

Учреждение Российской академии наук  
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

---

На правах рукописи

**Шестов Сергей Викторович**

**Рентгеноспектральная диагностика  
плазмы солнечной короны по данным  
спектрогелиографов на спутниках КОРОНАС**

Специальность 01.04.05 – оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2009

**Работа выполнена** в Учреждении Российской академии наук Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
Урнов Александр Михайлович

**Научный консультант:** кандидат физико-математических наук  
Кузин Сергей Вадимович

**Официальные оппоненты:** проф. Курт Владимир Гдалевич  
(АКЦ ФИАН)  
д.ф.-м.н. Рябцев Александр Николаевич  
(ИСАН)

**Ведущая организация:** Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН

**Защита состоится:**

26 октября 2009 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53

**С диссертацией можно ознакомиться**

в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

**Автореферат разослан:** " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2009 г.

**Ученый секретарь диссертационного совета**

д.ф.-м.н.



А. С. Шиканов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

На сегодняшний день одним из активно развивающихся разделов астрофизики является физика солнечной короны. Детальное изучение структуры и динамики солнечной короны необходимо как для решения общих, фундаментальных проблем физики Солнца — таких, как нагрев короны, выбросы корональной массы, ускорение солнечного ветра, формирование межпланетной среды, так и для исследования отдельных локальных явлений, проходящих в верхней атмосфере Солнца: вспышек, горячих облаков, каспов, стримеров и др. [1; 2].

Исследование солнечной короны представляет интерес для физики плазмы, атомной спектроскопии, других областей физики и астрофизики. В частности, понимание процессов, протекающих в солнечной короне, важно для изучения корон звезд. Солнце является природным источником высокотемпературной плазмы, обладающей самыми разнообразными параметрами: температурой от  $6 \cdot 10^3$  до  $10^8$  К, плотностями от  $10^8$  до  $10^{21}$  см<sup>-3</sup> [3]. Именно в спектре излучения Солнца Жансен в 1868 г. впервые обнаружил гелий; сегодня солнечные спектры используются для уточнения атомных данных ионов (например, в проекте „The Iron Project“<sup>1</sup>, см., например, [4]). Кроме того, аппаратура и методы, применяемые в солнечной астрономии, успешно адаптируются для исследований лабораторной плазмы.

Большое прикладное значение физики солнечной атмосферы имеют солнечно-земные связи. Космическая погода в значительной мере является следствием активных процессов, протекающих в солнечной короне [5]. Состояние ионосферы Земли, напрямую зависящее от солнечной активности, влияет на работу космической и наземной связи, функционирование электронной аппаратуры спутников, функционирование электростан-

---

<sup>1</sup><http://www.usm.uni-muenchen.de/people/ip/iron-project.html>

ций и т.д. В связи с этим, непрерывные наблюдения солнечной короны и возможность прогнозирования активных явлений (вспышки, выбросы корональных масс и др.) имеют не только научную, но и практическую ценность.

В настоящее время для изучения солнечной короны широко применяются телескопические и спектроскопические наблюдения в области мягкого рентгена (МР) и вакуумного ультрафиолета (ВУФ). Это связано с высокой температурой короны —  $T \sim 1$  миллиона К (МК) и выше, при которой корональное вещество сильно ионизовано и излучает преимущественно в коротковолновом диапазоне электромагнитных волн [3].

Исследование короны Солнца в МР и ВУФ диапазонах стало возможным с началом космической эры. Начиная со 2-й половины XX-го века проводились многочисленные эксперименты по наблюдению солнечной короны как с бортов ракет („Вертикаль“, SERTS [6] и др.), так и орбитальных станций („Solar Maximum Mission“ [7], Skylab [8], Yohkoh [9], SOHO<sup>2</sup> [10], КОРОНАС [11], Hinode<sup>3</sup> [12], Stereo<sup>4</sup> [13] и др.).

Были выполнены как телескопические наблюдения с высоким пространственным разрешением (например при помощи телескопов SXT/Yohkoh [9], EIT/SOHO [10], Trace<sup>5</sup> [14]), так и спектроскопические эксперименты с высоким спектральным разрешением (например в ракетных пусках SERTS [6] и на станциях Skylab [8], CDS/SOHO [15], СПИРИТ/КОРОНАС-Ф [16]). Данные телескопов используются, в основном, для изучения мелкомасштабной и глобальной структуры короны, динамики плазменных образований, а данные спектрографов и спектрогелиографов — для определения физических параметров (температуры, плотности, обилий элементов) корональной плазмы.

Несмотря на большое количество наблюдательных данных, получен-

---

<sup>2</sup><http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

<sup>3</sup><http://solarb.msfc.nasa.gov/>

<sup>4</sup><http://stereo.gsfc.nasa.gov/>

<sup>5</sup><http://trace.lmsal.com/>

ных в этих экспериментах, многие вопросы остаются нерешенными. В частности, до сих пор не ясен механизм нагрева корональной плазмы до температур спокойной короны  $T \sim 1 \div 3$  МК, механизм выделения энергии во вспышках и разогрева плазмы до „вспышечных“ температур  $T > 15$  МК и выше и др. Это связано, в частности, с недостатком надежной экспериментальной информации о физических условиях в плазме: телескопические наблюдения проводятся в относительно широких спектральных диапазонах, что затрудняет надежное измерение физических характеристик, при спектроскопических наблюдениях недостаточно информации о пространственном распределении излучающей плазмы. Кроме того, в проводившихся спектроскопических исследованиях практически отсутствуют данные о физических параметрах плазмы с  $T \sim 5 - 10$  МК.

Особую актуальность в настоящее время представляет исследование солнечных вспышек. Отсутствие информации о вспышечной плазме объясняется малым количеством наблюдений вспышек при помощи спектрографов. Это связано с плохой предсказуемостью их возникновения, компактными размерами и малым временем жизни. В случае спектрографов с ограниченным полем зрения (как в экспериментах SERTS, CDS/SOHO) вероятность зарегистрировать вспышку мала ввиду невозможности одновременного наблюдения всего Солнца. До сих пор основным каталогом спектральных линий ВУФ диапазона, полученным для вспышки, является каталог, составленный по данным наблюдений спектрогелиографа на станции Skylab в 70-х годах прошлого века [17].

Для преодоления указанных недостатков наблюдений (отсутствие одновременной информации с высоким пространственным и спектральным разрешением, информации о горячей плазме  $T \sim 5 \div 10$  МК, спектроскопических наблюдений вспышек и др.) в ФИАНе был осуществлен т.н. „метод изображающей спектроскопии Солнца“. Метод заключается в одновременной регистрации изображений и спектрогелиограмм солнечной

короны в различных участках МР и ВУФ диапазонов спектра. Тщательно выбранные спектральные интервалы для наблюдений позволяют получать наиболее полную информацию (в широком интервале температур и плотностей) об излучающей плазме. Данные спектрогелиографов, содержащие информацию как о спектральном составе излучения, так и о его пространственном распределении, дополняются данными телескопов с высоким пространственным разрешением. Такой метод наблюдений был реализован в экспериментах СПИРИТ [16] на спутнике КОРОНАС-Ф (2001-2005 гг.) и ТЕСИС [18] на спутнике КОРОНАС-Фотон (запущен в феврале 2009-го года). Принципиальной особенностью этих экспериментов было использование рентгеновских и ВУФ спектрогелиографов, позволивших осуществить новое направление в рентгеновской астрономии Солнца — монохроматическую изображающую спектроскопию всего Солнца. За время эксперимента СПИРИТ был получен огромный объем наблюдательной информации — более 300 тысяч телескопических изображений Солнца в разных участках ВУФ диапазона, рентгеновских и ВУФ спектрогелиограмм. В том числе, было зарегистрировано более сотни спектрогелиограмм, содержащих солнечные вспышки, около 30 спектрогелиограмм содержало мощнейшие вспышки класса X.

Особенностью таких комплексных мультиспектральных наблюдений является сложность интерпретации зарегистрированных данных. При использовании спектрогелиограмм, кроме технической обработки, необходимой в любых „изображающих“ экспериментах, требуется дополнительная работа по „разделению“ пространственной и спектральной информации, содержащейся в полученных изображениях. Кроме того, для интерпретации спектров необходима информация о спектральной чувствительности аппаратуры. Проведение калибровок аппаратуры в рабочем диапазоне длин волн является сложной экспериментальной задачей. Это связано как с отсутствием широкоапертурных источников излучения, которые могут работать в широком диапазоне длин волн, так и вакуумных установок

достаточно больших размеров, которые позволяли бы проводить такие калибровки. Поэтому для измерения спектральной чувствительности аппаратуры проводятся как измерения отдельных элементов рентгеновской оптики для расчета совокупной чувствительности, так и разрабатываются комплексные методики проверки калибровок на основе зарегистрированных данных и теоретических расчетов.

**Целью работы** является исследование физических условий и определение параметров плазмы (температуры и плотности и др.) различных структур солнечной короны по данным экспериментов СПИРИТ и ТЕССИС (ФИАН).

Проведение таких исследований требует целого комплекса работ — от изготовления научной аппаратуры, до разработки новых подходов и методик диагностики по полученным данным. В связи с этим были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести калибровки элементов рентгеновской оптики телескопов и спектрогелиографов и определить калибровочные константы спектрогелиографов для космических экспериментов СПИРИТ и ТЕССИС.
2. Разработать методики и написать специализированное программное обеспечение (ПО) для обработки спектрогелиограмм, полученных в эксперименте СПИРИТ.
3. Разработать методики диагностики температуры и плотности плазмы различных структур солнечной короны по данным спектрогелиографов аппаратуры СПИРИТ.
4. Выполнить диагностику плазмы различных структур солнечной короны, в т.ч., плазмы областей спокойного Солнца, активных областей и вспышек, и на ее основе дать физическую интерпретацию полученных данных.

## Научная новизна

Были получены следующие новые результаты:

1. На основе разработанных методик измерены калибровочные характеристики спектрогелиографов аппаратуры СПИРИТ и ТЕСИС, необходимых для физической интерпретации монохроматических изображений Солнца.
2. Составлен каталог спектральных линий, зарегистрированных в диапазоне 176–207 Å ВУФ спектрогелиографом аппаратуры СПИРИТ в течение мощной солнечной вспышки класса М5.6. Предложена идентификация 51 линии из 65, наблюдающихся в спектре.
3. На основе данных спектрогелиографов аппаратуры СПИРИТ получены следующие новые результаты диагностики плазмы солнечной короны:
  - Получены температурные распределения вещества (меры эмиссии, МЭ) в широком диапазоне температур  $T = 1 \div 20$  МК и исследована их временная динамика.
  - Установлено наличие горячей плазмы с  $T \sim 5 \div 15$  МК в активных областях и обнаружены существенно разные „характерные“ температурные распределения МЭ.
  - Показана существенная роль „промежуточной“ плазмы с  $T \sim 4 \div 10$  МК в энергобюджете длительных вспышечных событий.
  - Определен температурный состав плазмы вспышек класса X и M, обнаружено подобие температурного распределения плазмы во вспышках разных классов.
  - Получено пространственное распределение температуры и плотности плазмы для долговременных вспышечных явлений, обнаруженных в эксперименте СПИРИТ.



- Выполнена диагностика плотности плазмы с  $T \sim 1 \div 3$  МК в мощнейших солнечных вспышках, в т.ч. во вспышках класса X.

### **Научная и практическая ценность**

Научная значимость работы состоит в разработке методик диагностики параметров (температуры и плотности) плазмы солнечных структур (активных областей, вспышек). С помощью этих методик были получены данные о физических условиях в плазме, необходимые для исследования механизмов образования и развития активных процессов, протекающих в солнечной короне. В частности, пространственные распределения температуры и плотности для долгоживущих вспышечных событий, обнаруженных в эксперименте СПИРИТ, являются основой для количественного моделирования этих явлений и связанных с ними выбросов коронального вещества. Эти данные важны для решения практических задач космической погоды. Результаты исследования температурного состава плазмы активных областей и вспышек обнаружили существенную роль „промежуточной“ плазмы (с  $T \sim 4 \div 10$  МК) в общем энергобюджете вспышечных событий.

Результаты этих исследований использовались при планировании научной программы и разработке новой космической аппаратуры эксперимента ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон.

Составленный каталог спектральных линий, наблюдавшихся в солнечной вспышке, может быть использован как для уточнения атомных констант, так и для планирования космических экспериментов. Данные о параметрах плазмы солнечной плазмы могут использоваться для моделирования структур солнечной короны и составления программы космических наблюдений в институтах ИКИ РАН, ИЗМИРАН, ГАО, НИИЯФ МГУ, МИФИ, уточнения атомных характеристик и обилий элементов, входящих в базу данных CHIANTI.

Разработанные методики калибровки элементов оптики (зеркал, филь-

тров, детекторов) могут быть использованы при создании аппаратуры как для космических исследований, так и для исследований лабораторной плазмы.

Разработанное программное обеспечение используется для обработки данных экспериментов ФИАН на спутниках КОРОНАС: СПИРИТ/КОРОНАС-Ф (2001-й — 2005-й года) и ТЕСИС/КОРОНАС-Фотон (запущен в феврале 2009-го года).

### **Личный вклад автора**

В ходе работы над диссертацией автором был выполнен комплекс работ экспериментального и теоретического характера — по проведению калибровок элементов оптики аппаратуры СПИРИТ и ТЕСИС и по интерпретации данных, полученных в эксперименте СПИРИТ.

При проведении калибровок элементов оптики и подготовке аппаратуры ТЕСИС автором был выполнен следующий ряд экспериментальных работ: разработана методика и проведены измерения кристаллографических характеристик кристаллического зеркала спектрогелиографа Mg XII, проведена подготовка оборудования для нанесения многослойных фильтров на ПЗС-матрицы, входные фильтры, зеркала аппаратуры ТЕСИС; проведены калибровки элементов оптики в диапазоне вблизи  $8.42 \text{ \AA}$  и некоторых оптических элементов в ВУФ диапазоне. Кроме того, автором был выполнен большой объем работ по сборке и юстировке комплекса аппаратуры ТЕСИС. Экспериментальные работы были выполнены под руководством научного консультанта и руководителя эксперимента ТЕСИС С.В. Кузиным.

Специализированное ПО для обработки спектрогелиограмм разработано и написано автором самостоятельно. Каталог спектральных линий составлен при участии С.А. Боженкова. Техническая обработка спектрогелиограмм, использовавшихся в дальнейшем для диагностики плазмы солнечной короны проведена самостоятельно. Работы по разработке мето-

дик диагностики корональной плазмы по данным эксперимента СПИРИТ и их применение проводились самостоятельно под руководством научного руководителя А.М. Урнова.

### **Апробация работы**

Результаты работ, составивших основу диссертации, были представлены на всероссийских и международных конференциях:

- XLVII научная конференция МФТИ, 26 ноября, 2004, Долгопрудный
- Международная конференция „КОРОНАС-Ф: три года наблюдений активности Солнца 2001–2004 гг.“, 31 января–5 февраля, 2005, Троицк
- Symposium „Solar Extreme Events 2005: Fundamental Science and Applied Aspects“, 26–30 September, 2005, Yerevan, Armenia
- IX международный Симпозиум „Наноп физика и наноэлектроника“, 25–29 марта, 2005, Н. Новгород
- Всероссийская конференция „Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности“, 10–15 октября, 2005, Троицк
- XXIII Съезд по спектроскопии, 17–21 октября, 2005, Звенигород
- XLVIII научная конференция МФТИ, 25–26 ноября, 2005, Долгопрудный
- International Seminar „X-ray spectroscopy and plasma diagnostics from RESIK, RHESSI and SPIRIT instruments“, 6–8 December, 2005, Wroclaw, Poland
- Международная конференция „Физика Солнца“, 11–16 сентября, 2006, пос. Научный, Украина

- 36th COSPAR Scientific Assembly, 16–23 July, 2006, Beijing, China
- 233rd Symposium of the International Astronomical Union, 31 March– 4 April, 2006, Cairo, Egypt
- XI международный Симпозиум „Нанопфизика и наноэлектроника“, 10–14 марта, 2007, Н. Новгород
- Конференция „Солнце: активное и переменное“, 2–8 сентября, 2007, пос. Научный, Украина
- XVIII Конференция „Фундаментальная атомная спектроскопия“, 22–26 октября, 2007, Звенигород
- XII международный Симпозиум „Нанопфизика и наноэлектроника“, 10–14 марта, 2008, Н. Новгород
- International Coronal Workshop „After Eclipse“, Gorno-Altaysk, 4–6 August, 2009
- Рабочее совещание „Рентгеновская оптика — 2008“, 6–9 октября, 2008, Черногловка
- XIII международный симпозиум „Нанопфизика и наноэлектроника“, 16–20 марта, 2009, Н. Новгород
- SPIE conference 2009

и опубликованы в ведущих отечественных и международных рецензируемых журналах (12 публикаций).

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. На основе разработанных методик проведены измерения характеристик элементов рентгеновской оптики для аппаратуры ТЕСИС спутника КОРОНАС-Фотон. Эффективность отражения зеркала на

длине волны  $\lambda = 8.42 \text{ \AA}$  составила 10%, ширина кривой качания — 3 угл. мин., чувствительность детектора — 30 отсчетов АЦП на фотон.

2. На основе разработанной методики обработки полученных спектрогелиограмм создан каталог спектральных линий диапазона 176–207  $\text{\AA}$ , наблюдавшихся в солнечной вспышке класса M5.6 16.09.2001 г. В каталоге приводится 65 линий, предложена идентификация 51-й линии, большинство линий принадлежат ионам Fe X–Fe XIII. Для линий приводятся длина волны, относительная интенсивность и ширина линии.
3. В активных областях впервые установлено существование горячей ( $T \sim 5 \div 15 \text{ MK}$ ) плазмы и обнаружены „характерные“ существенно разные температурные распределения вещества (дифференциальная мера эмиссии). Показана существенная роль „промежуточной“ плазмы с  $T \sim 4 \div 10 \text{ MK}$  в долгоживущих вспышечных событиях, обнаруженных в эксперименте СПИРИТ. Измерена электронная плотность плазмы с  $T \sim 1 - 3 \text{ MK}$  в мощнейших солнечных вспышках, составившая  $n_e = (1.6 \div 8) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ .

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, приложения и списка литературы, содержащего 80 наименований. Общий объем диссертации составляет 149 страниц, включая 47 рисунков и 16 таблиц.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту и описана структура диссертации.

Глава I посвящена экспериментальной аппаратуре ФИАН на спутниках КОРОНАС. Дается описание рентгеновских спектрогелиографов и ВУФ

спектрогелиографов на спутниках КОРОНАС-Ф и КОРОНАС-Фотон, описываются методика и результаты калибровки оптических элементов спектрогелиографов.

В разделе 1.1 дается описание рентгеновского спектрогелиографа Mg XII, приводятся методика и результаты калибровок оптических элементов спектрогелиографа — кристаллического фокусирующего зеркала и детектора изображений на основе ПЗС-матрицы. Основные результаты калибровок опубликованы в [A3].

В разделе 1.2 дается описание ВУФ спектрогелиографов. Приводится методика и результаты калибровок оптических элементов ВУФ спектрогелиографов и результат проверки калибровки на основе зарегистрированных спектров. Измерения спектральных характеристик многослойной оптики приводятся в работах [A2, A5], проверка калибровки ВУФ спектрогелиографа на основе зарегистрированных данных дана в [A4].

Глава II посвящена методике спектральной и фотометрической обработки спектрогелиограмм, полученных в эксперименте СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф. В разделе 2.1 приведена методика вычитания фона в изображениях, полученных рентгеновским спектрогелиографом Mg XII. На изображениях Mg XII кроме полезного сигнала (изображение солнечной короны в  $\lambda = 8.42 \text{ \AA}$ ), присутствует фон, не связанный с излучением Солнца. Фон состоит из обычного темнового тока ПЗС-матрицы и т.н. „нагара“, вызванного радиационным повреждением ПЗС-матрицы. Величина фона может превышать величину полезного сигнала в 10 и более раз. Разработана методика и написано ПО для удаления фона из изображения. Методика основана на сравнении рабочего и „темнового“ (снятого при закрытой входной шторке) кадров спектрогелиографа Mg XII. Пример исходного, фонового и очищенного изображений приведен на рис. 1.

В разделе 2.2 описаны методики обработки спектрогелиограмм, полученных ВУФ-спектрогелиографом аппаратуры СПИРИТ. ВУФ-

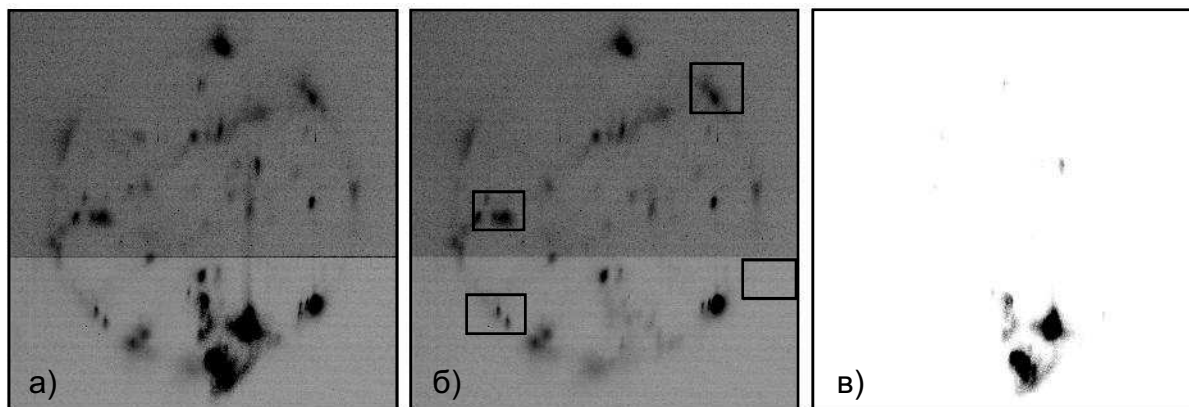


Рисунок 1: Вычитание фона на спектрогелиограмме Mg XII: а) — исходный рабочий кадр, б) — темновой кадр, подобранный для данного рабочего, в) — очищенный рабочий кадр

спектрогелиограмма представляет собой последовательность монохроматических изображений Солнца, сдвинутых одно относительно другого вдоль направления дисперсии, т.е. свертку пространственной и спектральной информации. Если на солнечном диске присутствует компактный и интенсивный источник излучения, на спектрогелиограмме ему соответствует линия, скан вдоль которой является классическим спектром излучения источника. Для выделения спектра интересующего объекта необходимы следующие этапы обработки спектрогелиограммы: вычитание фона на спектрогелиограмме, поворот, выделение спектра интересующего объекта, привязка шкалы длин волн, чистка полученного спектра. Были разработаны методики и написано ПО, обеспечивающее указанную обработку. Для выделения спектра и привязки шкалы длин волн интересующего объекта была разработана оригинальная методика, основанная на геометрической модели спектрогелиографа. В соответствии с ней для точки с заданными координатами на диске Солнца рассчитывается ее положение на спектрогелиограмме для набора длин волн. Выбирая точку на диске Солнца, положение которой соответствует исследуемой области, находим привязку шкалы длин волн к координатам на спектрогелиограмме. Для извлечения спектра сканируем спектрогелиограмму вдоль рассчитанных

координат. В полученном спектре все еще присутствует фон, который состоит из „белого поля“ ПЗС-матрицы и засветок, вызванных падающим излучением. Для нахождения фона из полученного спектра исключаются сильные спектральные линии, затем оставшийся сигнал фильтруется при помощи Фурье-фильтра. Полученный отфильтрованный сигнал считается фоном и вычитается из исходного спектра. Спектры, полученные при помощи описанных методик использовались для дальнейшего анализа.

Глава III посвящена составлению каталога спектральных линий диапазона 176–207 Å, наблюдавшихся во вспышке. Каталог спектральных линий составлен на основе спектра вспышки рентгеновского класса M5.6, наблюдавшейся аппаратурой СПИРИТ 16.09.2001. Максимум вспышки был в 03:53 UT (время максимума и класс вспышки определены по данным GOES); аппаратура СПИРИТ зарегистрировала вспышку на фазе спада вблизи максимума.

В разделе 3.1 описывается методика определения параметров спектральных линий (их длины волны, интенсивности, ширины). В разделе 3.2 обсуждается отождествление спектральных линий. Всего в спектральном диапазоне наблюдается 65 спектральных линий, предложена идентификация 51-й линии. При отождествлении учитывалось соответствие экспериментально измеренных длин волн теоретическим, наличие компонент тонкой структуры в спектре, для определения горячих „вспышечных“ линий использовались спектры активных областей, зарегистрированных в близкие моменты времени. Каталог приводится в приложении. Для линий указаны измеренная длина волны, пиковая интенсивность и ширина на полувисоте.

Каталог спектральных линий опубликован в работе [А6].

В Главе IV приводятся методика и результаты диагностики плазмы структур солнечной короны, по данным наблюдений спектрогелиографов аппаратуры СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф.

В разделе 4.1 дано введение к главе IV. Описан основной подход, ис-



пользуемый для расчета спектрально-мощностных характеристик излучения плазмы солнечной короны. Описываются основные подходы к определению температуры и плотности корональной плазмы. Перечислены основные космические спектроскопические эксперименты и полученные в них результаты.

В разделе 4.2 приводятся методика и результаты определения плотностей для разных структур солнечной короны по отношению спектральных линий ионов Fe XI–Fe XIII диапазона 176–207 Å. Плотность измерена для областей спокойного Солнца, активных областей и, впервые, мощнейших солнечных вспышек. Плотность для областей спокойного Солнца составила  $(3 \div 6) \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Для активных областей плотность составила  $(0.6 \div 1.6) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Плотность в высокотемпературной области над лимбом составила  $8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ . Плотность во вспышках находится в диапазоне  $(1.6 \div 8) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , при этом, плотность полученная по линиям Fe XII в большинстве случаев значительно выше плотности по другим ионам и часто превышает  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ , что может быть связано с неточностями в атомных данных для иона Fe XII. Систематических различий в плотностях, измеренных для одного объекта по разным парам линий, кроме завышенного значения плотности по линиям иона Fe XII во вспышках, не обнаружено. Различие в плотностях для одного объекта может свидетельствовать о наличии сильных неоднородностей в распределении плотности в плазме исследуемого объекта. Основные результаты опубликованы в работе [A4].

В разделе 4.3 приводятся методика и результаты определения температурного состава (дифференциальной меры эмиссии, ДМЭ) плазмы различных структур солнечной короны по наблюдениям ВУФ спектрогелиографа диапазона 280–330 Å аппаратуры СПИРИТ. ДМЭ определена для вспышек класса X и M, зарегистрированных на разных фазах развития (всего использовалось 20 различных спектров), а также для ряда активных областей. Анализ рассчитанных ДМЭ привел к следующим результатам: наблюдалось 4 типа активных областей с существенно различными

„характерными“ распределениями ДМЭ, установлено существование горячей плазмы  $T \sim 10^7$  К в активных областях; показано существенное количество горячей плазмы во вспышках (с мерой эмиссии на порядок больше, чем холодной, с  $T \sim 10^6$  К); обнаружено подобие ДМЭ вспышек разных классов на стадиях затухания. На основе рассчитанных ДМЭ проведено моделирование спектров в диапазоне 280–330 Å; сравнение зарегистрированных и модельных спектров позволило выявить „проблемные линии“.

В разделе 4.4 описывается методика определения температурного состава и пространственных распределений горячей корональной плазмы на основе рентгеновских данных, полученных на спутниках КОРОНАС-Ф, GOES, RHESSI. Анализ одновременных рентгеновских данных, полученных спектрогелиографом Mg XII (8.42 Å) и мониторами GOES (0.5–4 и 1–8 Å) позволил определить температурный состав „горячей“ ( $T > 2$  МК) корональной плазмы, показана существенная роль „промежуточной“ ( $T \sim 4 \div 10$  МК) плазмы во время вспышечных событий. Моделирование пространственных распределений температуры и плотности во вспышке проведено на основе монохроматических изображений, полученных спектрогелиографом Mg XII. Показано, что плотность во вспышке увеличивается незначительно и достигает величины  $\sim 2.5 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>, что соответствует плотности окружающей короны. Температура увеличивается от 4-х МК на периферии вспышечной области до 20 МК в ее центре. Верификация полученных характеристик плазмы проведена при помощи сравнения рассчитанного спектра излучения с экспериментально измеренным на американском спутнике RHESSI. Результаты диагностики горячей корональной плазмы приведены в [A7].

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

В приложении приведен каталог спектральных линий диапазона 176–207 Å, зарегистрированных во вспышке класса M5.6. Каталог содержит 65 спектральных линий, для 51-й из них предложена идентификация. Для

линий указаны измеренная длина волны, пиковая интенсивность и ширина линии.

## Основные результаты работы

1. Проведены калибровки элементов рентгеновской оптики телескопов и спектрогелиографов аппаратуры ТЕСИС для спутника КОРОНАС-ФОТОН. Измерены эффективность отражения кристаллического зеркала на длине волны  $8.42 \text{ \AA}$ , спектральные функции пропускания многослойных фильтров вблизи  $132 \text{ \AA}$ , чувствительность детекторов на основе ПЗС-матриц в спектральных диапазонах  $8.42, 132 \text{ \AA}$ , оценена радиационная стойкость детекторов. Измерены спектральные характеристики отражения многослойных рентгеновских зеркал нормального падения в диапазонах  $132, 171, 304 \text{ \AA}$ .
2. Разработана методика и написано специализированное ПО для первичной обработки спектрогелиограмм, полученных аппаратурой СПИРИТ. Разработаны методики для вычитания фона на спектрогелиограммах, восстановления поврежденных участков спектрогелиограммы, получения спектров интересующих объектов, очистки полученных спектров.
3. Разработана методика для определения параметров и отождествления спектральных линий, полученных по ВУФ-спектрогелиограммам эксперимента СПИРИТ
4. Составлен каталог спектральных линий диапазона  $176\text{--}207 \text{ \AA}$ , наблюдавшихся в солнечной вспышке рентгеновского класса М5.6. Каталог содержит 65 спектральных линий, предложена идентификация 51-й линии.
5. Проведена диагностика плазмы в различных структурах солнечной короны. Измерена плотность плазмы с температурой  $T \sim 1 \div 3 \text{ МК}$

в областях спокойного Солнца, активных областях и, впервые, — в мощнейших солнечных вспышках. Плотность областей спокойной короны и активных областей соответствует плотности „спокойной“ короны и составляет  $2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , в областях вспышек достигает  $8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Проведена диагностика температуры в активных областях и солнечных вспышках. Показано существование горячей плазмы ( $T \sim 10 \text{ МК}$ ) в активных областях, обнаружены „характерные“ существенно разные температурные распределения плазмы (дифференциальная мера эмиссии). Обнаружено подобие температурного состава вспышек разной мощности. Измерены пространственные распределения температуры и плотности в долгоживущих вспышечных событиях. Обнаружена существенная роль „переходной“ плазмы ( $T \sim 4 \div 10 \text{ МК}$ ) в энергобюджете долгоживущих вспышечных событий

**Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:**

- A1. *S.V. Kuzin, S.A. Bogachev, I.A. Zhitnik, A.A. Pertsov, A.P. Ignatiev, A.M. Mitrofanov, V.A. Slemzin, S.V. Shestov, N.K. Sukhodrev, O.I. Bugaenko* TESIS experiment on EUV imaging spectroscopy of the Sun // *Advances in Space Research*, V. 43, Issue 6, p. 1001-1006, 2009
- A2. *Вишняков Е. А., Медников К. Н., Рагозин Е. Н., Рева А. А., Ульянов А. С., Шестов С. В.* Измерение спектров отражения многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области спектра при помощи широкополосного лазерно-плазменного источника излучения // *Квантовая электроника*, Т. 39, № 5, С. 474–480, 2009
- A3. *Кузин С. В., Шестов С. В., Перцов А. А., Рева А. А., Лей Женг, Идонг Жао.* Калибровки рентгеновского спектрогелиографа на дли-

ну волны 0.84 нм проекта ТЕСИС // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 7, С. 51–54, 2009

- A4. *Шестов С. В., Урнов А. М., Кузин С. В., Житник И. А., Богачев С. А.* Диагностика электронной плотности плазмы структур солнечной короны по линиям ионов Fe XI–Fe XIII диапазона 176–207 Å в эксперименте СПИРИТ/КОРОНАС-Ф // Письма в АЖ, Т. 35, № 1, С. 50–62, 2009
- A5. *Кузин С.В., Шестов С.В., Перцов А.А., Рева А.А., Зуев С.Ю., Лопатин А.Я., Лучин В.И., Х. Жоу, Т. Хуо.* Спектральные калибровки фильтров и детекторов солнечного телескопа на диапазон 13.2 нм проекта ТЕСИС // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 7, С. 19–23, 2008
- A6. *Шестов С. В., Боженков С. А., Житник И. А., Кузин С. В., Урнов А. М., Бейгман И. Л., Горяев Ф. Ф., Толстихина И. Ю.* Солнечные спектры крайнего ВУФ диапазона, полученные в ходе эксперимента СПИРИТ на борту КОРОНАС-Ф. II Каталог линий в области 176–207 Å // Письма в АЖ, Т. 34, № 1, С. 38–57, 2008
- A7. *Урнов А. М., Шестов С. В., Богачев С. А., Горяев Ф. Ф., Житник И. А., Кузин С. В.* О пространственно-временных характеристиках и механизмах образования мягкого рентгеновского излучения в солнечной короне // Письма в АЖ, Т. 33, № 6, С. 446–462, 2007
- A8. *Житник И. А., Кузин С. В., Урнов А. М., Богачев С. А., Горяев Ф. Ф., Шестов С. В.* Рентгеновская и ВУФ-диагностика активных плазменных образований с помощью спектрогелиографа РЕС в эксперименте СПИРИТ на ИСЗ КОРОНАС-Ф // *Астрономический Вестник*, Т. 40, № 4, С. 299-309, 2006
- A9. *Ахсахалян А. А., Ахсахалян А. Д., Клюенков Е. Б., Салащенко Н. Н., Харитонов А. И., Чхало Н. И., Бугаенко О. И., Кузин С. В.,*

*Перцов А. А., Шестов С. В.* Стенд для исследования фокусирующих свойств двоякоизогнутых рентгеновских зеркал // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 7, С. 79–81, 2007

A10. *Веселовский И. С., Дмитриев А. В., Житник И. А., Жуков А. Н., Зельдович М. А., Кузин С. В., Наумкин А. А., Персианцев И. Г., Рязанов А. Ю., Шугай Ю. С., Яковчук О. С., Богачев С. А., Шестов С. В.* Глобальные изменения и асимметрия Солнца в период экстремально высокой активности в октябре-ноябре 2003 г. // *Астрономический вестник*, Т. 39, №3, С. 195–201, 2005

A11. *Ермолаев Ю. И., Зеленый Л. М., Застенкер Г. Н., ... Шестов С. В., ... (49 авторов)* Год спустя: Солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // *Геомагнетизм и Аэрономия*, № 6, С. 723–763, 2005

A12. *Ермолаев Ю. И., Зеленый Л. М., Застенкер Г. Н., ... Шестов С. В., ... (52 автора)* Солнечные и гелиосферные возмущения, приведшие к сильной магнитной буре 20 ноября 2003 года // *Геомагнетизм и Аэрономия*, № 1, С. 23–50, 2005

## Список цитируемой литературы

1. *Шкловский, И. С.* Физика солнечной короны / И. С. Шкловский. — М.: Физматгиз, 1962.
2. *Гибсон, Э.* Спокойное Солнце / Э. Гибсон. — М.: Мир, 1977.
3. *Phillips, K. J. H.* The Guide to the Sun / K. J. H. Phillips. — Cambridge Univ. Press, 1992.
4. *Binello, A. M.* Atomic data from the IRON Project. XXV. Electron impact excitation of fine-structure transitions in the ground configuration

- of Fe XII / A. M. Binello, H. E. Mason, P. J. Storey // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. — 1998. — Vol. 127. — Pp. 545–553.
5. Space Weather / Ed. by P. Song, H. J. Singer, G. L. Siscoe. — American Geophysical Union, 2001.
  6. An EUV imaging spectrograph for high-resolution observations of the solar corona / W. M. Neupert, G. L. Epstein, R. J. Thomas, W. T. Thompson // *Solar Physics*. — 1992. — Vol. 137. — Pp. 87–104.
  7. The soft X-ray polychromator for the Solar Maximum Mission / L. W. Acton, M. L. Finch, C. W. Gilbreth et al. // *Solar Physics*. — 1980. — Vol. 65. — Pp. 53–71.
  8. Extreme ultraviolet spectroheliograph ATM experiment S082A / R. Tousey, J.-D. F. Bartoe, G. E. Brueckner, J. D. Purcell // *Applied Optics*. — 1977. — Vol. 16. — Pp. 870–878.
  9. The soft X-ray telescope for the SOLAR-A mission / S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner et al. // *Solar Physics*. — 1991. — Vol. 136. — Pp. 37–67.
  10. EIT: Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope for the SOHO Mission / J.-P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud et al. // *Solar Physics*. — 1995. — Vol. 162. — Pp. 291–312.
  11. *Ораевский, В.* / В. Ораевский, И. Собельман // *Письма в астрон. журн.* — 2002. — Vol. 28. — P. 457.
  12. The Hinode (Solar-B) Mission: An Overview / T. Kosugi, K. Matsuzaki, T. Sakao et al. // *Solar Physics*. — 2007. — Vol. 243. — Pp. 3–17.
  13. *Kaiser, M. L.* The STEREO mission: an overview / M. L. Kaiser // *Advances in Space Research*. — 2005. — Vol. 36. — Pp. 1483–1488.

14. Trace — The transition region and coronal explorer / K. Strong, M. Bruner, T. Tarbell et al. // *Space Science Reviews*. — 1994. — Vol. 70. — Pp. 119–122.
15. Patchett, B. E. The coronal diagnostic spectrometer - A solar EUV experiment for the SOHO mission / B. E. Patchett, R. A. Harrison, E. C. Sawyer // *Journal of the British Interplanetary Society*. — 1990. — Vol. 43. — Pp. 181–184.
16. SPIRIT X-ray telescope/spectroheliometer results / Ed. by J. Kuijpers. — Vol. 506 of *ESA Special Publication*, 2002.
17. Dere, K. P. Spectral lines observed in solar flares between 171 and 630 Angstroms / K. P. Dere // *The Astrophysical Journal*. — 1978. — Vol. 221. — Pp. 1062–1067.
18. TESIS experiment on EUV imaging spectroscopy of the Sun / S. V. Kuzin, S. A. Bogachev, I. A. Zhitnik et al. // *Advances in Space Research*. — 2009. — Vol. 43. — Pp. 1001–1006.