

На правах рукописи

Моторина Галина Геннадьевна

**Динамика нагрева плазмы и энергетических распределений  
ускоренных электронов во время солнечных вспышек по данным  
рентгеновского и ультрафиолетового излучения**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук»

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук  
Кудрявцев Игорь Владимирович

**Официальные оппоненты:**

ОСТРЯКОВ Валерий Митрофанович

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Космические исследования» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

ЗИМОВЕЦ Иван Викторович

кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории Ускорительных процессов в космической плазме и космической погоды отдела Физики космической плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук», г. Москва

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук», п. Нижний Архыз

Защита состоится «20» октября 2017 года в 12 час. 45 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук» (ГАО РАН) по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65, корпус 1.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н.

Булига Станислава Дмитриевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Солнце — единственная звезда Солнечной системы, вокруг которой обращаются планеты и их спутники, астероиды, кометы и космическая пыль. Возникающие на Солнце активные процессы, выражающиеся в появлении солнечных пятен, факелов, протуберанцев, изменениях структуры солнечной короны, усилении солнечного ветра и др. имеют значительное влияние на атмосферу Земли. Следствиями этих изменений являются полярные сияния, геомагнитные бури, которые могут влиять на работу технических средств (помехи радиосвязи на коротких волнах, нарушение работы радионавигационных устройств, околоземных спутников и др., вплоть до отключения электричества (г. Квебек, Канада, 1989 г.)) и самочувствие людей. Данная проблема называется «космической погодой» и отмечена космическими агентствами NASA и ESA как одна из приоритетных проблем, требующих изучения. Вспышечные процессы являются наиболее мощными процессами космической погоды. Именно эти взрывные процессы определяют околоземную космическую погоду и могут оказывать заметное влияние на техносферу, биосферу и климат Земли. Поэтому исследование вспышечных процессов имеет не только большое фундаментальное, но и прикладное значение, а исследование солнечной активности является исследованием с высоким приоритетом.

Солнечные вспышки являются магнитными взрывными процессами, спонтанно происходящими в солнечной атмосфере, приводящие к эффективному ускорению частиц и нагреву плазмы. Эти явления охватывают все слои солнечной атмосферы: фотосферу, хромосферу и корону Солнца, и генерируют все виды электромагнитного излучения: от радиоволн до рентгеновских и гамма-лучей. Диагностика вспышечной плазмы, как правило, осуществляется изучением крайнего (жесткого или далекого) ультрафиолетового (КУФ) излучения, в то время как информацию о нетепловой компоненте плазмы, распределении высокоэнергичных ускоренных электронов, можно получить из данных рентгеновского излучения (РИ). В соответствии с современными представлениями, именно данный диапазон длин волн наиболее чувствителен к тепловым и нетепловым процессам, которые происходят в области первичного энерговыделения.

В настоящее время для интерпретации вспышечных явлений активно

привлекается «стандартная» (двумерная) модель солнечной вспышки (CSHKP) [11, 40, 24, 19, 34, 35, 42], хотя и существует ряд других моделей (см. обзор, напр., [8]). В частности, считается (см., напр., [34]), что выделение первичной энергии происходит в результате магнитного пересоединения, что приводит впоследствии к выбросу плазмоида и ускорению заряженных частиц в области вершины вспышечной петли. Часть ускоренных частиц, направляясь вверх, покидает солнечную корону через открытые силовые линии магнитного поля в виде солнечного ветра. Другая часть энергичных электронов, распространяясь вдоль магнитных силовых линий, высыпается в основаниях петли, обуславливая генерацию жесткого РИ и нагрев хромосферы [32]. «Испаряющаяся» горячая плазма с температурой  $(5-30) \times 10^6$  К заполняет корональную часть магнитной петли и высвечивается в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах. Таким образом, в диссертации для диагностики ускоренных электронов и вспышечной плазмы основной упор сделан на наблюдения в этих энергетических диапазонах.

Оценки показывают, что, по крайней мере, для некоторых событий описанный выше сценарий хорошо согласуется с наблюдениями [43, 36, 17]. Стоит отметить, что довольно часто пики температуры горячей корональной плазмы могут опережать пики жесткого РИ [41]. Поскольку жесткое РИ генерируется ускоренными электронами, то это свидетельствует о важной роли тепловых механизмов энерговыделения в солнечных вспышках.

В рамках «стандартной» модели появление горячей плазмы внутри вспышечных петель может происходить не только за счет "хромосферного испарения", связанного с высыпанием ускоренных электронов, но и другими способами: например, в окрестности пересоединяющегося токового слоя, расположенного в вершине магнитного каспа, а также на ударных волнах, связанных с истечением плазмы из токового слоя (см., напр., обзор [33]). Также нагрев плазмы может осуществляться за счет сокращения (*shrinkage*) магнитных трубок, вышедших из области пересоединения - Ферми и бетатронный механизмы (см., напр., [1, 38]), а также вследствие сильных электрических полей из-за неустойчивости Рэля-Тейлора [45, 39]. Все эти (и другие) эффекты содержатся в «стандартной» модели CSHKP (в ее более современных модификациях).

Область КУФ излучения соответствует фотонам с длинами волн  $<1000$  Å, отвечающий за переход от хромосферы к короне Солнца, при этом в более коротковолновой области преобладает линейчатое излучение хромосферы и

короны, хотя если говорить о вспышках, вклад в излучение свободно-связанных и связанно-связанных переходов может быть сравнимым (см., напр., [28, 29]). Тем не менее, изображения в различных линиях (*He, O, Ne, Mg, Si, Ca, Fe, Al*) (см., напр., [8]) позволяют изучать структурные особенности на разных высотах над фотосферой. Фотоны с длинами волн  $100\text{--}0.1 \text{ \AA}$  ( $0.1\text{--}100 \text{ кэВ}$ ) относят к рентгеновскому диапазону спектра, которое можно примерно разделить на мягкое РИ с энергиями примерно  $<20 \text{ кэВ}$  и жесткое РИ с энергиями  $>20 \text{ кэВ}$  (см., напр., [4]). Источником излучения в рентгеновском диапазоне обычно является плазма с температурой порядка  $\sim 10^6 \text{ К}$  и выше. Принято считать, что спектр электронов соответствует тепловому тормозному излучению горячей оптически тонкой плазмы в рамках «квазитепловой» модели. Этому излучению, обусловленному электронами, находящимися в равновесии со средой, соответствует мягкое РИ.

Жесткое РИ, генерируемое в солнечных вспышках при столкновении быстрых электронов с частицами солнечной плазмы, является нетепловым тормозным излучением высокоэнергичных электронов. По данным жесткого РИ можно получить информацию об инжектируемых электронах во вспышечном источнике, для этого, как правило, используется приближение моделями толстой и тонкой мишени [9, 5]. В последнее десятилетие были получены многочисленные результаты регистрации жесткого РИ во время вспышек на Солнце с высоким пространственным, временным и энергетическим разрешением (см. обзоры [7, 25, 22, 20]), позволяющие детально исследовать структуру жесткого РИ вспышек. Отсюда следует, что изучение наблюдений в двух смежных диапазонах электромагнитного спектра позволяет более детально исследовать структуру энергетических спектров ускоренных электронов.

Несмотря на то, что качественная картина вспышек, движимых импульсно освобождающейся энергией из корональных магнитных полей, является общепринятой, подробные процессы ускорения частиц и их распространения остаются нерешенной проблемой астрофизики и физики плазмы. Данное исследование особенно актуально в связи с ближайшими космическими миссиями ESA Solar Orbiter и NASA Solar Probe Plus, которые планируется запустить в 2018 году, а также планируемый российский КА Интергелиозонд, где основной задачей будет изучение внутренней гелиосферы.

**Целью диссертационной работы** является восстановление энергетических распределений электронов, ускоренных во время солнечных вспышек, и диагностика вспышечной плазмы на основе данных крайнего ультрафиолетового и РИ, а также оценка теплового баланса горячих вспышечных петель и интенсивности РИ из различных вспышечных областей в рамках «стандартной» модели. Предложенные методики позволяют в хорошей степени восстанавливать как спектры ускоренных электронов, так и основные параметры вспышечной плазмы, такие как температура, мера эмиссии, концентрация, энергия солнечной вспышки.

Данная работа главным образом посвящена восстановлению энергетических распределений электронов, генерирующих крайнее ультрафиолетовое и рентгеновское излучение во время солнечных вспышек, для чего необходимо решать обратную задачу. **Для этого были последовательно поставлены и решены следующие задачи:**

- 1) Восстановление энергетических распределений жесткого РИ солнечной вспышки по данным регистрации с учетом приборной функции спектрометра ИРИС на борту КА КОРОНАС-Ф;
- 2) Реконструкция энергетических распределений ускоренных электронов по восстановленным энергетическим спектрам жесткого РИ из п.(1);
- 3) Восстановление энергетических распределений электронов, излучающих КУФ и мягкое РИ, зарегистрированное на КА SDO/AIA и RHESSI соответственно, в рамках много-температурной модели;
- 4) Оценка теплового баланса горячих вспышечных петель и интенсивности РИ из различных вспышечных областей по данным КА SDO/AIA и RHESSI соответственно.

В диссертации используются данные современных космических аппаратов (КА), а именно:

- изображающий рентгеновский спектрометр Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI), который регистрирует РИ с высоким пространственным ( $\sim 2.3''$ ) и спектральным ( $\sim 1-10$  кэВ) разрешением, и таким образом позволяет определить источник и форму распределения электронов в энергетическом диапазоне от 3 кэВ до  $\sim 17$  МэВ при помощи германиевых детекторов [27].

- инструмент Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борту космической станции Solar Dynamics Observatory (SDO), регистрирующий КУФ излучение от всего диска Солнца с пространственным ( $1.5''$ ) и временным (12с) разрешением

в семи каналах, соответствующим линиям ионизированного железа: Fe XVIII (94 Å), Fe VIII, XXI (131 Å), Fe IX (171 Å), Fe XII, XXIV (193 Å), Fe XIV (211 Å), He II (304 Å), Fe XVI (335 Å). Также AIA регистрирует излучение в линии C IV (1600 Å) и континууме (1700, 4500 Å), соответствующие фотосфере и переходному слою. Однако так как в работе рассматриваются области на Солнце, соответствующие горячей вспышечной плазме, то используются данные AIA в шести КУФ каналах 94, 131, 171, 193, 211, 335 Å, соответствующие температурному диапазону ~0.5-16 МК [26].

- спектрометр ИРИС (Исследование Рентгеновского Излучения Солнца) на борту орбитальной станции КОРОНАС-Ф (космическая программа «Комплексные орбитальные околоземные наблюдения активности Солнца») [3, 12, 2], который регистрировал РИ с временным разрешением 2.5с – в 12-и каналах в режиме "патруль" (2-250 кэВ); 1с – в 64-х каналах (2-150 кэВ) и 0.01 секунды – в 4-х энергетических каналах (24-180 кэВ) в режиме "всплеск".

- спутник GOES [44], регистрирующий мягкое РИ в двух энергетических каналах: 0.5–4 и 1–8 Å, позволяющий определить класс вспышки, а также ее температуру и меру эмиссии.

### **Научная новизна**

1. Разработана методика, позволяющая определять вначале спектр регистрируемого детекторами жесткого РИ спектрометра ИРИС на борту КА КОРОНАС-Ф (с учетом приборной функции), а затем по нему восстанавливать энергетические спектры излучающих электронов.

2. Разработана методика нахождения дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) на основе аппроксимации модельными функциями одновременно данных КА RHESSI и SDO/AIA. Впервые с помощью комбинированного анализа SDO/AIA и RHESSI данных найдено энергетическое распределение электронов для широкого диапазона энергий: 0.1 – 20 кэВ.

3. Предложена новая функциональная форма для описания ДМЭ, для которой выведено выражение для энергетического распределения электронов во вспышечной области.

4. Сделан вывод о каппа-распределении электронов во вспышечной области посредством ДМЭ. Произведено сравнение результатов данного подхода для одновременно SDO/AIA и RHESSI данных с использованием методики из п.(2) и результатов аппроксимации модельными функциями только данных КА RHESSI.

## **Практическая значимость**

Так как исследование главным образом направлено на изучение солнечной активности и улучшение существующих методов диагностики во вспышечной плазме, то результаты данной работы могут быть использованы, в первую очередь, для более детальной спектральной и пространственной диагностики процессов, наблюдаемых в активных областях Солнца, таких как, солнечные вспышки, протуберанцы, волокна, петлевые аркады. Также полученные знания помогут прояснить процессы, протекающие на звездах других галактик, а также более детально изучить процессы в лабораторной плазме, получаемой в токамаках.

Разработанные методики позволят решать некорректно поставленные обратные задачи сложных нестационарных нелинейных процессов, а также помогут улучшить диагностику процессов нагрева и ускорения частиц на Солнце, получать и анализировать полный спектр ускоренных электронов, что, в свою очередь, открывает новые возможности в исследовании физики Солнца.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Динамика реконструированных энергетических распределений высокоэнергичных электронов для солнечной вспышки 15 апреля 2002 г. по данным спектрометра ИРИС на борту КА КОРОНАС-Ф с учетом приборной функции. Методика основана на решении интегральных уравнений, описывающих трансформацию спектра рентгеновских квантов в процессе регистрации, и восстановлении спектров ускоренных электронов в источнике генерации тормозного излучения.

2. Результаты разработанной методики восстановления энергетических распределений электронов в солнечных вспышках с помощью аппроксимации модельными функциями ДМЭ одновременно данных крайнего ультрафиолетового и рентгеновского излучения по данным КА SDO/AIA и RHESSI соответственно.

3. Функциональная форма ДМЭ, для которой выведено выражение для энергетического распределения электронов в солнечной вспышке, с помощью которой и разработанной методики из п.(2) автоматически можно получать основные параметры вспышечной плазмы (температуру и меру эмиссии).

4. Анализ теплового баланса и результаты сравнения потоков жесткого РИ из различных частей вспышечной петли в рамках «стандартной» модели солнечной вспышки.

## Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждена докладами и обсуждениями на семинарах, Всероссийских и международных конференциях, а основные материалы диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых Scopus и WoS.

Результаты работы были представлены на следующих Всероссийских и международных конференциях:

1. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2010», 3-9 октября 2010 г., Санкт-Петербург, Россия.
2. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2011», 2-8 октября 2011 г., Санкт-Петербург, Россия.
3. Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике, 19-24 сентября 2011 г., Иркутск, Россия.
4. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2012», 24-28 сентября 2012 г., Санкт-Петербург, Россия.
5. Российская молодёжная конференция по физике и астрономии «Физика СПб», 24-25 октября 2012 г., Санкт-Петербург, Россия.
6. Восьмая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 4-8 февраля 2013 г., Москва, Россия.
7. Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная» (ВАК-2013), 23-27 сентября 2013 г., Санкт-Петербург, Россия.
8. Российская молодёжная конференция по физике и астрономии «Физика СПб», 23-24 октября 2013 г., Санкт-Петербург, Россия.
9. The 40th COSPAR scientific assembly, 2-10 August, 2014, Moscow, Russia.
10. RADIOSUN Workshop on solar flares and energetic particles at Pulkovo Observatory, 11-14 August, 2014, Saint-Petersburg, Russia.
11. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2014», 20-24 октября 2014 г., Санкт-Петербург, Россия.
12. Glasgow-Cambridge Mini Flare Workshop, 15-16 April, 2015, Glasgow, UK.

13. The XIII Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy «Multi-Wavelength Study of Stellar Flares and the Properties of Active Galactic Nuclei», 25-29 May, 2015, Saint-Petersburg, Russia.
14. 14th RHESSI Workshop, 11-15 August, 2015, Newark, New Jersey, USA.
15. First Joint Solar Probe Plus-Solar Orbiter Workshop «The Origins of the Heliosphere», 2-4 September, 2015, Florence, Italy.
16. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2015», 5–9 октября 2015 г., Санкт-Петербург, Россия.
17. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2016», 10–14 октября 2016 г., Санкт-Петербург, Россия.

Кроме того, результаты исследований были представлены и обсуждались на научных семинарах в ГАО РАН (Санкт-Петербург, Россия), ИСЗФ РАН (Иркутск, Россия), Университете Глазго (Глазго, Великобритания), Обсерватории Онджеева (Онджеев, Чехия).

Также апробацией результатов является участие в научных проектах РФФИ №14-02-00924а «Радио- и рентгеновская диагностика ускоренных электронов в солнечных вспышках»; № 16-32-000535мол\_а «Новые наблюдения и диагностика миллиметрового излучения солнечных вспышек»; № 16-32-50055мол\_нр «Вспышечное энерговыделение в солнечных корональных петлях по данным рентгеновских наблюдений», ФЦП «Кадры» №8524, Marie Curie International Research Staff Exchange Scheme «Radiosun» (PEOPLE–2011–IRSES–295272), РФФИ №16-12-10448, программах ПРАН П-7 и НШ-7241.2016.2, а также получение Гранта для студентов ВУЗов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов ВУЗов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в 2013, 2015г.г. и Стипендии Президента Российской Федерации для обучения за рубежом студентов и аспирантов российских ВУЗов в 2013/2014 учебном году, которая позволила автору пройти стажировку в аспирантуре Университета Глазго (научный руководитель – к.ф.-м.н. Э.П. Контарь).

### **Публикации по теме диссертации**

По материалам диссертации опубликовано 12 работ, из них 5 в изданиях, рекомендованных ВАК, из которых 5 – в изданиях, входящих в международные

базы данных научных изданий Scopus и WoS, и 7 – в сборниках трудов конференций.

### **Личный вклад автора**

Автор принимала участие в постановке задач, проведении теоретических расчетов, обработке, анализе и интерпретации результатов наблюдений с космических аппаратов (КОРОНАС-Ф, SDO/AIA, RHESSI, GOES). Автором были созданы расчетные программы для реконструкции энергетических распределений электронов по наблюдательным данным в крайнем ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. В работе [2] автором была предложена функциональная форма для дифференциальной меры эмиссии, и выведено выражение для энергетического распределения электронов во вспышечном источнике. Определение задач исследования, обсуждение полученных результатов и подготовка статей к публикации проводилось совместно с научным руководителем и соавторами.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 120 страниц, включая 36 рисунков и 2 таблицы. Список литературы включает 141 наименование.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** отражены актуальность исследования, цель работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, личный вклад автора и краткое содержание диссертации.

**Глава 1** посвящена реконструкции энергетических спектров ускоренных в солнечных вспышках электронов по данным жесткого РИ. Во введении к главе 1 описаны цели главы 1 и используемые методы обработки данных. Результаты главы 1 легли в основу работ [1, 4, 6-10]. В разделе 1.1.1 описаны элементарные процессы (механизмы) в плазме, ответственные за излучение в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах во время солнечных вспышек. Приведено сравнение данных механизмов на примере конкретных событий. Раздел 1.1.2 посвящен описанию модельного подхода к

реконструкции спектров ускоренных электронов по данным жесткого РИ. Приведены модели столкновительной тонкой и толстой мишени [9, 5], модель «теплой» толстой мишени (*warm thick-target*) [23] для описания нетепловой части энергетических распределений электронов. Рассмотрена модель «квазитепловой» плазмы для описания тепловой части энергетических спектров ускоренных электронов, показана связь нетепловой и тепловой частей и необходимость определения нижней энергетической границы  $E_c$ . Раздел 1.1.3 описывает немодельный подход к реконструкции спектров ускоренных электронов по данным жесткого РИ, который главным образом основан на методах регуляризации, в частности, рассмотрен метод регуляризации Тихонова [6]. Данный метод позволяет решать напрямую некорректную (вследствие наличия погрешностей в наблюдательных данных) обратную задачу путем добавления параметра регуляризации. Представлено сравнение модельного и немодельного подходов для одного события, сделаны выводы об их достоинствах и недостатках. Раздел 1.2 описывает методику обработки данных спектрометра ИРИС на борту КА КОРОНАС-Ф на примере вспышки 15 апреля 2002 г., для которой были зарегистрированы все фазы эволюции вспышки. В разделе 1.3 рассмотрен метод восстановления энергетического спектра жесткого РИ по данным регистрации с учетом приборной функции спектрометра ИРИС с помощью метода случайного поиска в комбинации с методом наименьших квадратов. Обсуждаются особенности восстановленных спектров жесткого РИ. В разделе 1.4 проведена реконструкция энергетических распределений ускоренных электронов по восстановленным спектрам жесткого РИ с использованием метода регуляризации Тихонова нулевого порядка для различных значений параметра регуляризации  $\alpha$ . Рассмотрена подробная эволюция спектров жесткого РИ и спектров ускоренных электронов. Для данного события выявлена особенность в спектрах электронов, связанная с наличием локального минимума в области энергий 40–60 кэВ, которая не может быть выявлена прямыми методами. Аналогично, для вспышки 26 июля 2002 наблюдалась подобная особенность в спектре в диапазоне 40-50 кэВ [1]. В разделе 1.5 приведено заключение к главе 1 и основные выводы.

**Глава 2** посвящена восстановлению энергетических распределений электронов на основе одновременного анализа КУФ и мягкого РИ. Результаты главы 2 легли в основу работ [2, 3, 11, 12]. Раздел 2.1 описывает основные вопросы, связанные с получением информации по данным КУФ и мягкого РИ, а также цели и задачи главы 2. В разделе 2.2 введена дифференциальная мера

эмиссии (ДМЭ, *differential emission measure*) и описана ее связь с энергетическим распределением надтепловых электронов. В разделе 2.2.1 предложена функциональная форма ДМЭ, выведен аналитический вид для энергетического распределения электронов. Раздел 2.2.2 описывает каппа-распределение через ДМЭ, а также вывод энергетического распределения электронов из ДМЭ в виде каппа-распределения. Раздел 2.3 посвящен комбинированному анализу данных КУФ и мягкого РИ, зарегистрированных спутниками SDO/AIA и RHESSI соответственно. В разделе 2.3.1 рассмотрен метод одновременной аппроксимации модельными функциями (*forward fitting method*) ДМЭ одновременно SDO/AIA и RHESSI данных, описана единая матрица температурного отклика, включающая температурный отклик КА SDO/AIA и температурный отклик КА RHESSI. В разделе 2.4 представлен анализ событий 14 августа 2010 г. и 8 мая 2015 г. с помощью разработанной методики анализа одновременно SDO/AIA и RHESSI данных. В разделе 2.4.1 для вспышки 14 августа 2010 г. произведено восстановление ДМЭ тремя различными способами: 1) метод регуляризации только SDO/AIA данных, используется программа *data2dem\_reg.pro*, разработанная авторами [18]; 2) аппроксимация много-температурной ДМЭ функцией только данных КА RHESSI, используется *f\_multi\_therm\_2pow.pro* (доступна в среде *OSPEX*); 3) аппроксимация предложенной ДМЭ и моделью тонкой мишени данных КА SDO/AIA и RHESSI одновременно. Производится сравнение новой методики аппроксимации модельными функциями данных КА SDO/AIA и RHESSI одновременно, показано, что результаты хорошо согласуются с наблюдательными данными (критерий  $\chi^2=0.83$ ). По найденной ДМЭ построено энергетическое распределение электронов  $\langle nVF(E) \rangle$  для диапазона энергий: 0.1–20 кэВ, а также представлены параметры вспышечной плазмы: мера эмиссии  $EM=4.64 \times 10^{46} \text{ см}^{-3}$ , максимальная температура  $T_{max}=0.58 \text{ кэВ}$ , спектральный индекс  $\delta=2.9$ , низкоэнергетическая граница  $E_c=7.78 \text{ кэВ}$ . Раздел 2.4.2 описывает временную эволюцию параметров  $EM$ ,  $T$ , концентрации  $n$  для события 8 мая 2015г., полученных с помощью рассматриваемого метода. Полученные результаты показывают присутствие горячей вспышечной плазмы и холодной фоновой плазмы вдоль луча зрения во вспышечном источнике. В разделе 2.5 рассматривается энергетическое распределение электронов в рамках каппа-распределения. Раздел 2.5.1 описывает применение аппроксимации данных КА SDO/AIA и RHESSI одновременно двумя функциями ДМЭ в виде каппа-распределения  $\xi_{\kappa}^{cold}(T)$  и  $\xi_{\kappa}^{hot}(T)$ ,

соответствующие холодной (*cold*) и горячей (*hot*) компонентам вспышечной плазмы, к солнечной вспышке 14 августа 2010 г. Производится сравнение полученного энергетического распределения  $\langle nVF(E) \rangle$  по SDO/AIA и RHESSI данным и  $\langle nVF(E) \rangle$ , вычисленного только из RHESSI данных. В разделе 2.5.2 обсуждаются результаты аппроксимации одновременно SDO/AIA и RHESSI данных модельными функциями  $\xi_{\kappa}^{cold}(T)$  и  $\xi_{\kappa}^{hot}(T)$ . В разделе 2.5.3 производится вывод полной электронной концентрации и энергии солнечной вспышки, приведены оценки для события 14.08.2010. Полученные результаты показывают, что для типичной вспышки, число электронов, найденное с использованием новой методики ( $n=0.45 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ), значительно меньше, чем с помощью стандартного каппа-распределения на основе модели тонкой мишени *thin\_kappa* ( $n=14 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ) [21], которое учитывает только электрон-ионное тормозное излучение, или одной ДМЭ функции  $\xi_{\kappa}(T)$  ( $n=4.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ), вычисленные только из RHESSI данных. В то же время учет свободно-связанного излучения от надтепловых электронов может давать значительный вклад в РИ [14, 15, 10, 16]. Это означает, что гораздо меньшее число надтепловых электронов, чем считалось ранее, присутствует в корональных источниках. Совместный анализ RHESSI и SDO/AIA данных подтверждает результат аппроксимации модельными функциями RHESSI данных отдельно, но необходим ввод дополнительной ДМЭ компоненты для учета низкотемпературной части излучения, регистрируемого КА SDO/AIA, к которому КА RHESSI малочувствителен, что свидетельствует о дополнительном вкладе корональной 1-2 МК плазмы. В разделе 2.6 приведены основные результаты.

**Глава 3** посвящена оценке теплового баланса горячих вспышечных петель на основе размерностных соотношений по данным РИ, зарегистрированного на КА RHESSI, на примере двух событий 23.08.2005 г. и 09.11.2013 г. Результаты главы 3 легли в основу работы [5]. В разделе 3.1 дано описание применимости «стандартной» CSHKP модели солнечной вспышки [11, 40, 24, 19, 34, 35, 42] и эффекта Нойперта [30] как основного критерия. В разделе 3.2 рассматривается скорость энергетических потерь петли, которая в первую очередь определяется электронной теплопроводностью. Так как рассматривается горячая вспышечная плазма с температурой  $T \geq 10^7 \text{ К}$ , радиационными потерями можно пренебречь [31, 13]. Производится оценка порогового значения энергии  $E_{loop}$ , ниже которой ускоренные электроны термализуются в короне [43, 37]. Для значений  $nL = 6 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$  и  $\mu = 0.5$ , где  $L$  – длина корональной петли,  $n$  – концентрация

электронов,  $\mu$  - косинус питч-угла ускоренного электрона,  $E_{loop} = 25$  кэВ. Выводится зависимость отношения потоков жесткого РИ в основаниях петли и корональной части от относительной энергии фотонов при различных значениях показателя спектра  $\delta$ . В разделе 3.3 производится анализ событий 23.08.2005 г., 09.11.2013 г. Для события 23 августа 2005 г. рассмотрена временная эволюция меры эмиссии и температуры, показателя спектра, интегрального потока и нижнего предела энергии ускоренных электронов, зависимости отношения характерных времен нагрева  $\tau_h$  и охлаждения  $\tau_{cond}$  плазмы. Обсуждаются результаты и сделан вывод, что ускоренные электроны не могут обеспечить нагрев корональной плазмы. Для события 9 ноября 2013 г. было произведено сравнение полученных оценок с картами КУФ и рентгеновскими контурами в диапазоне энергий 23–27.5 кэВ, где из оценок следует, что интенсивность в вершине петли должна преобладать по сравнению с интенсивностью в основаниях, что не соответствует источникам жесткого РИ. Полученные результаты представлены в разделе 3.4.

В заключении сделаны выводы по проведенной в диссертации работе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и получены следующие основные результаты:

1) Произведена реконструкция спектров жесткого РИ на основе данных регистрации спектрометра ИРИС, установленного на борту КА КОРОНАС-Ф, с учетом приборной функции методом случайного поиска. На основе восстановленных спектров жесткого РИ сделана реконструкция энергетических спектров излучающих электронов с помощью метода регуляризации Тихонова и рассмотрена их динамика для солнечной вспышки 15 апреля 2002 г. Особенность в спектрах электронов, связанная с наличием локального минимума в диапазоне энергий 40–60 кэВ, не может быть выявлена прямыми методами.

2) Разработана методика восстановления энергетических распределений электронов в солнечных вспышках одновременно по данным КА SDO/AIA и RHESSI, соответствующим КУФ и РИ, с помощью аппроксимации модельными функциями ДМЭ. С помощью данной методики рассмотрены события 14 августа 2010 г. и 8 мая 2015 г., для которых построены ДМЭ и энергетическое

распределение электронов. Для события 8 мая 2015 г. рассмотрена динамика температуры, меры эмиссии и концентрации для десяти временных интервалов.

3) Предложена функциональная форма ДМЭ, для которой найдено аналитическое выражение энергетического распределения электронов в солнечной вспышке. С помощью предложенной ДМЭ и разработанной методики (пункт 2) автоматически можно получать основные параметры вспышечной плазмы (температуру и меру эмиссии). Данный вид ДМЭ рассмотрен на примере вспышечных событий 14 августа 2010 г. и 8 мая 2015г., получены параметры вспышечной плазмы.

4) Рассмотрено каппа-распределение электронов во вспышечной области в виде ДМЭ с использованием метода из пункта 2. Данный подход помог сделать оценку полного количества электронов, которое необходимо для генерации наблюдаемого рентгеновского и крайнего ультрафиолетового излучения.

5) Произведен анализ теплового баланса и сравнение потоков жесткого РИ из различных частей вспышечной петли в рамках «стандартной» модели солнечной вспышки. Для события 23 августа 2005 г. показано, что теплопроводные потери в течение нескольких минут превышали мощность энергии ускоренных частиц при возрастании температуры корональной плазмы, что указывает на существование дополнительного источника тепловой энергии, связанного, например, с джоулевой диссипацией электрических токов. Для события 9 ноября 2013 г. в рамках «стандартной» модели, согласно которой ускорение частиц происходит в области вершины петли, показано, что из-за больших кулоновских потерь энергии в короне электроны не могут генерировать наблюдаемое в основаниях РИ, что указывает на необходимость модификации данной модели.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:*

1. **Моторина Г.Г.**, Кудрявцев И.В., Лазутков В.П., Матвеев Г.А., Савченко М.И., Скородумов Д.В., Чариков Ю.Е. К вопросу о реконструкции энергетического распределения электронов, ускоренных во время солнечных вспышек // Журнал технической физики. – 2012. – Т.82. – №12. – С.11-15. – doi: 10.1134/S1063784212120201.
2. **Motorina G.G.**, Kontar E.P. Differential emission measure and electron distribution function reconstructed from RHESSI and SDO observations // Geomagnetism and Aeronomy. – 2015. – V.55. – №7. – P.995-999. – doi: 10.1134/S0016793215070154.
3. Battaglia M., **Motorina G.**, Kontar E.P. Multi-thermal representation of the kappa-distribution of solar flare electrons and application to simultaneous X-ray and EUV observations // Astrophysical Journal. – 2015. – V.815. – №1. – Id.73. – 8 p. – doi: 10.1088/0004-637X/815/1/73.
4. **Моторина Г.Г.**, Кудрявцев И.В., Лазутков В.П., Савченко М.И., Скородумов Д.В., Чариков Ю.Е. Реконструкция энергетического спектра электронов, ускоренных во время солнечной вспышки 15 апреля 2002 года, на основе измерений рентгеновским спектрометром ИРИС // Журнал технической физики. – 2016. – Т.86. – №4. – С.47-52. – doi: 10.1134/S1063784216040186.
5. Tsap Yu.T., **Motorina G.G.**, Kopylova Yu.G. Flare coronal loop heating and hard X-ray emission from solar flares of August 23, 2005, and November 9, 2013 // Geomagnetism and Aeronomy. – 2016. – V.56. – №8. – P.1104-1109. – doi: 10.1134/S0016793216080235.

*Статьи в сборниках трудов конференций:*

6. **Нахатова Г.Г.**, Кудрявцев И.В. К вопросу о реконструкции энергетических спектров ускоренных во время солнечных вспышек электронов, на основе данных по тормозному рентгеновскому излучению // Сборник трудов XIV ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2010». – 2010. – ГАО РАН, Санкт-Петербург. – С.287-290.
7. **Нахатова Г.Г.**, Кудрявцев И.В. К вопросу о реконструкции энергетических спектров ускоренных во время солнечных вспышек электронов // Труды XII конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». – 2011. – Иркутск. – С.90-92.

8. **Моторина Г.Г.**, Кудрявцев И.В., Лазутков В.П., Матвеев Г.А., Савченко М.И., Скородумов Д.В., Чариков Ю.Е. Восстановление энергетического распределения электронов, ускоренных во время солнечной вспышки 26 июля 2002 года, по данным жесткого рентгеновского излучения // Сборник трудов XV ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2011». – 2011. – ГАО РАН, Санкт-Петербург. – С.171-174.
9. **Моторина Г.Г.**, Кудрявцев И.В., Лазутков В.П., Матвеев Г.А., Савченко М.И., Скородумов Д.В., Чариков Ю.Е. Реконструкция энергетического спектра электронов, ускоренных в солнечной вспышке 15 апреля 2002 года // Сборник трудов XVI ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2012». – 2012. – ГАО РАН, Санкт-Петербург. – С.301-304.
10. **Моторина Г.Г.**, Кудрявцев И.В., Лазутков В.П., Савченко М.И., Скородумов Д.В., Чариков Ю.Е. Эволюция энергетических спектров жесткого рентгеновского излучения солнечной вспышки 15 апреля 2002 года // Сборник трудов XVII ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2013». – 2013. – ГАО РАН, Санкт-Петербург. – С.161-164.
11. **Моторина Г.Г.**, Контарь Э.П. Дифференциальная мера эмиссии, полученная в результате комбинирования RHESSI, SDO/AIA наблюдений // Сборник трудов XVIII ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2014». – ГАО РАН, Санкт-Петербург. – С.307-310.
12. **Моторина Г.Г.**, Контарь Э.П. Временная эволюция энергетического распределения электронов в солнечных вспышках на основе RHESSI и SDO/AIA наблюдений // Сборник трудов XIX ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2015». – 2015. – ГАО РАН, Санкт-Петербург. – С.289-292.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Богачев С.А., Сомов Б.В. Сравнение эффективности ускорения Ферми и бетатронного ускорения в коллапсирующих магнитных ловушках // Письма в *Астрономический журнал*. – 2005. – Т.31. – №8. – С.601-610.
- [2] Дмитриев П.Б., Кудрявцев И.В., Лазутков В.П. и др. Особенности рентгеновского излучения солнечных вспышек, зарегистрированных спектрометром ИРИС во время полета ИСЗ КОРОНАС-Ф // *Астрономический вестник*. – 2006. – Т.40. – №2. – С.160-170.
- [3] Кузнецов В.Д. Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф. – М.: Физматлит, 2009. – 488 с.
- [4] Москаленко Е.И. Методы Внеатмосферной астрономии. – М.: Наука, 1984. – 280 с.
- [5] Сыроватский С.И., Шмелева О.П. Нагрев плазмы быстрыми электронами и нетепловое рентгеновское излучение при солнечных вспышках // *Астрон. журн.* – 1972. – Т.49. – С.334-347.
- [6] Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 286 с.
- [7] Aschwanden M.J. Particle acceleration and kinematics in solar flares – a synthesis of recent observations and theoretical concepts (Invited Review) // *Space Science Reviews*. – 2002. – V.101. – №1. – P.1–227.
- [8] Aschwanden M.J. Physics of the solar corona. An introduction with problems and solutions (2nd edition) // Springer. – 2005. – 892 p.
- [9] Brown J.C. The Deduction of energy spectra of non-thermal electrons in flares from the observed dynamic spectra of hard X-ray bursts // *Solar Phys.* – 1971. – V.18. – №3. – P.489-502.
- [10] Brown J. C., Mallik P.C.V., Badnell N.R. Non-thermal recombination - a neglected source of flare hard X-rays and fast electron diagnostics (Corrigendum) // *Astron. and Astrophys.* – 2010. – V.515. – 3 p.
- [11] Carmichael H. A process for flares // *NASA Special Publication*. – 1964. – V.50. – P.451-456.
- [12] Charikov Yu.E., Dmitrijev P.B., Koudriavtsev I.V. et al. Solar flare hard X-rays measured by spectrometer "IRIS": spectral and temporal characteristics // *IAU Symposium*. – 2004. – V.223. – P.429- 432.
- [13] Colgan J., Abdallah Jr., Sherrill M.E., Foster M. Radiative losses of solar coronal plasmas // *Astrophys. J.* – 2008. – V.689. – №1. – P.585-592.

- [14] Culhane J.L. Thermal continuum radiation from coronal plasmas at soft X-ray wavelengths // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* – 1969. – V.144. – P. 375-389.
- [15] Culhane J.L., Acton L.W. A simplified thermal continuum function for the X-ray emission from coronal plasmas // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* – 1970. – V.151. – P.141-147.
- [16] Dudík J., Kašparová J., Dzifčáková E. et al. The non-Maxwellian continuum in the X-ray, UV, and radio range // *Astron. and Astrophys.* – 2012. – V.539. – 12 p.
- [17] Falewicz R. Plasma heating in solar flares and their soft and hard X-ray emissions // *Astrophys. J.* – 2014. – V.789. – №1. – 15 p.
- [18] Hannah I.G., Kontar E.P. Differential emission measures from the regularized inversion of Hinode and SDO data // *Astron. Astrophys.* – V.539. – 2012. – 14 p.
- [19] Hirayama T. Theoretical model of flares and prominences. I: Evaporating flare model // *Solar Phys.* – 1974. – V.34. – №2. – P.323-338.
- [20] Holman G.D., Aschwanden M.J., Auras H. et al. Implications of X-ray observations for electron acceleration and propagation in solar flares // *Space Sci. Rev.* – 2011. – V.159. – №1-4. – P.107-166.
- [21] Kašparová J., Karlický M. Kappa distribution and hard X-ray emission of solar flares // *Astron. Astrophys.* – 2009. – V.497. – №3. – P.L13-L16.
- [22] Kontar E.P., Brown J.C., Emslie A.G. et al. Deducing electron properties from hard X-ray observations // *Space Sci. Rev.* – 2011. – V.159. – №1-4. – P.301-355.
- [23] Kontar E.P., Jeffrey N.L.S, Emslie A.G., Bian N.H. Collisional relaxation of electrons in a warm plasma and accelerated nonthermal electron spectra in solar flares // *Astrophys. J.* – 2015. – V.809. – №1. – 11 p.
- [24] Kopp R.A., Pneuman G.W. Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon // *Solar Phys.* – 1976. – V.50. – P.85-98.
- [25] Krucker S., Battaglia M., Cargill P.J. et al. Hard X-ray emission from the solar corona // *Astron. & Astrophys. Rev.* – 2008. – V.16. – P.155-208.
- [26] Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* – 2012. – V.275. – №17. – P.17-40.
- [27] Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J. et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // *Solar Phys.* – 2002. – V.210. – № 1. – P.3-32.
- [28] Milligan R.O., Chamberlin P.C., Hudson H.S. et al., Observations of enhanced extreme ultraviolet continua during an X-class solar flare using SDO/EVE // *Astrophys. J. Lett.* – 2012. – V.748. – №1. – Id.L14. – 6 p.

- [29] Milligan R.O. EUV irradiance observations from SDO/EVE as a diagnostic of solar flares // IAU Symposium. – 2016. – V.320. – P.41-50.
- [30] Neupert W.M. Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares // *Astrophys. J.* – 1968. – V.153. – P.59L-65L.
- [31] Peres G., Rosner R., Serio S., Vaiana G.S. Coronal closed structures. IV. Hydrodynamical stability and response to the heating perturbations // *Astrophys. J.* – 1982. – V.252. – P.791-799.
- [32] Priest E.R., Forbes T. *Magnetic reconnection: MHD theory and applications* // Cambridge University Press. – 2000. – 616 p.
- [33] Priest E.R., Forbes T. The magnetic nature of solar flares // *Astron. Astrophys. Rev.* – 2002. – V.10. – №4. – P.313-377.
- [34] Shibata K., Masuda S., Shimojo M. et al. Hot-plasma ejections associated with compact-loop solar flares // *Astrophys. J. Lett.* – 1995. – V.451. – P.L83-L85.
- [35] Shibata K. Evidence of magnetic reconnection in solar flares and a unified model of flares // *Astrophys. and Space Sci.* – 1999. – V.264. – №1/4. – P.129-144.
- [36] Siarkowski M., Falewicz R., Rudawy P. Plasma heating in the very early phase of solar flares // *Astrophys. J. Lett.* – 2009. – V.705. – №2. – P.L143-L147.
- [37] Simões P.J.A., Graham D.R., Fletcher L. Direct observation of the energy release site in a solar flare by SDO/AIA, Hinode/EIS, and RHESSI // *Astrophys. J.* – 2015. – V.577. – 9 p.
- [38] Somov B.V. Classical and anomalous heat conduction in solar flares // *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal.* – 1979. – V.5. – P.50-53.
- [39] Stepanov A.V., Zaitsev V.V. The challenges of the models of solar flares // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2016. – V.56. – №8. – P.952–971.
- [40] Sturrock P.A. Model of the high-energy phase of solar flares // *Nature.* – 1966. – V.211. – №5050. – P.695–697.
- [41] Sui L., Holman G.D., Dennis B.R. Determination of low-energy cutoffs and total energy of nonthermal electrons in a solar flare on 2002 April 15 // *Astrophys. J.* – 2005. – V.626. – №2. – P.1102-1109.
- [42] Tsuneta S. Moving plasmoid and formation of the neutral sheet in a solar flare // *Astrophys. J.* – 1997. – V.483. – №1. – P.507-514.
- [43] Veronig A.M., Brown J.C. A coronal thick-target interpretation of two hard X-ray loop events // *Astrophys. J.* – 2004. – V.603. – №2. – P.L117-L120.

- [44] White S.M., Thomas R.J., Schwartz R.A. Updated expressions for determining temperatures and emission measures from GOES soft X-ray measurements // Solar Phys. – 2005. – V.227. – №2. – P.231-248.
- [45] Zaitsev V.V., Stepanov A.V. Particle acceleration and plasma heating in the chromosphere // Solar Phys. – 2015. – V.290. – №12. – P.3559–3572.