

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

на правах рукописи

УДК № 523.945-46, 523.985.3

Ульянов Артем Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ
В СПОКОЙНОЙ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

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)

кандидат физико-математических наук
Зимовец Иван Викторович (ИКИ РАН)

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн РАН
(ИЗМИРАН)

Защита состоится: 5 декабря 2013 г. в 16 ²⁰ на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) в конференц-зале Института Космических Исследований РАН (ИКИ РАН) по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Отзывы направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), диссертационный совет Д002.023.01.

Автореферат разослан: 4 ноября 2013 г.

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



Ю.А. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Солнечной короной называется внешняя оболочка атмосферы Солнца, простирающаяся от поверхности *фотосферы* в межзвездное пространство. Солнечную корону по высоте над фотосферой принято делить на *внутреннюю* (высота менее 10 угл. мин.) и *внешнюю* (более 10 угл. мин.). Внутренняя корона характеризуется наличием эмиссионной спектральной компоненты, состоящей из нескольких десятков ярких линий [1]. Хотя эмиссионный спектр короны известен давно, полностью расшифровать его удалось лишь к сороковым годам 20 века. В 1942 г. Эдлен идентифицировал запрещенные линии высокоионизованных атомов Fe, Ne, Ca и Ar и тем самым впервые показал, что температура короны составляет свыше 1 млн К. [2]

С солнечной короной неразрывно связано понятие *солнечной активности*, основным показателем которой считается число солнечных пятен (*число Вольфа*). Многолетние наблюдения показали, что солнечная пятнообразовательная деятельность носит циклический характер с периодом около 11 лет. Той же периодичности подчиняется и множество других процессов, протекающих в локализованных областях атмосферы Солнца (т.н. *активных областях*), что позволяет под солнечной активностью понимать целый комплекс явлений, усиливающихся в годы максимума активности. Эти явления можно подразделить на медленные (нарастание активности от минимума до максимума), промежуточные (развитие активной области) и быстрые (возрастание яркости вспышки); их временные шкалы заключены между несколькими секундами и несколькими годами [3].

В противоположность солнечной активности и *активному Солнцу* ставится т.н. *спокойное Солнце*, которое может рассматриваться как состояние Солнца, не возмущенного эффектами активности. Такое состояние наиболее характерно в годы минимума активности. На стадии роста солнечной активности и в ее максимуме под спокойным Солнцем понимаются области его поверхности, расположенные за пределами активных областей, а также *корональных дыр*, которые представляют собой участки пониженной яркости. Такое определение, однако, не является вполне точным, т.к. последние наблюдения показали, что в спокойном Солнце происходит множество динамических процессов (*событий*) ана-

логично активным областям. Так, в спокойной солнечной короне были обнаружены микро- и нановспышки, джеты, осцилляции [2]. Наиболее часто подобные явления происходят в особых узлах спокойной короны – *ярких корональных точках* (ЯКТ) [4], что позволяет рассматривать ЯКТ как *мелкомасштабные* активные области. Степень подобия, в которой ЯКТ соответствуют активным областям, в настоящее время не вполне известна. Во многом это связано с отсутствием высокоточных наблюдений, направленных на изучение спокойной короны. Сложности проведения таких наблюдений связаны с требованием как высокого пространственного разрешения, определяющимся размерами ЯКТ – менее 10 угл. сек., так и временного разрешения, связанным с характерным временем наблюдаемых процессов – порядка нескольких секунд.

Настоящая работа посвящена исследованию двух типов процессов, происходящих в спокойной солнечной короне и ЯКТ: *нановспышек* и *корональных осцилляций*. Процессы первого типа (нановспышки) являются импульсными событиями с самым низким (на данный момент) энерговыделением из зарегистрированных в короне – менее 10^{27} эрг [5]. Нановспышки происходят гораздо чаще обычных солнечных вспышек: на всей площади солнечного диска за час наблюдений происходит до нескольких тысяч таких событий [6]. Высокая частота возникновения нановспышек позволяет применить для их исследования методы статистического анализа. Особый интерес исследование нановспышек представляет в приложении к проблеме нагрева солнечной короны, одной из наиболее важных нерешенных задач солнечной физики [7].

Процессы второго типа – корональные осцилляции – являются более редкими событиями для спокойных областей короны и представляют собой стоячие колебания магнитных петель, составляющих структуру спокойной короны [8]. Относительная редкость событий такого типа, по всей видимости, связана с наличием специфического механизма возбуждения колебаний, возможные варианты которого рассматриваются в работе. Исследование осцилляции корональных петель также имеет важное прикладное значение, поскольку с ними тесно связано понятие т.н. *волн Альвена*, распространение и диссипация которых могут вносить большой вклад в нагрев солнечной короны и ускорение солнечного ветра.

Основным источником наблюдательной информации для диссертационной работы стали данные телескопических каналов вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) диапазона спектра прибора ТЕСИС российского

спутника Коронас-Фотон [9], а также американского прибора AIA, входящего в состав научной аппаратуры станции SDO [10]. Первый из телескопов (ТЕСИС) обладал рекордным для солнечных приборов данного спектрального диапазона временным разрешением, что позволило детально изучить динамику наблюдаемых процессов. Отличительной особенностью второго телескопа (AIA) было высокое пространственное разрешение, достаточное для изучения внутренней структуры ЯКТ и ядер нановспышек.

Цель работы

Целью работы является экспериментальное изучение и теоретическая интерпретация наблюдений спокойной солнечной короны, проведенных с помощью телескопов ВУФ-диапазона ТЕСИС и AIA.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- Разработать методику первичной обработки телескопических изображений, позволяющую корректировать присутствующие на изображениях артефакты. В том числе были разработаны методы вычитания фоновой засветки, компенсации эффектов белого поля, виньетирования и смаза, а также алгоритм стабилизации изображений.
- Провести калибровку телескопов и рассчитать функции температурного отклика телескопов.
- Провести статистический анализ зарегистрированных серий изображений, в том числе рассчитать средние значения интенсивности, коэффициенты модуляции, радиус и время корреляции, а также мощность шума.
- Разработать методику спектральной диагностики физических параметров корональной плазмы на основе многоканальных данных прибора AIA, позволяющую наблюдать изменения температуры и плотности одновременно для всех точек телескопических изображений.

- Разработать алгоритм отождествления импульсной (вспышечной) динамики на фоне слабо изменяющегося тренда сигнала и шума интенсивности.
- Произвести физическую интерпретацию импульсных событий.
- Провести расчет тепловой энергии, высвобождающейся во время зарегистрированных импульсных событий (нановспышек).
- Разработать алгоритм детектирования процессов осцилляционного типа на зарегистрированных временных профилях интенсивности. Провести интерпретацию наблюдаемых колебаний.

Научная новизна

- Впервые была зарегистрирована и исследовалась динамика интенсивности ВУФ-излучения спокойной солнечной короны с временным разрешением менее 10 сек.
- Впервые были зарегистрированы импульсные (вспышечные) события с тепловой энергией в диапазоне от 10^{23} до 10^{24} эрг. Диагностика температуры подтвердила факт нагрева корональной плазмы во время мелкомасштабных импульсных событий.
- Впервые были получены статистические распределения параметров вспышечных событий в короне Солнца в широком диапазоне тепловых энергий от 10^{23} до 10^{27} эрг. Общее число таких событий составило свыше 30 тысяч.
- Впервые в спокойной короне были зарегистрированы осцилляции интенсивности излучения ВУФ-диапазона спектра с периодом менее 1 минуты.

Научная и практическая ценность

В работе была исследована динамика интенсивности ВУФ-излучения мелкомасштабных структур спокойной солнечной короны по данным космических телескопов ТЕСИС и АИА. По своим техническим характеристикам эти приборы, как и предоставленную ими научную информацию, можно считать уникальными. Временное разрешение первого телескопа

(ТЕСИС) составляло менее 5 секунд, что на сегодняшний день является рекордным показателем для приборов аналогичного типа. Второй телескоп (AIA) имеет беспрецедентно высокое пространственное разрешение (≈ 0.6 угл. сек.) в сочетании с полем зрения, целиком покрывающим солнечный диск. Серии наблюдений обоих телескопов, использованные в работе, были зарегистрированы с 2009 г. по 2011 г. в уникальных условиях глубокого минимума 24-го цикла солнечной активности, когда большая часть поверхности Солнца была покрыта спокойными областями.

Полученные в работе статистические распределения геометрических размеров нановспышечных ядер важны для построения теоретических моделей процессов нагрева в спокойной короне и исследования законов подобия вспышечных событий разных энергетических классов.

Исследование энергетического распределения нановспышек, проведенное в работе, необходимо для решения одной из наиболее важных задач солнечной физики – проблемы нагрева солнечной короны. Сценарий нагрева солнечной короны посредством большого числа нановспышек является одним из возможных механизмов установления теплового баланса в спокойной короне. Хотя зарегистрированные события вносят небольшой вклад, в работе были получены прямые указания на то, что события аналогичного типа могут играть решающую роль в нагреве короны.

Исследование колебательных процессов в структурах спокойной короны представляет интерес для поиска возможных механизмов возбуждения и затухания различных мод колебаний, а также для задач диагностики магнитного поля на основе методов корональной сейсмологии.

Разработанные алгоритмы и их программные реализации, предназначенные для температурной диагностики и детектирования вспышечных событий и колебательных процессов, в большой степени унифицированы, что позволяет использовать их при анализе данных других космических экспериментов.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

- Динамика быстропротекающих процессов в спокойной солнечной короне носит квазистационарный характер со средним временем корреляции около 250 сек. и средним коэффициентом модуляции 0.16. Различается 2 вида динамики: импульсные вспышечноподобные события (нановспышки), а также квазипериодические осцилляции ин-

тенсивности, ассоциированные с магнито-звуковыми колебаниями магнитных петель.

- Распределение нановспышек по энергии в диапазоне энергий $10^{23} - 10^{26}$ эрг подчиняется степенному закону с показателем степени 2.32 ± 0.02 . Плотность потока тепловой энергии зарегистрированных нановспышек составляет ≈ 9000 эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$.
- Распределение осцилляций ярких корональных точек по периодам колебаний имеет излом в области 150 сек. В области периодов свыше 150 сек. распределение является пологим, и основной вклад вносит медленная магнито-звуковая мода колебаний. Число осцилляций в диапазоне периодов от 20 до 150 сек. растет за счет возбуждения быстрой изгибающей моды магнито-звуковых колебаний.

Личный вклад автора

- Автор лично принимал участие в измерении спектров отражения многослойных зеркал ВУФ- и МР-диапазонов, которые использовались в качестве фокусирующих элементов в телескопах и спектрогелиографах ТЕСИС. Автором осуществлялась сборка и юстировка экспериментальной установки для измерения спектров в вакуумной камере «ИКАР», а также обработка полученных данных. На основе полученных спектров, автором были рассчитаны функции температурного отклика телескопических каналов ТЕСИС на длины волн 171 \AA и 132 \AA . Весь комплекс работ по измерению спектров и калибровке приборов описан в работах [1*] – [3*].
- Автор лично принимал участие в сборке и юстировке летной аппаратуры ТЕСИС, в частности, телескопов на длины волн 171 \AA и 132 \AA , спектрогелиографа на диапазон $280 - 330 \text{ \AA}$, а также звездных датчиков ориентации. Автор участвовал в составлении программы высокоскоростных серий наблюдений ТЕСИС, данные которых были использованы в диссертации. В соавторстве был подготовлен ряд публикаций с описанием аппаратуры ТЕСИС (работы [4*] – [7*]), в которых значительная часть иллюстраций была выполнена автором.
- Автор самостоятельно разработал и реализовал на языке программирования IDL 6.1 ряд алгоритмов для первичной обработки дан-

ных ТЕСИС, в том числе алгоритмы вычитания фоновой засветки, компенсации эффектов белого поля и виньетирования, а также стабилизации изображений. Разработанный автором комплекс программ применялся для обработки данных, полученных за весь период работы ТЕСИС в телескопических каналах наблюдения. Алгоритмы обработки данных описаны в работах [8*] – [11*]. Вклад автора в подготовку указанных публикаций является основным. Кроме того, автор принял участие в обработке спектров широкополосного спектрогелиографа СПИРИТ для проведения диагностики параметров плазмы (см. [12*]).

- Автор самостоятельно разработал метод быстрой диагностики физических параметров корональной плазмы, а также алгоритмы детектирования нановспышек и корональных осцилляций. Обработку данных, полученных на основе указанных методов, автор осуществил самостоятельно. Вошедшие в состав диссертации результаты статистического анализа зарегистрированных событий были получены лично автором и опубликованы в соавторстве в работах [13*] – [20*].
- Вклад автора диссертации в проведенное исследование и основные результаты, выносимые на защиту, является основным.

Апробация работы

Все результаты, приведенные в работе, были представлены в ряде докладов на отечественных и международных конференциях:

- Рабочее совещание «Рентгеновская оптика – 2008», Черноголовка, 6-9 октября 2008 г.
- 51-я научная конференция МФТИ, Москва-Долгопрудный, 28-30 ноября 2008 г.
- 52-я научная конференция МФТИ, Москва-Долгопрудный, 27-29 ноября 2009 г.
- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, Москва, 25-31 января 2010 г.
- VII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 12-13 апреля 2010 г.

- Рабочее совещание «Рентгеновская оптика – 2010», Черногоровка, 20-23 сентября 2010 г.
- XIII Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», Москва-Звенигород, 14-19 ноября 2010 г.
- The Sun: from active to quiet – 2011, Москва, 29 августа – 2 сентября 2011
- 39th COSPAR Scientific Assembly, Mysore, India, July 14-22, 2012
- Progress on EUX & X-Ray spectroscopy and imaging. Wroclaw, Poland, November 20-22, 2012
- Восьмая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 4-8 февраля
- Sixth Coronal Loops workshop, La Roche-en-Ardenne, Belgium, June 25-27, 2013

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 20 работах. Работы, опубликованные в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, выделены жирным шрифтом (всего 5 статей).

- 1* Измерение спектров отражения многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области спектра при помощи широкополосного лазер-плазменного источника излучения / Е. А. Вишняков, А. А. Медников, А. А. Перцов, Е. Н. Рагозин, А. А. Рева, *А. С. Ульянов*, С. В. Шестов // Рабочее совещание «Рентгеновская оптика - 2008», материалы совещания – г. Черногоровка – 2008. – С. 55-57
- 2* Спектры отражения периодических многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области спектра / Е. А. Вишняков, А. А. Медников, А. А. Перцов, Е. Н. Рагозин, А. А. Рева, *А. С. Ульянов*, С. В. Шестов // 51-я научная конференция МФТИ, сборник тезисов докладов, ч. II – Москва-Долгопрудный – 2008. – С. 10-13
- 3* 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», материалы совещания – г. Черногоровка – 2008. – С. 53-54

- 4* Эксперимент ТЕСИС по рентгеновской изображающей спектроскопии Солнца на спутнике КОРОНАС-Фотон / С. В. Кузин, С. А. Богачев, И. А. Житник, ... , А. С. Ульянов, ... (20 авторов) // Известия Российской академии наук. Серия физическая – 2010. – Том 74 – С. 39-43
- 5* Проведение космического эксперимента ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон / С. В. Кузин, С. В. Шестов, А. А. Перцов, А. С. Ульянов, А. А. Рева // Рабочее совещание «Рентгеновская оптика - 2010», материалы совещания – г. Черноголовка – 2010. – С. 124
- 6* Эксперимент ТЕСИС космического аппарата КОРОНАС-Фотон / С. В. Кузин, И. А. Житник, С. В. Шестов, ... , А. С. Ульянов, ... (19 авторов) // **Астрономический вестник – 2011. – Том 45 – С. 166-177**
- 7* Эксперимент ТЕСИС космического аппарата КОРОНАС-Фотон / В. А. Слемзин, Н. К. Суходрев, Ю. С. Иванов, ... , А. С. Ульянов, ... (23 автора) // **Механика, управление и информатика – 2012. – Том 7 – С. 41-60**
- 8* Методы обработки данных космического эксперимента ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон / А. С. Ульянов и А. А. Рева // 52-я научная конференция МФТИ, сборник тезисов докладов, ч. II – Москва-Долгопрудный – 2009. – С. 83-84
- 9* Информационные и технические возможности комплекса инструментов ТЕСИС/КОРОНАС-Фотон по исследованию Солнца в условиях минимума и максимума солнечной активности / С. В. Кузин, С. А. Богачев, С. В. Шестов, ... , А. С. Ульянов (15 авторов) // **Механика, управление и информатика – 2010. – Том 3 – С. 107-118**
- 10* **Методы обработки изображений, получаемых в ходе эксперимента ТЕСИС/КОРОНАС-Фотон / С. В. Кузин, С. В. Шестов, С. А. Богачев, А. А. Перцов, А. С. Ульянов, А. А. Рева // Астрономический вестник – 2011. – Том 45 – С. 178-185**
- 11* Регистрация и обработка изображений в эксперименте ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон / С. В. Кузин, С. В. Шестов, С. А. Богачев, А. А. Перцов, А. С. Ульянов, А. А. Рева // **Механика, управление и информатика – 2012. – Том 7 – С. 61-74**

- 12* **Диагностика температуры солнечной плазмы во вспышках и активных областях по линиям спектрального диапазона 280-330 А в эксперименте СПИРИТ/Коронас-Ф / С. В. Шестов, С. В. Кузин, А. М. Урнов, А. С. Ульянов, С. А. Богачев // Письма в астрономический журнал: астрономия и космическая астрофизика – 2010. – Том 36 – С. 46-60**
- 13* **Динамика ярких точек и выбросов на Солнце по наблюдениям прибора ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон / А. С. Ульянов, С. А. Богачев, С. В. Кузин // Астрономический журнал – 2010. – Том 87 – С. 1030-1040**
- 14* **Исследование высокоскоростной динамики солнечной корональной плазмы по данным прибора ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон / А. С. Ульянов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, сборник тезисов докладов, т. 2 – г. Москва – 2010. – С. 280**
- 15* **Исследование высокоскоростной динамики ярких корональных точек по данным прибора ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон / А. С. Ульянов // VII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», сборник тезисов докладов – г. Москва – 2010. – С. 62-63**
- 16* **Statistical analysis of small flare-like events in low solar corona / A. S. Ulyanov, S. V. Bogachev, and S. V. Kuzin // The Sun: from active to quiet - 2011, сборник тезисов – г. Москва – 2011. – P. 57**
- 17* **Energy distribution of nanoflares in the quiet solar corona / A. S. Ulyanov // 39th COSPAR Scientific Assembly, Abstracts – Mysore, India – 2012. – ISSN - 1815 - 1619, № E2.5-0002-12**
- 18* **Statistical analysis of small flare-like events in the quiet solar corona / A. S. Ulyanov // Progress on EUV & X-Ray spectroscopy and imaging, Abstract book – Wroclaw, Poland – 2012. – P. 29**
- 19* **Диагностика мелкомасштабных структур солнечной короны по данным многоканальных телескопических наблюдений в эксперименте AIA/SDO / А. С. Ульянов // Восьмая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», сборник тезисов – г. Москва – 2013. – С. 46-47**

- 20* Multiwavelength dynamics of small flare-scale structures in the quiet solar corona / A. S. Ulyanov, and S. V. Bogachev // Sixth Coronal Loops workshop, Abstracts book – La Roche-en-Ardenne, Belgium – 2013. – P. 81

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 106 страниц текста, включая 31 рисунок и 5 таблиц. Список литературы включает в себя 86 наименований.

Содержание работы

Во *Введении* обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель и задачи, перечислены полученные в диссертации результаты, показана их новизна, научная и практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

Глава 1. Обзор литературы

В разделе 1.1 в исторической ретроспективе дается описание отечественных и зарубежных экспериментов по исследованию солнечной короны. В частности показаны основные результаты и достижения, полученные в первом советском солнечном эксперименте, который был осуществлен на втором искусственном спутнике Земли. Описаны результаты экспериментов на американских ракетах Aerobee, а также станциях Skylab и SMM. Отдельно отмечены отечественные программы наблюдений, проведенные на аппаратах Фобос и серии спутников КОРОНАС (КОРОНАС-И, КОРОНАС-Ф, КОРОНАС-ФОТОН).

В разделе 1.2 обсуждаются основные результаты космических экспериментов, полученных в области исследования вспышечных явлений низких энергий, происходящих в короне Солнца. Отдельное внимание уделено исследованиям событий с наиболее низким энерговыделением – нановспышкам. Дается физическая интерпретация нановспышек и приводятся теоретические оценки основных физических параметров нановспышек – тепловой энергии, температуры и плотности. Обозначены основные проблемы в области исследования нановспышек, в том числе задача нахождения энергетического распределения нановспышек, которая рассматривается в приложении к известной проблеме нагрева солнечной

короны. Затем приводится перечень основных теоретических и экспериментальных работ, направленных на изучение распределения нановспышек, производится анализ их результатов.

Раздел 1.3 отведен под описание второго класса событий, наблюдаемых в спокойной солнечной короне – корональных осцилляций интенсивности. Обсуждаются возможные физические механизмы таких осцилляций. В качестве основного варианта рассматриваются магнитозвуковые колебания, возбуждающиеся в корональных петлях, составляющих структуру спокойной короны. Описываются основные физические свойства мод колебаний (баллонной, изгибной, меридиональной и торсионной), приводятся формулы для нахождения периодов осцилляций, рассматривается возможность наблюдения осцилляций. Затем обсуждаются основные проблемы в области физики корональных осцилляций (в том числе механизмы возбуждения и затухания осцилляций) и практическое применение наблюдения осцилляций (корональная сейсмология).

Глава 2. Описание экспериментальных данных

В разделе 2.1 приводится описание данных прибора ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон, разработанного в Лаборатории рентгеновской астрономии Солнца ФИАН. Описывается устройство телескопа на длину волны 171 \AA , приводятся его технические характеристики (пространственное и временное разрешение), результаты калибровки и расчета функции температурного отклика, перечисляются спектральные линии, попадающие в его спектральный диапазон. Затем описываются высокоскоростные серии наблюдений, проведенные в ноябре 2009 г. и которые были использованы в работе. Показаны поля зрения телескопа во время этих серий, указана продолжительность серий и число кадров. Затем приводятся примеры временных профилей интенсивности, полученных с помощью ТЕСИС.

В разделе 2.2 приводится описание данных комплекса телескопов АІА на станции SDO. Приводятся оптические схемы телескопов, их технические характеристики (пространственное и временное разрешение), функции температурного отклика и целевые спектральные линии. Затем описываются серии наблюдений, использованные в работе. Показываются поля зрения телескопов, указывается продолжительность и число кадров. Затем приводятся примеры временных профилей интенсивности, зарегистрированных прибором АІА.

Раздел 2.3 посвящен описанию методов первичной обработки данных. Перечисляются основные артефакты, присутствующие на изображении

ях. Затем для каждого из артефактов приводится описание метода его коррекции. В том числе рассматриваются алгоритмы вычитания фоновой засветки, компенсации эффектов белого поля, виньетирования и смаза изображений. Кроме того, предлагается метод точной стабилизации изображений. На основе примеров применения алгоритмов показывается их эффективность.

На основе разработанных алгоритмов был создан специализированный комплекс программного обеспечения (ПО) на языке IDL 6.1.

В разделе 2.4 приводятся результаты расчета основных статистических характеристик экспериментальных данных: среднего значения интенсивности, коэффициента модуляции, радиуса и времени корреляции, а также мощности шума. Показаны гистограммы распределения интенсивности изображений и функции корреляции зарегистрированных временных рядов. С помощью корреляционного анализа показывается наличие нескольких характерных масштабов времени, присутствующих в наборе данных.

Найденное значение коэффициента модуляции составило $\approx 16\%$, времени корреляции – около 250 сек, радиуса корреляции – около 20 тыс. км. Корреляционный анализ показал наличие во временных рядах нескольких характерных масштабов.

В разделе 2.5 приводится описание метода температурной диагностики плазмы, использовавшегося в работе. Экспериментальным материалом для проведения диагностики послужили одновременные наблюдения в нескольких спектральных каналах, проведенные с помощью SDO. Приводится математическое обоснование метода, обсуждаются его основные достоинства и недостатки. Затем приводятся примеры применения метода, в том числе показываются карты распределения и временные профили меры эмиссии и температуры. На основании полученных результатов делается вывод о нагреве корональной плазмы во время мелкомасштабных вспышечных событий.

Разработанный алгоритм отличается высокой скоростью вычислений, что позволяет применять его для обработки больших объемов наблюдательных данных. Измеренные с помощью данного метода значения меры эмиссии спокойной солнечной короны составили от $4 \times 10^{41} \text{ см}^{-3}$ до $4 \times 10^{42} \text{ см}^{-3}$, а значения температуры – около 1.1 млн К. Хотя спокойная солнечная корона в большой степени однородна по температуре, в отдельных областях наблюдался нагрев вплоть до 2 млн К. Данный факт служит свидетельством того, что даже в самых низких по энергии

вспышечных событиях происходит нагрев плазмы.

Глава 3. Статистическое исследование нановспышек

В разделе 3.1 главы производится физическая интерпретация событий, т.е. показывается, что найденные события действительно могут относиться к вспышечному классу. Для этого показывается, что во время отдельных событий наблюдается перестройка структуры магнитного поля, что служит характерным признаком явления магнитного пересоединения, а также что некоторые события сопровождаются переносом вещества – джетами.

В разделе 3.2 описывается использованный метод вычитания из временных рядов интенсивности медленно меняющегося тренда. Показывается, из каких соображений выбирался именно данный метод, вычисляются параметры алгоритма. На примере зарегистрированного временного профиля выявляется эффективность данного метода. Затем производится вычисление величины шумового порога для детектирования значимых пикселей, и указывается метод объединения значимых пикселей в отдельные события.

В разделе 3.3 описывается примененный метод определения геометрических размеров и длительности событий. Приводятся полученные на основе данного метода распределения геометрических и временных параметров событий.

В разделе 3.4 обсуждаются возможные модели высоты событий, и показана конечная формула для расчета тепловой энергии событий.

В разделе 3.5 описываются результаты вычисления энергетического распределения нановспышек. В том числе приводятся полученные гistogramмы распределения, рассчитываются значения показателей степени распределений. Затем анализируются результаты, и обсуждаются возможные причины их расхождения для разных серий наблюдений. Затем приводятся результаты вычисления плотности потока тепловой энергии, высвободившейся во время найденных событий, и максимально возможного значения энерговыделения для событий данного типа. На основании результатов делается вывод о возможности нановспышечного сценария нагрева спокойной солнечной короны.

В разделе 3.6 показаны результаты статистического анализа нановспышек, полученные с учетом многотемпературного состава плазмы.

Показано, что распределение нановспышек по энергии в диапазоне энергий $10^{23} - 10^{26}$ эрг подчиняется степенному закону с показателем степени 2.32 ± 0.02 . Плотность потока тепловой энергии зарегистриро-

ванных нановспышек составляет ≈ 9000 эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

В разделе 3.7 производится оценка суммарного энерговыделения событий, интенсивность которых находится под порогом регистрации. Максимальное расчетное значение энерговыделения для событий данного типа составляет 5×10^5 эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Глава 4. Исследование осцилляций интенсивности в спокойной короне

В разделе 4.1 приводится описание метода детектирования колебаний на основе оконного Фурье-преобразования. Описывается принцип оконного преобразования, обсуждаются его преимущества перед классическим преобразованием Фурье. Обосновывается выбор необходимой ширины окна. На примере отдельных событий показывается эффективность метода регистрации. Для этого приводятся оконные спектры зарегистрированных временных рядов, рассчитываются периоды зарегистрированных осцилляций. Рассматриваются возможные моды МГД-колебаний, имеющие аналогичные периоды.

В разделе 4.2 показаны результаты статистического анализа зарегистрированных колебательных событий. Приводится гистограмма распределения осциллирующих структур по периодам колебаний. Анализируется форма распределения. На основе анализа делается вывод о соответствии различных колебательных мод отдельным участкам распределения.

Зарегистрированные квазипериодические осцилляции интенсивности были интерпретированы как МГД-колебания корональных петель спокойной солнечной короны. Найденные периоды колебаний лежат в диапазоне от 20 до 300 сек. Распределение периодов осцилляций имеет излом в области 150 сек. В области периодов свыше 150 сек. распределение является пологим, и основной вклад вносит медленная магнитозвуковая мода колебаний. Число осцилляций в диапазоне периодов от 20 до 150 сек. растет за счет возбуждения быстрой изгибной моды магнитозвуковых колебаний.

В *Заключении* приведены основные результаты диссертационной работы:

- Разработана методика первичной обработки изображений, полученных приборами ТЕСИС и АИА. В том числе разработаны алгоритмы вычитания фоновой засветки, коррекции эффектов белого поля, виньетирования и смаза изображений, а также алгоритм точной стабилизации изображений. На основе разработанных алгоритмов создан

специализированный комплекс программного обеспечения (ПО) на языке IDL 6.1.

- Исследованы статистические характеристики временных рядов интенсивности, зарегистрированных с помощью приборов ТЕСИС и АИА. Найденное значение коэффициента модуляции составило около 16%, времени корреляции – около 250 сек, радиуса корреляции – около 20 тыс. км. Корреляционный анализ показал наличие во временных рядах нескольких характерных масштабов.
- Разработана методика температурной диагностики плазмы спокойной солнечной короны. Разработанный алгоритм отличается высокой скоростью вычислений, что позволяет применять его для обработки больших объемов наблюдательных данных. Измеренные с помощью данного метода значения меры эмиссии спокойной солнечной короны составили от $4 \times 10^{41} \text{ см}^{-3}$ до $4 \times 10^{42} \text{ см}^{-3}$, а значения температуры – около 1.1 млн К. Хотя спокойная солнечная корона в большой степени однородна по температуре, в отдельных областях наблюдался нагрев вплоть до 2 млн К. Данный факт служит свидетельством того, что даже во время самых низких по энергии вспышечных событий происходит нагрев плазмы.
- Во время наблюдений ТЕСИС и АИА обнаружено большое число (около 20 тыс.) импульсных событий. Во время некоторых из них были обнаружены признаки вспышечной динамики: перестройка структуры магнитного поля и движение вещества (выбросы и дже-ты). Энергия найденных событий лежит в диапазоне от 10^{23} до 10^{27} эрг, что позволило идентифицировать эти события как нановспышки.
- Распределение нановспышек по энергии в диапазоне энергий $10^{23} - 10^{26}$ эрг подчиняется степенному закону с показателем степени 2.32 ± 0.02 . Плотность потока тепловой энергии зарегистрированных нановспышек составляет $\approx 9000 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Максимальное расчетное значение энерговыделения для событий данного типа составляет $5 \times 10^5 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Полученные результаты говорят о возможности нагрева спокойной солнечной короны с помощью нановспышек.
- Во время наблюдений ТЕСИС и АИА обнаружены квазипериодические осцилляции интенсивности, которые были интерпретированы

как МГД-колебания корональных петель спокойной солнечной короны. Периоды колебаний лежат в диапазоне от 20 до 300 сек. Распределение периодов осцилляции имеет излом в области 150 сек. В области периодов свыше 150 сек. распределение является пологим, и основной вклад в него вносит медленная магнито-звуковая мода колебаний. Число осцилляций в диапазоне периодов от 20 до 150 сек. растет за счет возбуждения быстрой изгибной моды магнито-звуковых колебаний.

Список литературы

- [1] Мартынов Д. Я. Курс общей астрофизики / Ed. by М. М. Дагаев. — Наука, 1988.
- [2] Aschwanden M. J. Physics of the Solar Corona. An Introduction. — Praxis Publishing Ltd, 2004. — Aug.
- [3] Гибсон Э. Спокойное Солнце / Ed. by Э. В. Кононович. — Мир, 1977.
- [4] McIntosh S. W., Gurman J. B. Nine Years Of Euv Bright Points // Solar Phys. — 2005. — May. — Vol. 228. — P. 285–299.
- [5] Parker E. N. Nanoflares and the solar X-ray corona // Astrophys. J. — 1988. — Jul. — Vol. 330. — P. 474–479.
- [6] Time Variability of the “Quiet” Sun Observed with TRACE. II. Physical Parameters, Temperature Evolution, and Energetics of Extreme-Ultraviolet Nanoflares / M. J. Aschwanden, T. D. Tarbell, R. W. Nightingale et al. // Astrophys. J. — 2000. — Jun. — Vol. 535. — P. 1047–1065.
- [7] Hudson H. S. Solar flares, microflares, nanoflares, and coronal heating // Solar Phys. — 1991. — Jun. — Vol. 133. — P. 357–369.
- [8] Nakariakov V. M. Magnetohydrodynamic seismology of solar and stellar coronae // Journal of Physics Conference Series. — 2008. — Oct. — Vol. 118, no. 1. — P. 012038.
- [9] 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.

- [10] The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) / J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin et al. // Solar Phys. — 2012. — Jan. — Vol. 275. — P. 17–40.

Для заметок

Для заметок

