

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

---

На правах рукописи

УДК № 523.9–739; 533.9.082.5

**Рева Антон Александрович**

**Исследование компактных горячих источников в короне  
Солнца по изображениям в дублете Mg XII 8.42 Å**

Специальность 01.04.05 – оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

**Работа выполнена** в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
Кузин Сергей Вадимович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
проф. Веселовский Игорь Станиславович (НИИЯФ МГУ)  
доктор физико-математических наук  
Струминский Алексей Борисович (ИКИ  
РАН)

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

**Защита состоится:**

3 декабря 2012 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета  
Д 002.023.03 ФИАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53

**С диссертацией можно ознакомиться** в библиотеке ФИАН

**Автореферат разослан:** " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2012 г.

**Ученый секретарь диссертационного совета**

д.ф.-м.н.



А. С. Шиканов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Солнечной короной называется внешняя часть атмосферы Солнца. Для нее характерны высокая температура (более 1 МК) и низкая концентрация частиц ( $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$ ). Именно в короне происходят основные явления солнечной активности: корональные выбросы масс и вспышки. Эти процессы могут воздействовать на ионосферу, магнитосферу и верхнюю атмосферу Земли. Например, корональные выбросы масс, достигающие Земли, возмущают геомагнитную обстановку и могут вызвать неполадки в работе космической и наземной связи, электронной аппаратуры спутников и пр. При этом многие корональные явления до конца не изучены и поэтому не поддаются прогнозированию. С другой стороны, в физике солнечной короны есть нерешенные фундаментальные вопросы. В частности, неизвестны механизмы нагрева короны до столь высоких температур. Для корональной плазмы характерны уникальные условия, которые нельзя получить в современных лабораториях: большие пространства, высокая температура, низкая концентрация вещества. Спектры короны содержат линии высокозарядных ионов. По этим спектрам можно измерить и уточнить атомные данные: вероятности переходов, сечения взаимодействия, их зависимости от температуры и концентрации электронов. Эти данные необходимы для построения точной модели атомных спектров. Таким образом, исследования солнечной короны имеют фундаментальное значение, они важны для физики плазмы, атомной спектроскопии, астрофизики и имеют практическое значение для вопросов солнечно-земных связей.

В короне Солнца горячей считается плазма с температурой более 5 МК. Нагрев до таких температур происходит из-за процессов интенсивного энерговыделения. Исследование этих процессов важно для понимания причин энерговыделения, измерения физических условий, при которых эти процессы происходят, а также для создания полной картины явлений

происходящих в солнечной короне.

Горячая плазма занимает небольшую часть поверхности Солнца. Ее количество зависит от того, в какой фазе своего цикла находится Солнце. В период максимума солнечной активности горячая плазма почти всегда присутствует в короне Солнца, в минимуме активности она может не наблюдаться сутками. Горячая плазма в основном встречается на низких широтах во вспышках и активных областях. Размер горячих объектов лежит в диапазоне от нескольких тыс. км (микровспышки) до нескольких сотен тыс. км (горячие петли, “пауки”). Длятся такие события от нескольких минут до нескольких дней. Для компактных горячих явлений место выделения энергии и нагрева плазмы совпадают, поэтому их исследование важно для понимания механизмов нагрева короны.

Чтобы построить модель процессов, порождающих горячую плазму, необходимы надежные экспериментальные данные об условиях, в которых они происходят. Наиболее информативными для наблюдения короны, с точки зрения современной экспериментальной физики, вакуумный ультрафиолетовый (ВУФ) и мягкий рентгеновский (МР) диапазоны спектра. В ВУФ диапазоне спектра солнечной короны на  $1 \text{ \AA}$  приходится примерно одна интенсивная холодная (1 МК) линия, плотность горячих линий на порядок меньше. Спектральная ширина пропускания многослойных зеркал и фильтров современных ВУФ телескопов составляет десятки  $\text{\AA}$ , что не позволяет выделить монохроматические горячие линии. Поэтому в ВУФ диапазоне даже на сравнительно узкополосных изображениях, содержащих излучение горячей плазмы, всегда есть холодная. Сложности с построением изображения горячей плазмы есть и у телескопов скользящего падения МР диапазона (SXT/Yohkoh [1, 2] и XRT/Hinode [3, 4]). Они строят изображения в широком спектральном ( $2 - 40 \text{ \AA}$ ) и температурном ( $>2 \text{ МК}$ ) диапазонах. Чтобы получить изображение горячей плазмы по данным этих телескопов, нужна специальная обработка. Несмотря на то, что вышеперечисленными приборами можно исследовать горячую плазму,

прямые изображения горячей плазмы, полученные без предварительной обработки, устранили бы ошибки, вызванные применяемыми методами, и уменьшили бы погрешности результатов.

В ФИАН для регистрации высокотемпературной солнечной плазмы был разработан спектрогелиограф Mg XII [5]. Спектрогелиограф работал в составе комплекса приборов СПИРИТ [6, 7, 8] на борту спутника КОРОНАС-Ф [9](2001 – 2003 гг) и в составе комплекса приборов ТЕСИС [10] на борту спутника КОРОНАС-ФОТОН [11](2009 г). Спектрогелиограф строил монохроматические изображения короны Солнца в Ly- $\alpha$  линии водородоподобного иона Mg XII 8.42 Å. Этот ион возбуждается при температурах более 5 МК, что делает спектрогелиограф Mg XII отличным маркером горячей плазмы. Другой особенностью спектрогелиографа является его высокая дисперсия. Спектрального разрешения спектрогелиографа достаточно для того, чтобы разрешить тонкую структуру Ly- $\alpha$  линии иона Mg XII 8.42 Å. Уникальный температурный отклик и диспергирующие свойства делают спектрогелиограф удобным прибором для комплексного исследования горячей плазмы.

### **Цели работы**

Работа посвящена исследованию компактных горячих объектов короны Солнца с помощью спектрогелиографа Mg XII. Основными целями работы являлось:

- разработка методы получения спектров из изображений спектрогелиографа Mg XII.
- исследование значения отношения компонент тонкой структуры Ly- $\alpha$  линии водородоподобного иона Mg XII 8.42 Å.
- разработка методы диагностики плазмы по изображениям спектрогелиографа Mg XII.

- исследование с помощью разработанных методов свойств компактных горячих источников, наблюдаемых спектрогелиографом Mg XII.

### **Научная новизна**

С помощью спектрогелиографа Mg XII был выделен новый класс явлений короны Солнца — горячие рентгеновские точки (ГРТ) — компактные (не более 5 тыс. км) горячие ( $T > 5$  МК) источники рентгеновского излучения с малым временем жизни (2 мин – 4 ч).

Впервые получена большая статистика и высокое временное разрешение при измерении отношения интенсивностей компонент тонкой структуры Ly- $\alpha$  линии водородоподобного иона Mg XII. Измерено более 2000 спектров для 169 событий с временным разрешением 40 – 120 секунд.

Впервые по телескопическим изображениям, не производя предварительной регуляризации и искусственного ограничения температурного диапазона, удалось восстановить ДМЭ, в которых нет нефизичной высокотемпературной компоненты.

### **Научная и практическая ценность**

Измеренные физические характеристики ГРТ и горячей плазмы в активных областях (температура, мера эмиссии, концентрация электронов, тепловая энергия, мощность нагрева, пространственный и временной масштаб и др.) могут быть использованы для построения моделей нагрева солнечной короны.

Разработанный генетический алгоритм диагностики дифференциальной меры эмиссии предполагается использовать для анализа данных планируемых космических экспериментов. Его также можно использовать для анализа данных уже существующих экспериментов: XRT/Hinode [3, 4], AIA/SDO [12] и др.

Показано, что аномальное значение отношения интенсивностей компонент тонкой структуры Ly- $\alpha$  нельзя объяснить протонными столкнове-

ниями, сателлитными линиями и резонансным рассеянием. Качественно показано, что эффект может вызвать возбуждение уровней электронными пучками. Если удастся подтвердить эту гипотезу, то эффект можно использовать для диагностики потока электронных пучков.

Результаты диссертации используются в научных исследованиях, проводимых ФИАН совместно с рядом европейских институтов в рамках исследовательских проектов СОТЕРИЯ и ИХИРОС 7-й Рамочной программы Европейской комиссии.

## **Личный вклад автора**

Автор участвовал в создании комплекса приборов ТЕСИС [10] для спутника КОРОНАС-ФОТОН [11]. Это включало в себя тестирование кристаллического зеркала для спектрогелиографа Mg XII [13], тестирование зеркал для ВУФ телескопов [14], тестирование фильтров и детекторов [15], а также непосредственную сборку и юстировку оптических схем. Автор участвовал в разработке программного обеспечения для предварительной обработки данных эксперимента ТЕСИС [16]. Автором самостоятельно были выполнены следующие работы:

- разработан автоматический метод очистки изображений спектрогелиографа Mg XII, работавшего в составе комплекса СПИРИТ
- разработан метод получения спектра Ly- $\alpha$  линии иона Mg XII из изображений спектрогелиографа.
- по измеренным спектрам проведена диагностика температуры, меры эмиссии и концентрации ГРТ
- разработан метод автоматического поиска ГРТ на изображениях спектрогелиографа
- проведено исследование энергетических характеристик ГРТ

- выполнено сравнение ГРТ с другими явлениями микроактивности: микровспышками, рентгеновскими яркими точками и нановспышками.
- для 169 зарегистрированных ГРТ измерено значение отношения интенсивностей компонент тонкой структуры Ly- $\alpha$  линии водородоподобного иона Mg XII 8.42 Å. Исследованы возможные причины эффекта аномального отношения интенсивности компонент тонкой структуры.
- реализован генетический алгоритм с применением данных спектрогелиографа Mg XII. Метод был применен к набору каналов SXT + EIT + Mg XII и XRT + EIT + Mg XII. Проведено теоретическое исследование точности генетического алгоритма

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

- Обнаружение и исследование нового класса объектов в короне Солнца — горячих рентгеновских точек (ГРТ). Температура ГРТ лежит в интервале 5 – 50 МК, размер не превосходит 5 тыс. км, мера эмиссии  $10^{45} - 10^{48} \text{ см}^{-3}$ , концентрация электронов порядка  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Время жизни ГРТ составляет 5 – 100 минут и существенно превосходит ожидаемое время их охлаждения за счет теплопроводности. Тепловая энергия ГРТ составляет  $10^{28}$  эрг, мощность энерговыделения  $10^{27}$  эрг/с. Энерговыделение наблюдается в течение всего времени жизни ГРТ.
- Результаты измерения аномального отношения интенсивностей компонент тонкой структуры Ly- $\alpha$  линии водородоподобного иона Mg XII 8.42 Å по более чем 2000 спектрам. Измеренное значение отношения меняется в пределах 0.3 - 0.7, при точности измерения - 0.05. Это отличается от теоретического значения 0.5, получаемого в корональном приближении. В работе показано, что отклонение от теоретического



значения не может быть объяснено протонными столкновениями, сателлитными линиями и резонансным рассеянием внутри объема излучающей плазмы.

- Разработка нового метода детектирования высокотемпературной компоненты солнечной плазмы, основанного на данных спектрогелиографа Mg XII, который позволяет с высокой точностью регистрировать горячую плазму в активных областях и измерять ее физические характеристики: температура 10 МК, мера эмиссии порядка  $10^{48}$  см<sup>-3</sup>, концентрация электронов порядка  $10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Результаты показывают, что горячая плазма наблюдается в активных областях в течение нескольких дней, что значительно превосходит время охлаждения областей за счет теплоотдачи. Это свидетельствует о наличии энерговыделения в течение всего времени жизни активной области.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы доложены на всероссийских и международных конференциях:

- Рабочее совещание “Рентгеновская оптика – 200”, Черноголовка, 6-9 октября 2008 г
- XII международный Симпозиум “Наноп физика и наноэлектроника”, Н. Новгород, 10-14 марта 2008
- 51-ая Научная Конференция МФТИ, Москва-Долгопрудный, 28-30 ноября 2008
- XIII Международный Симпозиум “Наноп физика и наноэлектроника”, Н. Новгород, 16-20 марта 2009 г.
- European Symposium on Optics and Optoelectronics (ЕОО), Prague, Czech Republic, 20-23 April 2009

- International Coronal Workshop, The Sun: from active to quite. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 19-23 October 2009.
- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, Москва, 25-31 января 2010 г
- III Всероссийская молодежная школа-семинар “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва, 25-30 октября 2009г
- VII конференция молодых ученых посвященная дню космонавтики, ИКИ, 12-13 апреля 2010
- IV Школа-семинар “Инновационные аспекты фундаментальных исследований”, Москва-Звенигород, 14-18 ноября 2010 г
- International Workshop on Solar Physics “The Sun: from quite to active - 2011”. Moscow, August 29 - September 2
- Hinode-5 meeting, Cambridge, Massachusetts, USA, October 11-14 2011
- V Всероссийская молодежная конференция “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, ФИАН Москва, 14-16 ноября 2011
- Москва, ИКИ, IX Конференция молодых ученых “Фундаментальные и прикладные космические исследования” 12-13 апреля 2012
- UK, London. Spectroscopy of the dynaminc Sun, 18-20 April 2012.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 90 страниц текста, включая 38 рисунков и 2 таблицы. Список литературы включает 58 наименований.

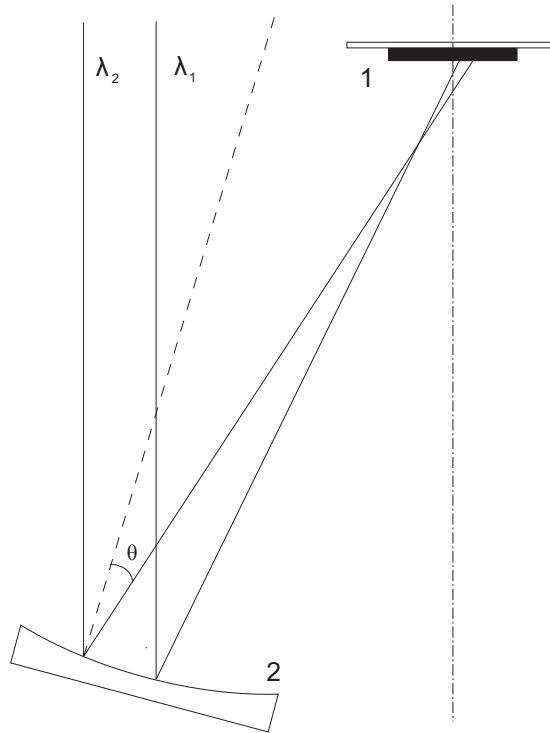


Рисунок 1: Схема спектрогелиографа Mg XII: 1 - ПЗС-матрица, 2 - сферическое кристаллическое зеркало

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В Главе I описывается спектрогелиограф Mg XII. Спектрогелиограф работал в составе комплекса приборов СПИРИТ [6, 7, 8] на борту спутника КОРОНАС-Ф [9] (2001 – 2003 гг) и в составе комплекса ТЕСИС [10] на борту спутника КОРОНАС-ФОТОН [11] (2009 г). Приборы строили монохроматические изображения солнечной короны на длине волны  $8.42 \text{ \AA}$ , которая излучается водородоподобным ионом Mg XII при температурах более 5 МК. Уникальный температурный отклик делает спектрогелиограф удобным прибором для изучения горячей плазмы короны Солнца.

В разделе 1.1 описывается устройство спектрогелиографа. Спектрогелиограф состоял из изогнутого кристаллического зеркала и ПЗС матрицы

(см. рис. 1). Зеркало фокусировало излучение за счет брэгговского отражения. Оптическая поверхность — плоскость среза кристалла — выбрана так, что угол брэгговского отражения близок к нормальному. Близкий к нормальному угол падения позволяет достичь высокого пространственного разрешения  $\approx 8''$ .

В разделе 1.2 описывается принцип работы спектрогелиографа. Длина волны падающих лучей и угол их отражения от зеркала связаны условием Брэгга-Вульфа. Апертура зеркала ограничивает диапазон углов падения лучей, и, следовательно, диапазон длин волн, которые отражаются от него — от зеркала может отражаться излучение в диапазоне от 8.40 до 8.44 Å. В спектре Солнца в этом интервале присутствует только дублет иона Mg XII:  $\lambda_1 = 8.4192$  Å и  $\lambda_2 = 8.4246$  Å. В условиях солнечной короны ширина линии определяется доплеровским уширением. При температуре 10 МК она составляет 0.003 Å. Таким образом, на изображениях спектрогелиографа присутствует излучение от 8.415 Å до 8.430 Å.

В разделе 1.3 описывается эффект дисперсии в спектрогелиографе. Т.к. угол отражения зависит от длины волны, то компоненты дублета Mg XII 8.42 Å будут отражаться от разных участков зеркала. Из-за сферической абберации зеркала лучи, отраженные от разных его участков, будут фокусироваться в разные участки ПЗС-матрицы. Т.е. разные длины волн фокусируются в разные участки ПЗС-матрицы — спектрогелиограф обладает дисперсией.

Изображения в разных компонентах сдвинуты друг относительно друга на  $\approx 5$  пикселей. Изображения спектрогелиографа это свертка пространственной и спектральных структур объектов. Для компактных объектов возможно извлечь спектр дублета из изображений и использовать его для диагностики параметров плазмы.

В разделе 1.4 приведены примеры изображений, получаемых спектрогелиографом. Изображения, полученные спектрогелиографом Mg XII (см. рис. 2), отличаются от изображений короны, полученных в широком спек-

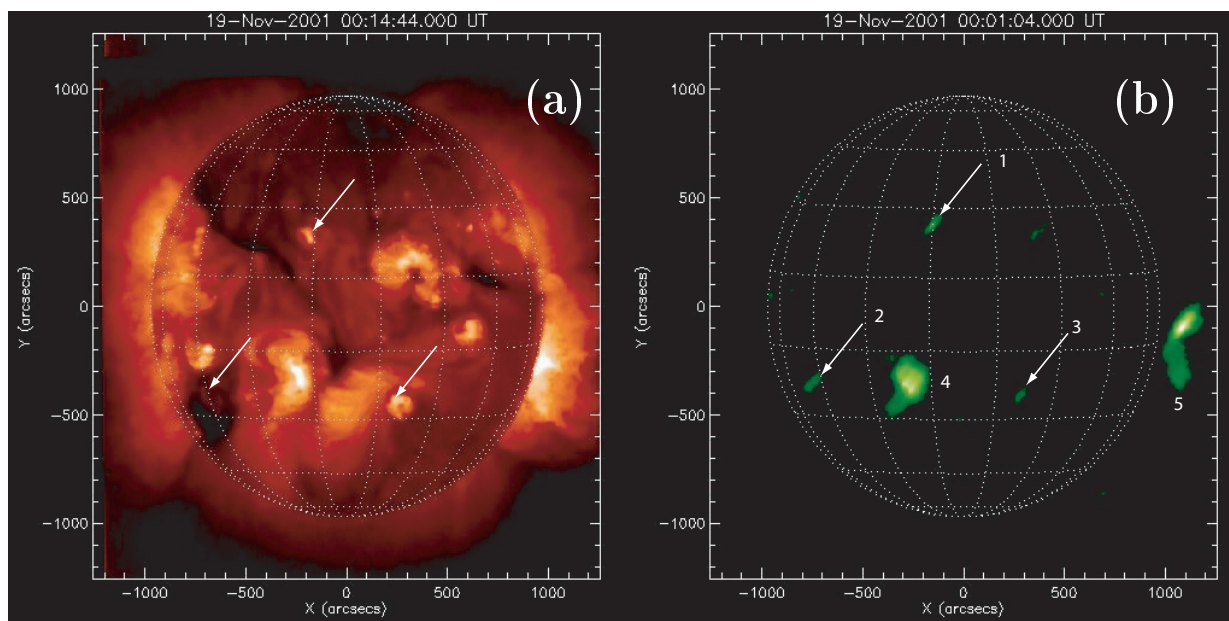


Рисунок 2: Изображения полученные с помощью SXT/*Yohkoh* (a) и спектрогелиографа Mg XII (b) в близкие моменты времени. 1, 2, 3 – горячие рентгеновские точки; 4, 5 – большие горячие структуры.

тральном интервале (XRT, SXT и EIT). На изображениях спектрогелиографа нет диска Солнца, и они состоят из отдельных изолированных горячих источников. За счет дисперсии изображения вытянуты в одном из направлений. Спектрогелиограф чувствителен только к горячей плазме, на его изображениях нет холодного фона (излучения плазмы с температурой менее 5 МК). Поэтому изображения спектрогелиографа является отличным маркер горячей плазмы солнечной короны.

Глава II посвящена исследованию нового класса явлений микроактивности Солнца — горячих рентгеновских точек (ГРТ) — выделенных на изображениях спектрогелиографа (см. рис. 2). ГРТ имеют малые размеры (не более 5 тыс. км), высокую температуру (более 5 МК) и малое время жизни (2 – 100 мин). Их исследование важно для понимания причин энерговыделения, измерения физических условий, при которых они происходят, а также для создания полной картины, явлений происходящих в солнечной короне.

В разделе 2.1 описываются экспериментальные данные, которые использовались для исследования ГРТ. Данные получены в период с 20 по 28 февраля 2002 года. В этот период времени спутник находился на бестеневых орбитах, и спектрогелиограф Mg XII получал изображения с интервалом от 40 до 120 секунд. Всего получено 8689 изображений, на которых обнаружено 169 ГРТ.

В разделе 2.2 описывается временная динамика ГРТ. Время жизни ГРТ лежит в интервале 2 – 100 мин. Максимум распределения времени жизни соответствует 10 минутам. ГРТ с временами жизни менее 2 минут и более 60 минут наблюдались 20 раз. Поток излучения в линии  $8.42 \text{ \AA}$  от отдельной ГРТ может достигать 5 % от потока всего Солнца в этой же линии, однако большинство наблюдавшихся ГРТ лежат ниже А-класса по классификации GOES.

В раздел 2.3 описана процедура определения температуры ГРТ. Если на изображении спектрогелиографа просуммировать сигнал в окрестности компактного объекта в направлении перпендикулярном направлению дисперсии, то получится спектр линии дублета иона Mg XII  $8.42 \text{ \AA}$ . В корональных условиях ширина линии определяется тепловым доплеровским уширением. Т.е. по ширине линии можно вычислить температуру объекта.

Для всех наблюдавшихся ГРТ измерена зависимость температуры от времени. Пиковая температура ГРТ лежит в диапазоне 5 – 50 МК. Максимум распределения пиковой температуры соответствует 12 МК. Пиковая температура ГРТ не зависит от ее пиковой интенсивности. Т.е. более яркие события необязательно более горячие. ГРТ достигают максимума интенсивности позже максимума температуры.

В разделе 2.4 описана процедура определения меры эмиссии и концентрации электронов ГРТ. Мера эмиссии изотермичного объекта — это произведение квадрата концентрации электронов на его объем. Интенсивность источника пропорциональна его мере эмиссии и температурно-

му отклику (функции, зависящей от температуры). Для ГРТ известны температура и интенсивность, а ее объем не превосходит объема пикселя на изображении. По температуре и интенсивности была определена мера эмиссии ГРТ: она меняется в интервале  $10^{45} - 10^{48} \text{ см}^{-3}$ . Используя значения меры эмиссии и оценку объема сверху, показано что концентрация электронов в ГРТ больше  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ , что выше значений для спокойной короны ( $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$ ).

В разделе 2.5 описана динамика характеристик ГРТ. Зависимость температуры, интенсивности и меры эмиссии ГРТ от времени можно разделить на два этапа: фазу роста и фазу спада. Фаза роста длится порядка 2 минут. Длительность фазы спада сравнима с временем жизни ГРТ. ГРТ можно разбить на две группы: плавно остывающие (10 – 20 минут) и быстро остывающие (порядка 2 минут). ГРТ первой группы составляют 39% событий, второй — 40%. Оставшиеся 21% это быстрые события с временем жизни порядка 2 минут, о временной динамике которых нельзя ничего сказать.

В разделе 2.6 исследуется пространственное распределение ГРТ. Показано, что ГРТ расположены в поясах активности Солнца. Сравнение изображений спектрогелиографа Mg XII с изображениями SXT/Yohkoh показало, что ГРТ либо расположены в основаниях петель активных областей, либо являются изолированными компактными структурами.

В разделе 2.7 оценены энергетические характеристики ГРТ. Тепловая энергия составляет порядка  $10^{28}$  эрг, полная выделившаяся энергия порядка —  $10^{30}$  эрг, и мощность энерговыделения порядка  $10^{27}$  эрг/с. Показано что, время охлаждения ГРТ за счет теплопроводности гораздо меньше ее времени жизни. Это значит, что на протяжении всей жизни ГРТ в ней выделяется энергия, поддерживающая высокую температуру.

В разделе 2.8 ГРТ сравниваются с другими явлениями микроактивности: микровспышками, рентгеновскими яркими точками (X-ray bright points, ХВР) и нановспышками. ГРТ существенно отличаются от ХВР

и нановспышек временем жизни, температурой и размером. ГРТ имеют большую меру эмиссии и электронную концентрацию, чем нановспышки. ГРТ отличаются от ХВР своим пространственным распределением по поверхности Солнца. ГРТ и микровспышки имеют одинаковый диапазон значений меры эмиссии, концентрации электронов и термической энергии. Также они имеют одинаковое пространственное распределение по поверхности Солнца (они сконцентрированы в поясах активности Солнца). Тем не менее, ГРТ имеют большее время жизни, более высокие температуры и меньшие размеры чем микровспышки. Таким образом, ГРТ это новое явление микроактивности Солнца, которое не наблюдалось раньше.

В разделе 2.9 рассматривается влияние турбулентности плазмы на точность измерений. Турбулентность повышает наблюдаемую доплеровскую температуру. При характерных для короны скоростях турбулентности (10 – 20 км/с) поправка к температуре меньше ошибки измерений, поэтому турбулентностью можно пренебречь.

Глава III посвящена проблеме аномального отношения интенсивностей компонент тонкой структуры Ly- $\alpha$  линии водородоподобных ионов. В корональном приближении отношение интенсивностей компонент тонкой структуры Ly- $\alpha$  линии водородоподобных ионов равно отношению их статистических весов (0.5) и не зависит от температуры и концентрации плазмы. В солнечных спектрах и в спектрах, полученных в лаборатории, наблюдается отклонение от теоретического значения (0.3 – 0.7).

В разделе 3.1 описаны экспериментальные данные. Для ГРТ можно измерить спектр Ly- $\alpha$  линии иона Mg XII 8.42 Å. Разрешения спектрогелиографа достаточно, чтобы различить компоненты тонкой структуры. Измерено более 2000 спектров Ly- $\alpha$  линии иона Mg XII 8.42 Å с временным разрешением 40 – 120 с.

В разделе 3.2 приводятся результаты измерений. Отношение интенсивностей меняется в интервале 0.3 – 0.7 (см. рис. 3). Среднее значение отношения (по всем спектрам) равно 0.54. Отношения интенсивностей ме-



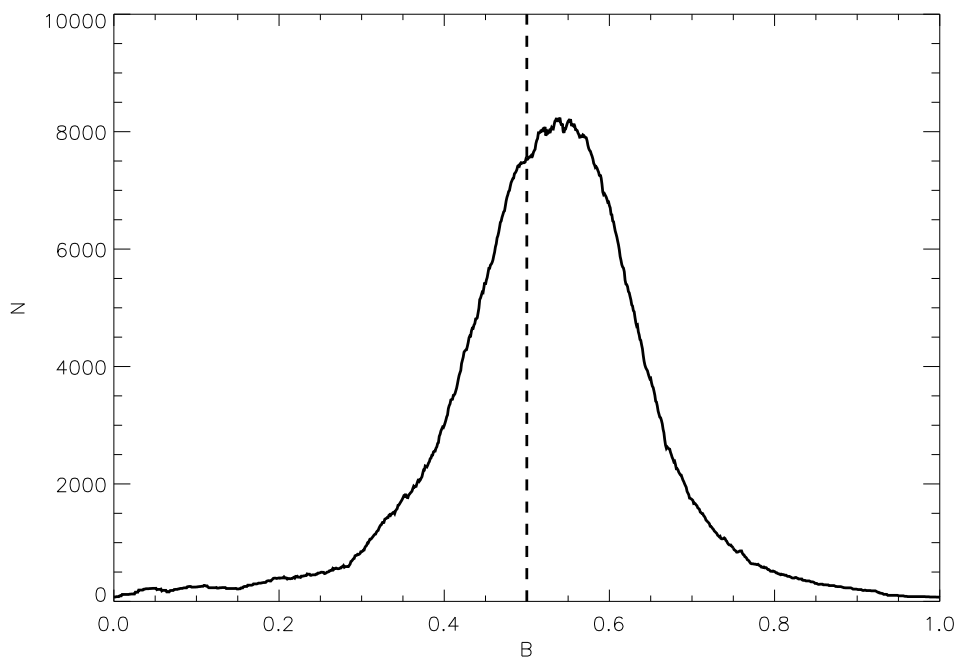


Рисунок 3: Взвешенная гистограмма отношения интенсивностей тонкой структуры линии  $8.42 \text{ \AA}$  ( $B$ ).

няется на протяжении жизни ГРТ и не зависит от температуры, меры эмиссии, интенсивности и концентрации электронов ГРТ.

В разделе 3.3 экспериментальные данные сравниваются с существующими теориями, объясняющими эффект. Показано, что наблюдаемый эффект нельзя объяснить протонными столкновениями, сателлитными линиями и резонансным рассеянием внутри объема излучающей плазмы. Качественно показано, что эффект может быть объяснен возбуждением ионов электронным пучком.

В разделе 3.4 кратко приводятся основные результаты исследования эффекта аномального отношения интенсивностей компонент тонкой структуры  $\text{Ly-}\alpha$  линии водородоподобного иона  $\text{Mg XII}$ : достоверно показано, что эффект действительно есть; его нельзя объяснить протонными столкновениями, сателлитными линиями и резонансным рассеянием внутри объема излучающей плазмы; эффект может быть вызван возбуждением ионов электронным пучком.

Глава IV посвящена восстановлению дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) горячих объектов по телескопическим изображениям.

В спектрах много монохроматических линий, поэтому спектроскопические данные дают хорошее температурное разрешение при восстановлении ДМЭ. Однако, у спектроскопических приборов есть недостатки: они либо обладают малым полем зрения — многие объекты не регистрируются, либо строят спектр всего Солнца — сложно выделить сигнал исследуемого объекта. Телескопические данные (набор изображений, полученных разными телескопами) уступают по качеству восстановления ДМЭ спектроскопическим: имеется всего несколько одновременных изображений, и они немонохроматичны. Однако, телескопы имеют широкое поле зрения, и из изображений легко выделить сигнал исследуемого объекта. Телескопические данные удобны для исследования быстрых сложно предсказуемых явлений, которые обычно не попадают в поле зрения спектроскопических приборов.

Чтобы восстановить ДМЭ, необходимо иметь набор изображений, чувствительных ко всему температурному диапазону. Основная проблема при восстановлении ДМЭ по телескопическим изображениям — это отсутствие покрытия высокотемпературного диапазона ( $T > 5$  МК). Данные спектрогелиографа решают эту проблему и позволяют диагностировать ДМЭ.

В разделе 4.1 рассматриваются основные методы восстановления ДМЭ по телескопическим данным: байесовский алгоритм, метод наименьших квадратов и генетический алгоритм. В работе был использован генетический алгоритм, потому что при малом числе каналов он дает наилучшее совпадение теоретических и экспериментальных потоков.

В разделе 4.2 анализируется активная область NOAA 11019, с помощью спектрогелиографа Mg XII на спутнике КОРОНАС-ФОТОН и телескопов EIT/SOHO, XRT/Hinode. В этой активной области с помощью спектрогелиографа горячая плазма наблюдалась в течении 9 дней. В восстановленной ДМЭ есть две компоненты: теплая ( $T \approx 2.5$  МК) и горячая

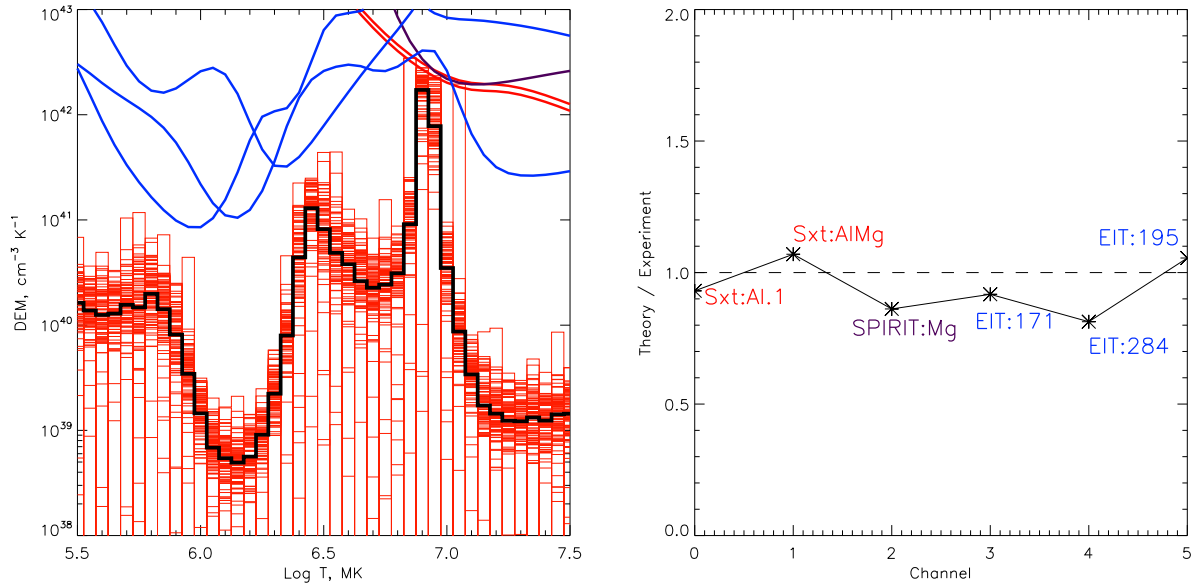


Рисунок 4: Слева: ДМЭ активной области с горячей плазмой. Справа: отношение потоков рассчитанных по восстановленной ДМЭ к экспериментальным потокам.

( $T \approx 10$  МК). Мера эмиссии горячей компоненты составляет  $2.5 \cdot 10^{47}$   $\text{cm}^{-3}$ , концентрация электронов  $5.5 \cdot 10^9$   $\text{cm}^{-3}$ . Оценка времени охлаждения за счет теплопроводности равна 7 мин, что существенно меньше времени жизни горячей компоненты. Это значит, что в этой активной области энергия выделялась в течение 9 дней.

В разделе 4.3 были проанализированы активные области, содержащие горячую плазму — в которых был сигнал на изображениях спектрогелиографа. Использовались данные телескопов EIT/SOHO, SXT/Yohkoh и спектрогелиографа Mg XII/КОРОНАС-Ф. В восстановленных ДМЭ есть теплая ( $T \approx 2.5$  МК) и горячая ( $T \approx 10$  МК) компоненты (см. рис. 4). Мера эмиссии горячей компоненты порядка  $10^{48}$   $\text{cm}^{-3}$ , концентрация электронов  $10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$ . Горячая компонента существует несколько суток, а время охлаждения за счет теплопроводности составляет порядка 10 мин. Это значит, что в активных областях энергия выделяется в течение нескольких дней.

Области, у которых нет сигнала на изображениях спектрогелиографа, не имеют горячей компоненты в восстановленных ДМЭ.

В разделе 4.4 анализируется работа генетического алгоритма, примененного к изображениям EIT, SXT(XRT) и Mg XII. Для этого по модельной ДМЭ рассчитываются потоки в каналах и к ним применяется генетический алгоритм. По различиям между восстановленной ДМЭ и модельной делаются выводы о работе алгоритма.

Показано, что метод чувствителен ко всем температурам в диапазоне  $\log T = 5.5 - 7.5$ . Чувствительность метода  $10^{-2}$ : при восстановлении изотермических ДМЭ возникают “крылья”, величина которых не превосходит  $10^{-2}$  от исходной ДМЭ. В районе  $\log T = 5.5 - 5.8$  метод дает нефизичные значения ДМЭ. Температурное разрешение метода 0.5 (по логарифмической шкале). Метод восстанавливает горячую плазму на фоне ДМЭ активной области, если ДМЭ горячей плазмы одного порядка с ДМЭ активной области. Метод хорошо восстанавливает ДМЭ холодной активной области.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией:

1. Обнаружены горячие рентгеновские точки. Измерены их время жизни (2 – 100 минут), температура (5 – 50 МК) и мера эмиссии ( $10^{45} - 10^{48} \text{ см}^{-3}$ ). Показано, что концентрация электронов в ГРТ больше  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Оценены их энергетические характеристики: тепловая энергия ( $10^{28}$  эрг), полная выделившаяся энергия ( $10^{30}$  эрг) и мощность нагрева ( $10^{27}$  эрг/с). Показано, что в ГРТ энергия выделяется в течение всего ее времени существования.
2. Для всех обнаруженных ГРТ измерен спектр Ly- $\alpha$  линии водородоподобного иона Mg XII 8.42 Å. Отношение интенсивностей компонент тонкой структуры этой линии меняется в пределах 0.3 – 0.7, что отличается от теоретического значения 0.5. Отличие нельзя объяснить протонными столкновениями, диэлектронными сателлитами или резонансным рассеянием внутри объем излучающей плазмы. Ка-

чественно показано, что отклонение может быть вызвано возбуждением ионов электронными пучками.

3. В работе реализован генетический алгоритм восстановления ДМЭ по телескопическим данным. Алгоритм получает физические решения без предварительной регуляризации и искусственного ограничения температурного диапазона.
4. Восстановлены ДМЭ активных областей содержащих горячую плазму. Показано, что в таких областях энергия выделяется в течение нескольких суток.

### **Публикации по теме диссертации**

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК, выделены жирным шрифтом:

1. **Спектральные калибровки фильтров и детекторов солнечного телескопа на диапазон 13.2 нм проекта ТЕСИС / С.В. Кузин, С.В. Шестов, А.А. Перцов, А.А. Рева, С.Ю. Зуев, А.Я. Лопатин, Лучин В.И., Х. Жоу, Т. Хуо // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2008. – № 7. – С. 19–23**
2. Применение элементов рентгеновской оптики в космическом эксперименте ТЕСИС / *С.В. Кузин, С.В. Шестов, А.А. Перцов, А.А. Рева, А.С. Ульянов* // Рабочее совещание “Рентгеновская оптика — 2008”, Черногловка. – 2008. – С. 53–54
3. Измерение спектров отражения многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области спектра при помощи широкополосного лазерплазменного источника излучения / *Е.А. Вишняков, К.Н. Медников, А.А. Перцов, Е.Н. Рагозин, А.А. Рева, А.С. Ульянов, С.В. Шестов*

- // Рабочее совещание “Рентгеновская оптика — 2008”, Черноголовка. — 2008. — С. 55–57.
4. Калибровки рентгеновского спектрогелиографа на длину волны 8.42 Å проекта ТЕСИС / *С.В. Кузин, С.В. Шестов, А.А. Перцов, А.А. Рева, Лей Женг, Идонг Жао* // XII международный Симпозиум “Нанопизика и наноэлектроника”, Н.Новгород — 2008. — Т. 1. — с. 255
  5. *Рева А.А., Шестов С.В.* Исследование дублета Mg XII 8.42 Å в спектрах вспышек на Солнце // 51-ая Научная Конференция МФТИ, Москва–Долгопрудный. — 2008. — Т. II. — С. 34–36
  6. Спектры отражения периодических многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области спектра / *Е.А. Вишняков, К.Н. Медников, А.А. Перцов, Е.Н. Рагозин, А.А. Рева, А.С. Ульянов, С.В. Шестов* // 51-ая Научная Конференция МФТИ, Москва–Долгопрудный. — 2008. — Т. II. — С. 10–13.
  7. Калибровки рентгеновского спектрогелиографа на длину волны 0.84 нм проекта ТЕСИС / *С.В. Кузин, С.В. Шестов, А.А. Перцов, А.А. Рева, Лей Женг, Идонг Жао* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2009. — № 7. — С. 51–54
  8. Измерение спектров отражения многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области спектра при помощи широкополосного лазерно-плазменного источника излучения / *Е.А. Вишняков, К.Н. Медников, Е.Н. Рагозин, А.А. Рева, А.С. Ульянов, С.В. Шестов* // Квантовая электроника. — 2009 — Т. 39, № 5. — С. 474–480
  9. Spectroscopic characterization of novel multilayer mirrors intended for astronomical and laboratory applications / *E.N. Ragozin,*

- K.N. Mednikov, A.A. Pertsov, A.S. Pirozhkov, A.A. Reva, S.V. Shestov, A.S. Ul'yanov, E.A. Vishnyakov* // Proceedings of the SPIE. – 2009 – V. 7360. – P. 73600N-73600N-12
10. Спектральные характеристики элементов рентгеновской оптики в космическом эксперименте ТЕСИС / *Е.А. Вишняков, К.Н. Медников, А.А. Перцов, Е.Н. Рагозин, А.А. Рева, А.С. Ульянов, С.В. Шестов* // XIII Международный Симпозиум “Нанопизика и наноэлектроника”, Нижний Новгород. – 2009
  11. Эксперимент ТЕСИС по изображающей рентгеновской спектроскопии Солнца на спутнике КОРОНАС-ФОТОН / *С.В. Кузин, С.А. Богачев, И.А. Житник, ... А.А. Рева, ... (17 авторов)* // XIII Международный Симпозиум “Нанопизика и наноэлектроника”, Нижний Новгород. – 2009
  12. Spectroscopic characterization of novel multilayer mirrors intended for astronomical and laboratory applications / *E.N. Ragozin, K.N. Mednikov, A.A. Pertsov, A.S. Pirozhkov, A.A. Reva, S.V. Shestov, A.S. Ul'yanov, E.A. Vishnyakov* // European Symposium on Optics and Optoelectronics, Prague, Czech Republic. – 2009
  13. Space-time dynamics of hot coronal plazma structures studied in the SPIRIT experiment / *A.M. Urnov, S.V. Kuzin, S.A. Bogachev, A.A. Reva, S.V. Shestov, A.A. Solovyev, I.A. Zhitnik* // International Coronal Workshop “The Sun: from active to quite”, Moscow. – 2009. – P. 32
  14. Experiment CORONAS-PHOTON/TESIS: first results / *S.V. Kuzin, S.A. Bogachev, I.A. Zhitnik, ... А.А. Рева, ... (17 author)* // International Coronal Workshop “The Sun: from active to quite”, Moscow. – 2009. – P. 6

15. *Reva A.A.* Диагностика горячих рентгеновских точек по данным спектрогелиографа Mg XII в эксперименте ФИАН СПИРИТ // III Всероссийская молодежная школа-семинар “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва. – 2009. – С. 59
16. *Reva A.A.* Диагностика горячих рентгеновских точек по данным спектрогелиографа Mg XII в эксперименте ФИАН СПИРИТ и ТЕСИС // Научная сессия НИЯУ МИФИ–2010, Москва. – 2010. – Т. 2. – С. 280
17. *Reva A.A.* Диагностика горячих рентгеновских точек по данным спектрогелиографа Mg XII в эксперименте ФИАН СПИРИТ/КОРОНАС-Ф // VII конференция молодых ученых посвященная дню космонавтики, Москва. – 2010. – С. 50
18. **Processing method of images obtained during the TESIS/CORONAS-PHOTON experiment / S.V. Kuzin, S.V. Shestov, S.A. Bogachev, A.A. Pertsov, A.S. Ulyanov, A.A. Reva // Solar System Research. – 2011. – V. 45. – P. 174–181**
19. **The TESIS experiment on the CORONAS-PHOTON spacecraft / S.V. Kuzin, I.A. Zhitnik, S.V. Shestov, ... A.A. Reva, ... (19 авторов) // Solar System Research. – 2011. – V. 45. – P. 162-173**
20. Investigation of Hot X-ray Points (HXP) using spectroheliograph Mg XII experiment data from SPIRIT/CORONAS-F / *A.A. Reva, S.V. Kuzin, S.A. Bogachev, S.V. Shestov* // International Workshop on Solar Physics “The Sun: from quite to active – 2011”, Moscow. – 2011. – P. 49
21. Simultaneous observation of high temperature plasma of solar corona by TESIS/CORONAS-PHOTON and XRT/Hinode / *A.A. Reva,*



- S.V. Kuzin, S.A. Bogachev, S.V. Shestov // Hinode–5 meeting, Cambridge, USA. – 2011. – P. 124*
22. **Investigation of Hot X-Ray Points (HXPs) Using Spectroheliograph Mg XII Experiment Data from CORONAS-F/SPIRIT / A.A. Reva, S.V. Shestov, S.A. Bogachev, S.V. Kuzin // Solar Physics. – 2012. – V. 276. – P. 97–112**
23. Simultaneous Observation of High Temperature Plasma of Solar Corona By TESIS CORONAS-PHOTON and Hinode / *A.A. Reva, S.V. Shestov, S.A. Bogachev, S.V. Shestov // Fifth Hinode Science Meeting: Exploring the Active Sun. ASP Conference Series. – 2012. – V. 459. – P. 139–140*
24. Использование генетического метода восстановления ДЭМ по данным SXT/Yohkoh, EIT/SOHO и спектрогелиографа Mg XII/СПИРИТ / *A.A. Рева, С.В. Шестов, С.В. Кузин, С.В. Богачев // IX Конференция молодых ученых “Фундаментальные и прикладные космические исследования”, Москва. – 2012. – С. 69*
25. *Reva A.A. Shestov S.V. Kuzin S.V. Anomalous intensity ratio of Ly- $\alpha$  doublet hydrogen-like ion Mg XII 8.42 Å in hot compact objects of the solar corona // Spectroscopy of the dynamic Sun. UK, London. – 2012*
26. Observation of hot X-ray points (HXPs) using Mg XII spectroheliograph aboard CORONAS-F satellite / *A.A. Reva, S.V. Shestov, S.V. Kuzin, S.A. Bogachev // 39th COSPAR Scientific Assembly, India, Mysore. – 2012*
27. Differential Emission Measure Diagnostics Using Simultaneous Images of XRT, EIT and TESIS / *A.A. Reva, S.V. Shestov, S.V. Kuzin and S.A. Bogachev //Hinode–6 meeting, UK, Edinburg. – 2012. – P. 67*

## Список цитируемой литературы

1. The soft X-ray telescope for the SOLAR-A mission / S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner et al. // *Solar Phys.* — 1991. — Nov. — Vol. 136. — P. 37–67.
2. The Solar-A Mission - an Overview / Y. Ogawara, T. Takano, T. Kato et al. // *Solar Phys.* — 1991. — Nov. — Vol. 136. — P. 1–16.
3. The X-Ray Telescope (XRT) for the Hinode Mission / L. Golub, E. Deluca, G. Austin et al. // *Solar Phys.* — 2007. — Jun. — Vol. 243. — P. 63–86.
4. The Hinode (Solar-B) Mission: An Overview / T. Kosugi, K. Matsuzaki, T. Sakao et al. // *Solar Phys.* — 2007. — Jun. — Vol. 243. — P. 3–17.
5. Dynamic 10 MK plasma structures observed in monochromatic full-Sun images by the SPIRIT spectroheliograph on the CORONAS-F mission / I. A. Zhitnik, O. I. Bugaenko, A. P. Ignat'ev et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2003. — Jan. — Vol. 338. — P. 67–71.
6. SPIRIT X-ray telescope/spectroheliometer results / I. A. Zhitnik, O. I. Bougaenko, J.-P. Delaboudiniere et al. // *Solar Variability: From Core to Outer Frontiers* / Ed. by A. Wilson. — Vol. 506 of ESA Special Publication. — 2002. — Dec. — P. 915–918.
7. XUV observations of solar corona in the spirit experiment on board the coronas-F satellite / I. Zhitnik, S. Kuzin, A. Afanas'ev et al. // *Adv. Spa. Res.* — 2003. — Aug. — Vol. 32. — P. 473–477.
8. Main Results of the SPIRIT Experiment Onboard the CORONAS-F Satellite / I. A. Zhithik, S. V. Kuzin, I. I. Sobel'Man et al. // *Solar System Research*. — 2005. — Nov. — Vol. 39. — P. 442–452.
9. Oraevsky V. N., Sobelman I. I. Comprehensive Studies of Solar Activity on the CORONAS-F Satellite // *Astronomy Letters*. — 2002. — Jun. — Vol. 28. — P. 401–410.

10. The TESIS experiment on the CORONAS-PHOTON spacecraft / S. V. Kuzin, I. A. Zhitnik, S. V. Shestov et al. // *Solar System Research*. — 2011. — Apr. — Vol. 45. — P. 162–173.
11. Kotov Y. D. Scientific goals and observational capabilities of the CORONAS-PHOTON solar satellite project // *Solar System Research*. — 2011. — Apr. — Vol. 45. — P. 93–96.
12. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) / J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin et al. // *Solar Phys.* — 2011. — Jun. — P. 172.
13. Калибровки рентгеновского спектрогелиографа на длину волны 0.84 нм проекта ТЕСИС / С. В. Кузин, С. В. Шестов, А. А. Перцов et al. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2009. — Vol. №7.
14. Измерение спектров отражения многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области спектра при помощи широкополосного лазерно-плазменного источника излучения / Е. А. Вишняков, К. Н. Медников, Е. Н. Рагозин et al. // *Квантовая электроника*. — 2009. — Vol. 39 (5). — P. с. 474–480.
15. Спектральные калибровки фильтров и детекторов солнечного телескопа на диапазон 13.2 нм проекта ТЕСИС / С. В. Кузин, С. В. Шестов, А. А. Перцов et al. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2008. — Vol. № 7. — P. с. 19–23.
16. Processing method of images obtained during the TESIS/CORONAS-PHOTON experiment / S. V. Kuzin, S. V. Shestov, S. A. Bogachev et al. // *Solar System Research*. — 2011. — Apr. — Vol. 45. — P. 174–181.