № 1. – P. 561–572.
8. Bogachev S.A., Somov V. V. Comparison of the Fermi and betatron acceleration efficiencies in collapsing magnetic traps // *Astron. Lett.* 2005. – Vol. 31. № 8. – P. 537–545.
9. Favata F., Micela G. Stellar coronal astronomy // *Space Sci. Rev.* 2003. – Vol. 108. № 4. – P. 577–708.

10. Fishman G.J. и др. The BATSE experiment on the Compton Gamma Ray Observatory: Status and some early results // *The Compton Observatory Science Workshop*, 1992. – P. 26–34.
11. Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. Fast Gyrosynchrotron Codes // *Astrophys. J.* 2010. – Vol. 721. – P. 1127–1141.
12. Fletcher L. и др. An Observational Overview of Solar Flares // *Space Sci. Rev.* 2011. – Vol. 159. – P. 19–106.
13. Fletcher L., Hudson H.S. Spectral and Spatial Variations of Flare Hard X-ray Footpoints // *Sol. Phys.* 2002. – Vol. 210. № 1/2. – P. 307–321.
14. Güdel M., Nazé Y. X-ray spectroscopy of stars // *Astron. Astrophys. Rev.* 2009. – Vol. 17. № 3. – P. 309–408.
15. Hamilton R.J., Lu E.T., Petrosian V. Numerical solution of the time-dependent kinetic equation for electrons in magnetized plasma // *Astrophys. J.* 1990. – Vol. 354. – P. 726–734.
16. Hudson H.S., Ryan J. High-Energy Particles in Solar Flares // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1995. – Vol. 33. № 1. – P. 239–282.
17. Jiang Y.W. и др. Evolution of the Loop-Top Source of Solar Flares--Heating and Cooling Processes // *Astrophys. J.* 2005. – Vol. 638. № 2. – P. 1140–1153.
18. Lin R.P. и др. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // *Sol. Phys.* 2002. – Vol. 210. № 1/2. – P. 3–32.
19. Liu W., Petrosian V., Mariska J.T. Combined modeling of acceleration, transport, and hydrodynamic response in solar flares. I. The numerical model // *Astrophys. J.* 2009. – Vol. 702. № 2. – P. 1553–1566.
20. Masuda S. и др. A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection // *Nature*. 1994. – Vol. 371. – P. 495–497.
21. Masuda S. и др. Hard X-Ray Sources and the Primary Energy-Release Site in Solar Flares // *Publ. Astron. Soc. Japan*. 1995. – Vol. 47. – P. 677–689.
22. McClements K.G. The effects of magnetic field geometry on the confinement of energetic electrons in solar flares // *Astron. Astrophys.* 1992. – Vol. 253. – P. 261–268.
23. Melnikov V.F., Charikov Y.E., Kudryavtsev I. V. Directivity and polarization dynamics of hard X-ray and gamma-ray emission of a flare loop // *Geomagn. Aeron.* 2015. – Vol. 55. № 7. – P. 983–990.
24. Nakajima H. и др. The Nobeyama radioheliograph // *Proc. IEEE*. 1994. – Vol. 82. № 5. – P. 705–713.
25. Nita G.M. и др. Three-dimensional radio and X-ray modeling and data analysis software: Revealing flare complexity // *Astrophys. J.* 2015. – Vol. 799. № 2. – P. 236.
26. Prato M. и др. The location of centroids in photon and electron maps of solar flares // *Astrophys. J.* 2009. – Vol. 706. № 1. – P. 917–922.
27. Priest E., Forbes T. *Magnetic Reconnection* // *Magn. Reconnect.* by Eric Priest, Terry Forbes, Cambridge, UK Cambridge Univ. Press. 2007.
28. Reep J.W. и др. Transition Region and Chromospheric Signatures of Impulsive Heating Events. II. Modeling // *Astrophys. J.* 2016. – Vol. 827. № 2. – P. 10.

29. Schou J. и др. Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Sol. Phys.* 2012. – Vol. 275. № 1–2. – P. 229–259.
30. Shibasaki K. High - Beta Disruption in the Solar Atmosphere // *Astrophys. J.* 2001. – Vol. 557. № 1. – P. 326–331.
31. Shibata K. Evidence of Magnetic Reconnection in Solar Flares and a Unified Model of Flares // *Astrophys. Space Sci.* 1999. – Vol. 264. № 1/4. – P. 129–144.
32. Somov B. V. Physical processes in solar flares. // *Astrophys. Sp. Sci. Libr.* 1992. – Vol. 172.
33. Tomczak M., Ciborski T. Footpoint versus loop-top hard X-ray emission sources in solar flares // *Astron. Astrophys.* 2007. – Vol. 461. – P. 315–323.
34. Zaitsev V. V., Kronshtadtov P. V. Coronal Loops Heating in the Atmosphere of the Ad Leo Red Dwarf // *Radiophys. Quantum Electron.* 2016. – Vol. 59. № 3. – P. 169–176.
35. Zaitsev V. V., Stepanov A. V. Towards the circuit theory of solar flares // *Sol. Phys.* 1992. – Vol. 139. № 2. – P. 343–356.
36. Zharkova V. V. и др. Recent Advances in Understanding Particle Acceleration Processes in Solar Flares // *Space Sci. Rev.* 2011. – Vol. 159. № 1–4. – P. 357–420.