

УДК 520.6.05, 523.9-739, 523.9-8

ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕСИС КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА КОРОНАС-ФОТОН

© 2011 г. С. В. Кузин, И. А. Житник, С. В. Шестов, С. А. Богачев, О. И. Бугаенко*,
А. П. Игнатъев, А. А. Перцов, А. С. Ульянов, А. А. Рева, В. А. Слемзин, Н. К. Суходрев,
Ю. С. Иванов, Л. А. Гончаров, А. В. Митрофанов, С. Г. Попова, Т. А. Шергина,
В. А. Соловьев, С. Н. Опарин, М. С. Зыков

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

**Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва*

Поступила в редакцию 13.04.2010 г.

26 февраля 2009 г. получены первые данные в эксперименте ТЕСИС по исследованию солнечной короны методом изображающей спектроскопии. Аппаратура ТЕСИС входит в состав комплекса научной аппаратуры космического аппарата КОРОНАС-ФОТОН и предназначена для получения изображений короны Солнца в мягкой рентгеновской и вакуумной ультрафиолетовой областях спектра с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением на высотах от переходного слоя до 3 солнечных радиусов. В статье приводятся основные характеристики аппаратуры, особенности управления и режимы работы.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование солнечной короны является одной из актуальных задач физики Солнца и астрофизики в целом. Многие ключевые вопросы этого исследования (механизм солнечных вспышек, физика нагрева короны, происхождение корональных выбросов массы) до сих пор остаются без ответа. Регистрируемые в короне проявления солнечной активности влияют на состояние межпланетной среды, на внешнюю ионосферу и магнитосферу Земли, поэтому их исследование имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение.

В начале 1990-х годов в России была начата программа солнечных исследований КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца), задуманная еще в советское время. В ходе этой программы планировалось вывести на орбиту три спутника, предназначенные для проведения исследований солнечной активности, регистрации излучения внешней атмосферы Солнца в различных спектральных диапазонах и ускоренных вспышечных частиц, проведения мониторинга межпланетной среды.

Первый спутник этой серии КОРОНАС-И был запущен летом 1994 г. и проработал на орбите несколько месяцев (Собельман и др., 1996). Вторым спутником программы, КОРОНАС-Ф, был запущен летом 2001 г. (Ораевский, Собельман, 2002) и успешно работал до конца 2005 г. 30 января 2009 г. на орбиту Земли был выведен третий космический аппарат программы КОРОНАС – спутник КОРОНАС-ФОТОН (Котов, 2004). В состав научного комплекса на спутнике входят 12 приборов, предназначенных для исследования различных проявлений активности Солнца в широком спектральном и энергетиче-

ском диапазонах. Научное руководство проектом осуществляется МИФИ.

Для трех спутников проекта КОРОНАС в ФИАН были созданы комплексы аппаратуры для исследования солнечной короны методом изображающей спектроскопии Солнца в мягком рентгеновском (МР) и вакуумном ультрафиолетовом диапазонах (ВУФ) длин волн, который предусматривает регистрацию полного диска с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением. Принципиальным в методе изображающей спектроскопии является регистрация монохроматических изображений в различных спектральных линиях коротковолнового диапазона спектра. Это позволяет определять параметры плазмы (температуру, плотность, обилия элементов и др.) солнечной короны с высокой точностью, характерной для спектральных методов исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕСИС

Для космического аппарата КОРОНАС-ФОТОН в ФИАН был разработан комплекс телескопов и спектрометров ТЕСИС, основной целью которого стало проведение эксперимента по исследованию солнечной короны и переходного слоя Солнца с высоким временным, пространственным и спектральным разрешением.

Среди задач эксперимента ТЕСИС – исследование механизмов накопления и высвобождения энергии в атмосфере Солнца, изучение активных солнечных процессов (вспышек и выбросов массы), диагностика физических условий в корональной и вспышечной плазме. Комплекс приборов ТЕСИС имеет высокое пространственное (до 1.7") и временное (до 1 с) разрешение, позволяет прово-

Характеристики аппаратуры ТЕСИС

Канал регистрации, длина волны, Å	Оптическая схема	F, мм	Угловой размер пиксела, угл. с	Поле зрения, угл. град	Селективность, $\lambda/\Delta\lambda$	Доминирующие ионы	Форма поверхности зеркала	Размер зеркала, мм
132 171	Телескоп Гершеля	1630	1.71	1	≈ 26 (132 Å) ≈ 28 (171 Å)	Fe XIX, Fe XX, Fe XXIII (132 Å) Fe IX (171 Å)	Внеосевая парабола	Ø100
171 304 304	Телескоп Гершеля Спектрогелиограф	1630 600	1.71 4.6	1 2	≈ 28 (171 Å) ≈ 30 (304 Å) ≈ 7 , дисперсия – 2.9×10^{-2} Å/пиксел	Fe IX (171 Å) He II, Si XI (304 Å) Fe XV, Ni XVIII, Si IX, Ca XVIII, Si XI, He II, Mg VIII и др.	Внеосевая парабола Осевая парабола	Ø100 Ø80
304	Ричи–Кретьена	600	4.6	2	≈ 7	He II, Si XI	Осевые параболы	Первичное – 80/20 Вторичное – 40/10
8.42	Спектрогелиограф	1200	2.3	1.3	≈ 210 , дисперсия – 3.8×10^{-4} Å/пиксел	Mg XII	Сфера	120 × 80
Sphinx	Твердотельный Si-спектрометр, 0.5–15 кэВ							

дить наблюдения как в нижней атмосфере Солнца, так и на больших расстояниях от его поверхности (до трех радиусов), а также исследовать плазму в широком спектральном диапазоне с высоким разрешением (до 0.01 Å).

Комплекс аппаратуры ТЕСИС состоит из блока датчиков (БД), блока электроники (БЭ) и блока оптических датчиков (ОД). БД является основным блоком, содержащим научную аппаратуру для регистрации солнечных изображений и спектров коротковолнового диапазона. БЭ содержит центральный процессор, оперативную память и электронные интерфейсы для подключения БД и ОД, а также связи со служебными системами спутника. ОД представляет собой два соосных противонаправленных телескопа, с осью визирования, перпендикулярной оси на Солнце, и служит для определения текущей ориентации аппаратуры ТЕСИС и ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН.

Научная аппаратура ТЕСИС включает шесть независимых каналов регистрации – телескопы ВУФ-диапазона, спектрогелиографы МР- и ВУФ-диапазонов и спектрометр-фотометр Sphinx рентгеновского диапазона (Sylwester и др., 2008). Основные характеристики каналов регистрации прибора ТЕСИС приведены в табл. Схема БД ТЕСИС приведена на рис. 1.

НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО АППАРАТУРЫ ТЕСИС

Телескопы высокого разрешения

Телескопы высокого разрешения аппаратуры ТЕСИС предназначены для регистрации изображе-

ний солнечной короны в отдельных интервалах ВУФ-диапазона спектра. Спектральные диапазоны подобраны специально для наблюдения структуры солнечной атмосферы в широком интервале температур: от переходного слоя (50 тыс. К, линия He II $\lambda \approx 304$ Å), до “спокойной” короны (~1 млн. К, линия Fe IX $\lambda \approx 171$ Å) и горячей вспышечной плазмы (10–20 млн. К, линии Fe XX, XXI, XXIII $\lambda \approx 132$ Å).

В аппаратуре ТЕСИС используются два независимых канала: первый на длины волн 132 и 171 Å, второй – 171 и 304 Å. В первом канале изображение формируется *одновременно* в двух участках спектра, во втором канале выбор спектрального участка осуществляется поворотом дополнительной диафрагмы.

Оба телескопа построены по оптической схеме Гершеля, с внеосевыми асферическими зеркалами большой апертуры. Асферизация зеркал выполнена за счет нанесения на сферические подложки многослойного покрытия с заданным профилем. Сверху на асферизирующие покрытия нанесены многослойные покрытия, селективно отражающие в отдельных интервалах ВУФ-диапазона. Принципиальная схема телескопических каналов аппаратуры ТЕСИС приведена на рис. 2.

Первый канал с диапазонами 132 Å и 171 Å предназначен, в основном, для изучения мелкомасштабной структуры и динамики горячей вспышечной плазмы (10–20 млн. К) по изображениям в линиях железа Fe XX, XXI, XXIII вблизи $\lambda \approx 132$ Å. Поскольку такая плазма присутствует не на всем диске Солнца, а только в отдельных компактных областях (Zhitnik и др., 2003), то для определения ее положения на солнечном диске используется изоб-

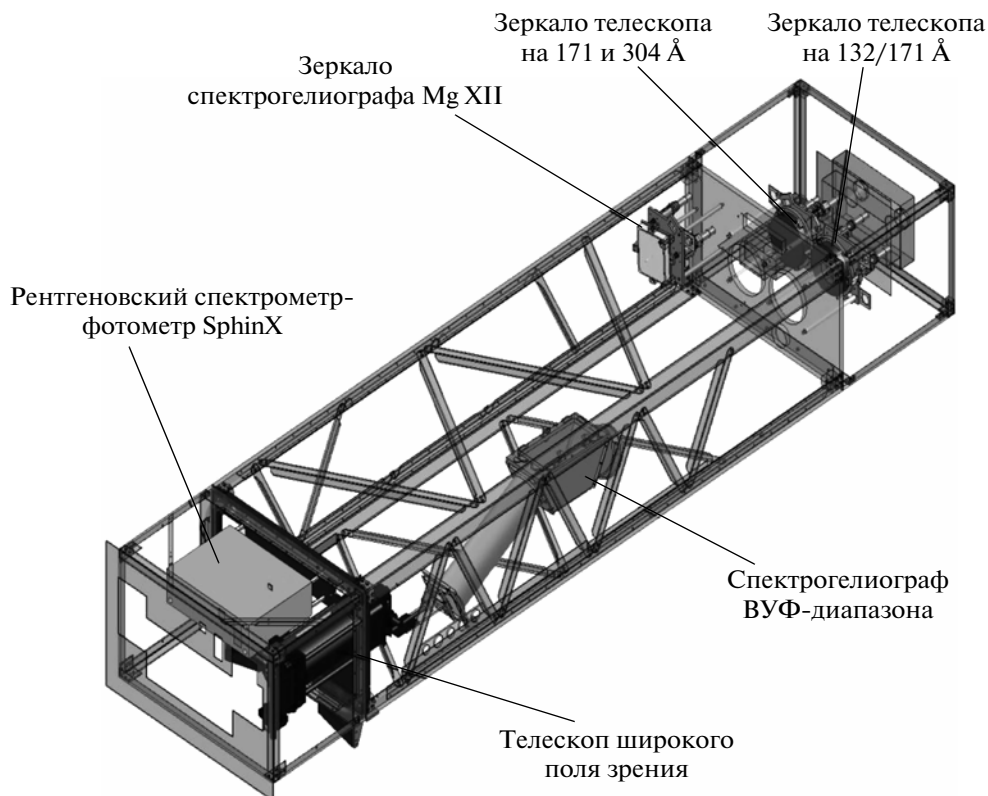


Рис. 1. Схема БД ТЕСИС.

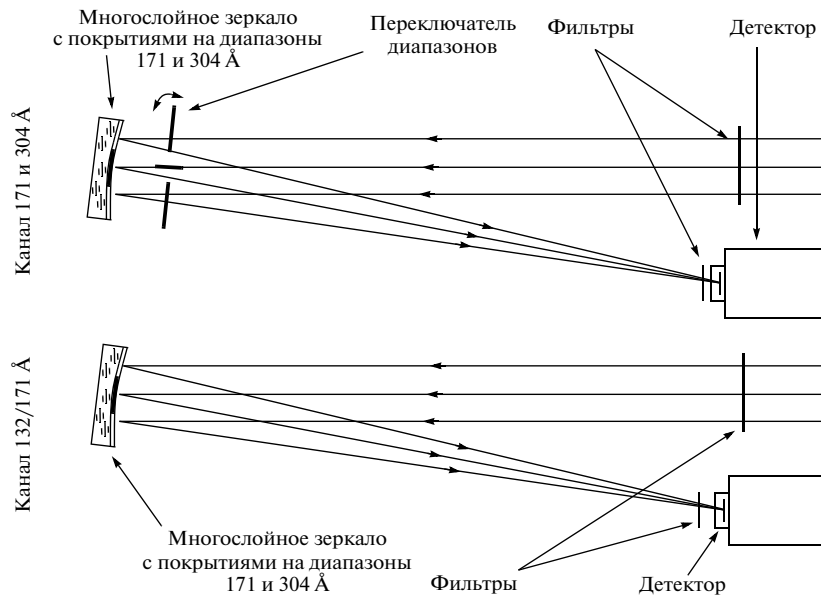


Рис. 2. Оптическая схема телескопов 132/171 Å и 171/304 Å.

ражение “спокойной” короны, полученное в линии холодного железа Fe IX (0.9 млн. К) вблизи $\lambda \approx 171 \text{ \AA}$.

Второй канал телескопа предназначен для наблюдения мелкомасштабной структуры и динами-

ки “спокойной” короны (линия Fe IX $\lambda \approx 171 \text{ \AA}$) и переходного слоя (линия He II $\lambda \approx 304 \text{ \AA}$).

В телескопах используются зеркала нормального падения с апертурой $D = 100 \text{ мм}$, внеосевой вынос

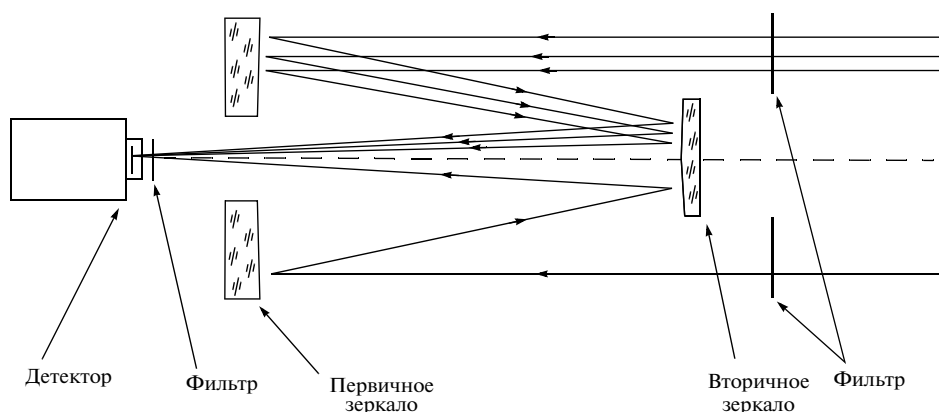


Рис. 3. Оптическая схема телескопа-короннографа.

зеркал составляет $h = 110$ мм, фокусное расстояние телескопов — $F = 1630$ мм. Угловой размер 1-го пиксела составляет $\sim 1.707''$.

Телескоп-короннограф широкого поля зрения

Телескоп-короннограф широкого поля зрения предназначен для наблюдения дальней короны Солнца в ВУФ-диапазоне. Телескоп построен по оптической схеме Ричи–Кретьяна, с двумя асферическими многослойными зеркалами и детектором изображений на основе backside ПЗС-матрицы. Принципиальная схема телескопа приведена на рис. 3. Телескоп имеет поле зрения 2° , первичное зеркало диаметром $D_p = 80/20$ мм (внешний/внутренний диаметр), вторичное зеркало диаметром $D_s = 40$ мм, расстояние между вершинами зеркал $l = 225$ мм, рабочий отрезок $\Delta = 30$ мм (вынос плоскости детектора от первичного зеркала). При такой оптической схеме эффективное фокусное расстояние составляет $F = 620$ мм, угловой размер 1 пиксела $4.6''$.

Рабочий спектральный диапазон телескопа вблизи 304 \AA определяется используемыми многослойными зеркалами с покрытием на основе Mo/Si структуры. В отличие от телескопов высокого разрешения аппаратуры ТЕСИС, в этом канале асферизация зеркал выполнена за счет формы подложки. На ПЗС-матрицу после Al-фильтра также был нанесен дополнительный Sc-фильтр для блокировки относительно мощного излучения солнечного диска в линии He II $\lambda \approx 304 \text{ \AA}$.

Спектрогелиограф Mg XII

Спектрогелиограф Mg XII аппаратуры ТЕСИС предназначен для регистрации монохроматических изображений солнечной короны в спектральной линии водородоподобного иона Mg XII $\lambda = 8.42 \text{ \AA}$. Так как излучение этой линии происходит в достаточно горячей плазме ($T > 5$ млн. К), спектрогелиограф будет регистрировать прямые изображения только горячей плазмы, не смешанные с изображе-

нием более холодной “спокойной” короны (Zhitnik и др., 2003).

Спектрогелиограф Mg XII аппаратуры ТЕСИС является улучшенным аналогом рентгеновского спектрогелиографа ИСЗ КОРОНАС-Ф, данные которого успешно использовались для исследования вспышечных процессов (Zhitnik и др., 2003; Урнов и др., 2007; Шестов и др., 2010).

Исключительно важной особенностью канала Mg XII является его монохроматичность, обусловленная высокой селективностью и отсутствием других интенсивных линий в солнечном спектре вблизи линии Mg XII. Зависимости интенсивности излучения линии Mg XII от температуры и плотности плазмы известны с хорошей точностью, что позволит, с учетом возможности одновременных наблюдений с телескопом на 132 \AA , проводить более точную диагностику наблюдаемых явлений.

Принципиальная оптическая схема спектрогелиографа Mg XII приведена на рис. 4. Входящее излучение проходит предфильтр и попадает на сферическое изогнутое кристаллическое зеркало. Падающее излучение дифрагирует на зеркале по закону Брега–Вульфа и фокусируется на детекторе. Детектором изображений служит backside ПЗС-матрица. Радиус кривизны зеркала составляет $R = 2710$ мм, рабочая длина волны $\lambda = 8.42 \text{ \AA}$, кристаллическое зеркало изготовлено таким образом, что рабочее $2d = 8.501 \text{ \AA}$. Угол падения в такой схеме составляет 8.2° , при этом угловой размер 1 пиксела составляет $2.1''$.

По условию дифракции Брега–Вульфа, отражение параллельного пучка происходит не на всей поверхности зеркала, а на отдельной полосе, положение и размер которой определяются углом падения пучка и его спектральным составом. Сферическая aberrация, присущая такой схеме, приводит к тому что фокусировка линий дублета Mg XII $\lambda = 8.419$ и $\lambda = 8.426 \text{ \AA}$ происходит в разных точках, что дает возможность разрешать дублет и измерять характеристики отдельных его компонент.

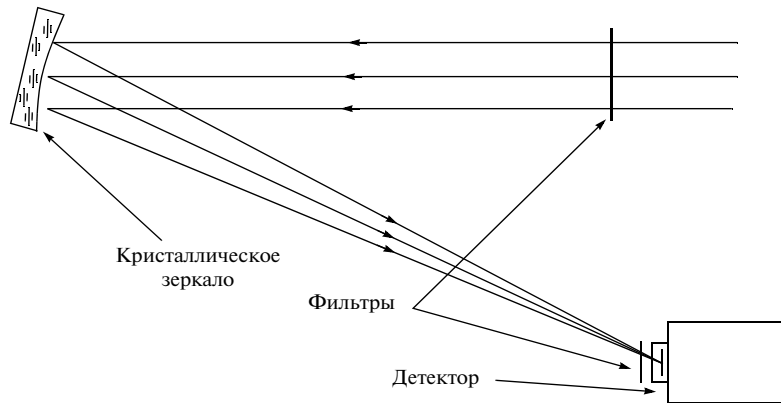


Рис. 4. Оптическая схема спектрогелиографа Mg XII.

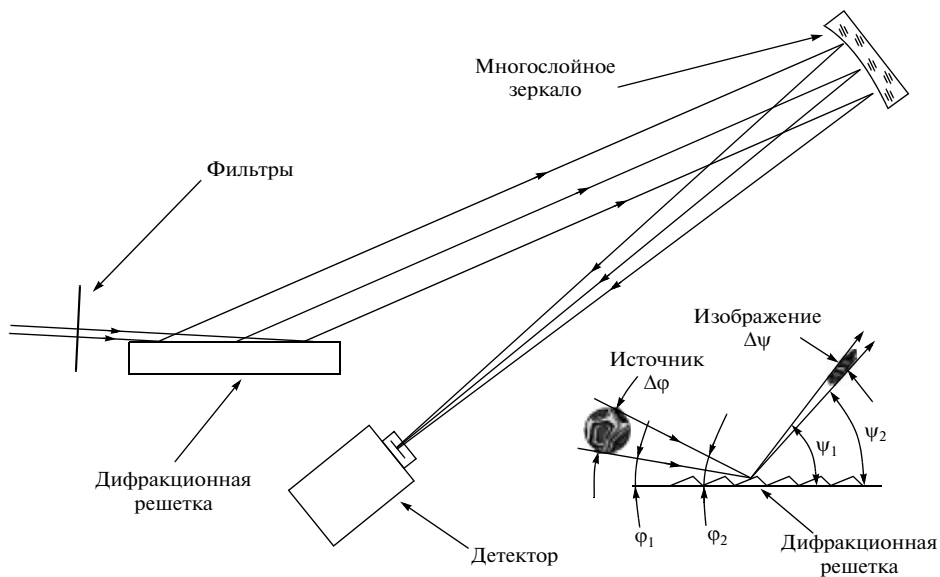


Рис. 5. Оптическая схема спектрогелиографа ВУФ-диапазона.

Спектрогелиограф ВУФ-диапазона

Спектрогелиограф ВУФ-диапазона предназначен для регистрации серии монохроматических изображений Солнца в спектральных линиях диапазона 280–330 Å. Особенностью этого спектрогелиографа является сочетание в одном приборе спектроскопических и изображающих свойств, что позволит проводить высокоточную диагностику плазмы отдельных компактных структур солнечной короны.

Спектрогелиограф реализован по бесщелевой схеме с дифракционной решеткой скользящего падения. Оптическая схема спектрогелиографа приведена на рис. 5. Падающее излучение проходит предфильтр, попадает под малым углом скольжения ($\sim 1.5^\circ$) на дифракционную решетку, дифрагирует, попадет на многослойное Mo/Si зеркало и фокусируется на детекторе – ПЗС-матрице с фильтром. При такой оптической схеме на детекторе

строится последовательность монохроматических изображений Солнца в отдельных спектральных линиях рабочего диапазона, смещенных вдоль направления дисперсии и сжатых в этом направлении (см. рис. 5). В спектрогелиографе используются дифракционная решетка с плотностью штрихов 3600 л/мм размерами 80 × 210 мм, многослойное асферическое зеркало с $F = 600$ мм и световым диаметром $D = 80$ мм. Спектрогелиограф предназначен для работы в диапазоне длин волн $\lambda \sim 280\text{--}330$ Å, дисперсия составляет 0.0285 Å/пиксел.

Аналогичные спектрогелиографы успешно работали на ИСЗ КОРОНАС-И, на диапазон длин волн 180–206 Å (Житник и др., 1998) и КОРОНАС-Ф, где было два спектрогелиографа на диапазоны 176–207 Å и 280–330 Å (Бейгман и др., 2005). Благодаря полю зрения более 1° , содержащему весь солнечный диск, за время работы эксперимента СПИРИТ на ИСЗ КОРОНАС-Ф (2001–2005 гг.) было зарегистрировано

стрировано более 100 спектров вспышек, в т.ч. более 30 спектров мощнейших солнечных вспышек балла X. Эти наблюдения были использованы для составления каталогов спектральных линий (Бейгман и др., 2005; Шестов и др., 2008), определения плотности плазмы и температурного состава в активных областях и вспышках (Шестов и др., 2009; 2010).

ВУФ-спектрогелиограф аппаратуры ТЕСИС является улучшенным вариантом спектрогелиографа 280–330 Å, работавшего на ИСЗ КОРОНАС-Ф. В нем применяется зеркало увеличенной апертуры, более чувствительный детектор на основе ПЗС-матрицы с обратной засветкой. Рабочий спектральный диапазон 280–330 Å содержит спектральные линии различных ионов, вместе покрывающих широкий интервал температур – от температуры переходного слоя ($T \sim 50$ тыс. К, He II $\lambda = 303.8$ Å), до высокотемпературной вспышечной плазмы ($T \sim 20$ МК, Ca XVIII $\lambda = 302.3$ Å, Fe XXII $\lambda = 292.3$ Å).

Оптические датчики

ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН имеет одноосную систему ориентации – его ось Z направлена на центр Солнца. Для определения угла поворота спутника вокруг оси Z и привязки изображений, полученных телескопами ТЕСИС, к солнечной системе координат используются оптические датчики, входящие в состав комплекса аппаратуры. Датчики осуществляют фотографирование звездного неба в поле зрения $\sim 7^\circ$. Определение угла поворота спутника выполняется на Земле путем привязки изображений, полученных в ОД, к карте звездного неба.

На рис. 6 приведена зависимость угла поворота вокруг оси Z спутника от времени в сентябре 2009 г. В этот период данные с оптических датчиков поступали через каждые 10 мин, точность определения угла поворота составила $\sim 0.5'$.

Система электроники аппаратуры ТЕСИС

Аппаратура ТЕСИС включает в себя комплексную систему электроники, куда входят центральный процессор, оперативная память, контроллеры детекторов и двигателей, интерфейсы для коммутации со служебными системами спутника, вторичные источники питания и др. Бортовой компьютер, основными элементами которого являются центральный процессор, оперативная память и интерфейсы коммутации, расположен в БЭ ТЕСИС и находится в гермоотсеке ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН. БД и ОД аппаратуры ТЕСИС содержат детекторы изображений вместе с контроллерами, контроллеры приводов и датчики температуры.

Бортовой компьютер ТЕСИС предназначен для управления каналами регистрации, механикой и приводами ТЕСИС, обработки, временного хранения и передачи на ССРНИ (Система Сбора и Регистрации Научной Информации) полученной информации. В качестве его основного процессора

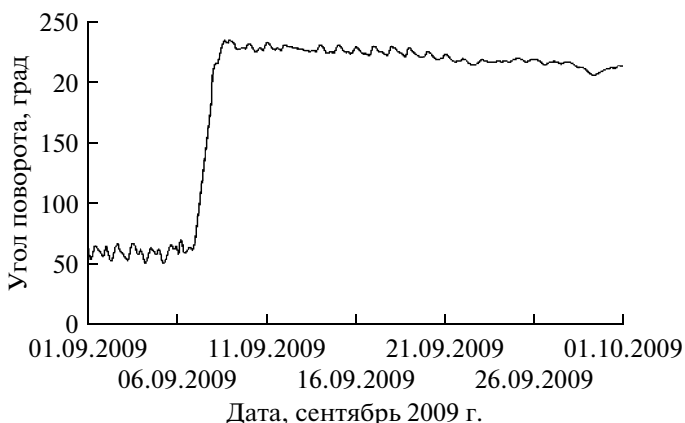


Рис. 6. Зависимость угла поворота ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН вокруг оси Z по данным ОД аппаратуры ТЕСИС.

использован цифровой сигнальный процессор (DSP) ADSP2185 фирмы AnalogDevices, быстродействием 64 Mips. Минимальный набор системного программного обеспечения (ПО), так называемый BIOS, предназначенный для взаимодействия с бортовыми системами, находится в однократно программируемом ПЗУ емкостью 2 Кбайта. Для программ оперативного управления аппаратурой ТЕСИС используется многократно программируемое ПЗУ емкостью 128 Кбайт. Большой объем ПЗУ позволяет хранить в памяти четыре копии программного обеспечения или даже четыре различных экземпляра рабочих программ, которые могут быть выбраны по команде с Земли. Основная память ТЕСИС, объемом 256 Мбайт, предназначена для приема информации с ПЗС-матриц и детекторов канала SphinX и обработки полученной информации, а также может служить промежуточным буфером при передаче накопленных данных в ССРНИ.

Внутренняя логика (реализующая взаимодействие с бортовыми системами, контроллеры ПЗС, контроллеры приводов, контроллер памяти) выполнена на однократно программируемых CDLP 54SX32A фирмы Actel.

Связь между бортовым компьютером ТЕСИС и периферией, расположенной в БД и ОД, осуществляется по последовательным каналам связи с пропускной способностью 8 Мбит/с. Быстродействие центрального процессора ТЕСИС и использованная архитектура позволяют работать одновременно и независимо всем периферийным устройствам.

Бортовое программное обеспечение предназначено для обработки и сжатия изображений и служебной информации, а также их упаковки для последующей передачи в служебные системы спутника.

ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ АППАРАТУРЫ ТЕСИС

В качестве фокусирующих элементов в аппаратуре ТЕСИС используются многослойные зеркала

нормального падения (для ВУФ-диапазона — около 132, 171 и 304 Å) и кристаллическое фокусирующее зеркало нормального падения (на диапазон 8.42 Å). Детекторы изображений аппаратуры ТЕСИС выполнены на основе backside ПЗС-матриц, форматом 2048 × 2048 пикселей. Для блокировки интенсивного излучения видимого диапазона в аппаратуре ТЕСИС используется двойная система фильтрации на основе многослойных тонкопленочных фильтров.

Многослойные зеркала нормального падения

В телескопических каналах аппаратуры ТЕСИС используются широкоапертурные асферические зеркала с многослойным отражающим покрытием. Зеркала имеют световой диаметр 100 мм и радиус кривизны при вершине 3250 мм. Асферизация подложек и нанесение многослойных отражающих покрытий были выполнены в Институте физики микроструктур (ИФМ) РАН (г. Нижний Новгород). Асферизация проведена с помощью дополнительного корректирующего напыления (Зуев и др., 2008б). Для этого на поверхность подложки зеркала методом магнетронного напыления нанесено многослойное покрытие Cr/Sc с заданным распределением толщины по апертуре.

В предыдущих экспериментах ФИАН на спутниках КОРОНАС телескопические изображения, полученные в широких спектральных интервалах, дополнялись спектрограммами, полученными с более низким пространственным, но существенно более высоким спектральным разрешением. В аппаратуре ТЕСИС большинство каналов телескопические, поэтому для реализации метода изображающей спектроскопии в Институте физики микроструктур РАН были разработаны новые многослойные покрытия на очень узкие спектральные интервалы (Зуев и др., 2008б). Применение в телескопах комплекса ТЕСИС зеркал с такими покрытиями позволяет проводить точную диагностику плазмы спектроскопическими методами по телескопическим изображениям, полученным с высоким пространственным разрешением.

Выбор рабочих спектральных диапазонов зеркал определялся основными научными задачами телескопов ТЕСИС. Особенностью эксперимента ТЕСИС является использование зеркал с относительно узкими рабочими спектральными интервалами ($\lambda/\Delta\lambda \sim 25$), что, в свою очередь, требует высокого пикового коэффициента отражения многослойных покрытий.

Покрытие для диапазона вблизи 132 Å было выполнено на основе многослойной Mo/Si структуры. Измерение пикового коэффициента отражения зеркала и его спектральной селективности, проведенное в ИФМ РАН, дало следующие результаты: $R \approx 64\%$, $\lambda/\Delta\lambda \sim 26$.

Покрытие для диапазона вблизи 171 Å представляет собой многослойную Al/Zr структуру. Пиковый коэффициент отражения и спектральная се-

лективность составили $R \approx 56\%$ и $\lambda/\Delta\lambda \sim 28$ соответственно.

Традиционно для спектрального диапазона вблизи 304 Å используются покрытия на основе Mo/Si структур. Однако такие структуры обладают невысокой спектральной селективностью $\lambda/\Delta\lambda \sim 10$. Для зеркал диапазона 304 Å аппаратуры ТЕСИС в ИФМ РАН специально было разработано новое многослойное покрытие на основе структуры Si/Cr/Mg/B₄C. Измерения пикового коэффициента отражения и спектральной селективности, выполненные в ИФМ РАН, дали следующие результаты: $R \approx 30\%$, $\lambda/\Delta\lambda \sim 30$.

Для проведения спектроскопической диагностики плазмы солнечной короны по наблюдениям телескопов необходима информация об относительной спектральной эффективности зеркал вблизи центральной длины волны. Измерение этих параметров было проведено в ФИАН (Вишняков и др., 2009). Измеренные спектральные характеристики зеркал приведены на рис. 7.

Кристаллическое фокусирующее зеркало

Для формирования изображений на длине волны $\lambda = 8.42$ Å в спектрогелиографе Mg XII аппаратуры ТЕСИС используется кристаллическое фокусирующее зеркало. Зеркало представляет собой тонкую (толщиной 0.4 мм) пластину из кристаллического кварца, закрепленную методом оптического контакта на сферической подложке с радиусом кривизны 2700 мм. Пластина кристаллического кварца изготовлена таким образом, что ее рабочая кристаллографическая плоскость [10.0] с $2d = 8.501$ Å параллельна геометрической поверхности кристалла с высокой точностью (локальное расхождение $\sim 5''$). Зеркало имеет прямоугольную форму 80 × 100 мм. Подложка зеркала и рабочий кристалл были изготовлены в ФИАН, нанесение кристалла на подложку выполнено в ИФМ РАН.

Эффективность отражения зеркала на рабочей длине волны была измерена на синхротронном источнике в г. Пекин, Китай (Кузин и др., 2009). Пиковый коэффициент отражения составил 10%, эффективная площадь зеркала — 2.5 см².

Детекторы изображений

Детекторы изображений аппаратуры ТЕСИС изготовлены на основе backside ПЗС-матриц форматом 2048 × 2048 пикселей. Использовались ПЗС-матрицы CCD42-40, производства фирмы e2v (Англия). Размер одного пикселя ПЗС-матриц составляет 13.5 мкм, размер рабочей поверхности 27.5 × 27.5 мм. Детекторы оснащены 14-битным АЦП и работают в малокадровом режиме. Время накопления изображения (задается с Земли) может варьироваться от 0.1 до 600 с. Время считывания изображений определяется скоростью считывания 1-го пикселя (~ 2 мкс) и размером считываемого изобра-

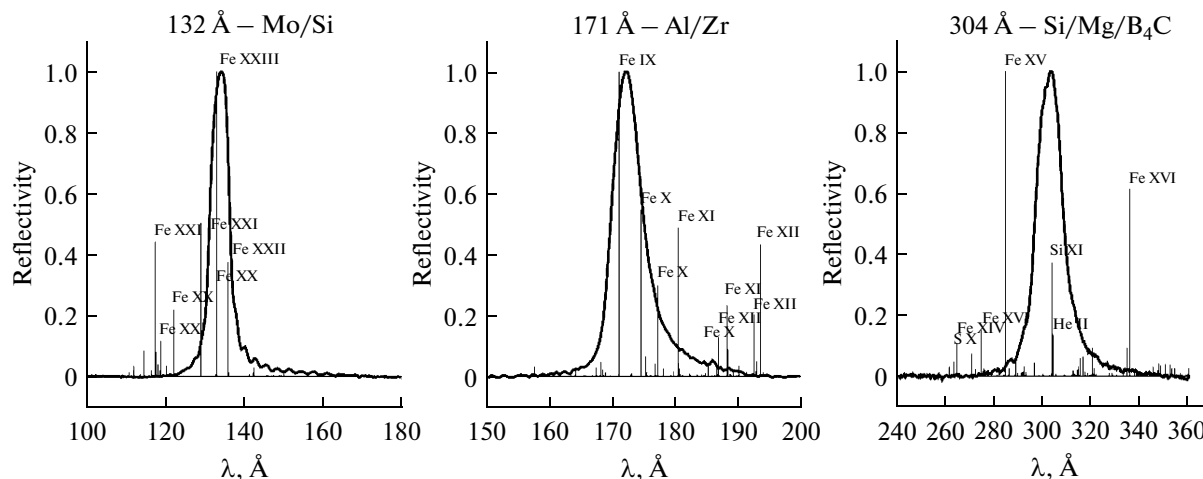


Рис. 7. Спектральные характеристики зеркал телескопов аппаратуры ТЕСИС вблизи рабочих длин волн. Указаны наиболее сильные спектральные линии диапазонов.

жения. Для “полных” изображений форматом 2048×2048 оно составляет ~ 8 с. При этом возможна работа телескопов в режиме части кадра. Время, затрачиваемое на считывание одного кадра в таком режиме, уменьшается пропорционально используемой площади ПЗС.

Детекторы изображений аппаратуры ТЕСИС оснащены однокаскадными Пельтье-холодильниками. Отвод тепла от детекторов осуществляется на радиаторы, практически не освещаемые Солнцем. Во время отладочных работ было установлено, что детекторы изображений телескопов ТЕСИС даже при выключенных холодильниках Пельтье имеют температуру от -40°C до -20°C , поэтому дополнительное охлаждение при помощи Пельтье-термоэлементов не применяется.

Для исследования физических условий в плазме солнечной короны по данным наблюдений необходимы сведения об абсолютной чувствительности детекторов в рабочих диапазонах длин волн. Такие измерения для длины волны $\lambda = 8.42 \text{ \AA}$ были проведены на синхротронном источнике в г. Пекине, Китай (Кузин и др., 2009) и для ВУФ-диапазона $132\text{--}304 \text{ \AA}$ на синхротронном источнике в г. Хефэй, Китай (Кузин и др., 2008). Чувствительность для длины волны $\lambda = 8.42 \text{ \AA}$ составила 31 ед. АЦП/фотон, для ВУФ-диапазона от 0.01 до 0.1 ед. АЦП/фотон.

Фильтры

В аппаратуре ТЕСИС блокировка мощного видимого света осуществляется системой входных фильтров и фильтров детекторов. Входные фильтры представляют собой многослойные структуры (Al для диапазонов вблизи 171, 304 \AA и Zr/Si для 132 \AA соответственно), нанесенные на поддерживающие сетки. Фильтры детекторов нанесены непосредственно на рабочие поверхности ПЗС-матриц. Все

многослойные фильтры были изготовлены в ИФМ РАН (Зуев и др., 2008a).

Входной фильтр спектрогелиографа Mg XII на длину волны 8.42 \AA представляет собой алюминированный лавсан толщиной 3.8 мкм и был изготовлен в ФИАН.

Измерение спектральных характеристик фильтров в рабочих диапазонах длин волн проводилось на синхротронном источнике в г. Хэфэй, Китай и в ИФМ РАН (Кузин и др., 2009). Степень блокировки видимого света была измерена в ФИАН и составила $\sim 10^6$.

УПРАВЛЕНИЕ ПРИБОРОМ ТЕСИС

Управление ТЕСИС осуществляется командами, поступающими с Земли на борт во время сеансов связи. Команды представляют собой набор байтов (число от 0 до 255), исполняемых последовательно. В зависимости от назначения команды, она может иметь произвольную длину. В целом, алфавит команд ТЕСИС организован так, чтобы наиболее употребляемые команды состояли всего из 1 байта. Так, для формирования изображения в канале 304 \AA с экспозицией 1 с достаточно передать в прибор одно шестнадцатиричное число '4A'0X. Это позволяет значительно сократить объем управления. Передаваемые в прибор команды организуются в виде последовательности, которая образует законченную программу (циклограмма). Программа может быть исполнена сразу после поступления с Земли, либо передана в прибор с задержкой в несколько часов и даже дней. Буфером, в котором циклограмма хранится до выдачи в прибор, является бортовая управляющая машина спутника. На практике, основным режимом для научных программ наблюдения является выдача программ в заданное время. Режим прямой передачи команд в прибор применяется при перепрограммировании прибора. Поскольку бортовая машина выдает в

ТЕСИС в заданное время сразу всю хранящуюся в памяти циклограмму, возникает проблема организации команд по времени внутри самого прибора. Для этого в ТЕСИС используются команды разметки времени: (1) “исполнить следующую команду через заданное время после предыдущей” и (2) “исполнить следующую команду в заданное время”. Времена ожидания в командах первого типа лежат в диапазоне от 0.1 с до 255 мин. Время исполнения в командах второго типа находится в пределах 1 месяца. Также предусмотрены, но на практике редко используются, команды “исполнить следующую команду через заданное время после сигнала СВЕТ” и “исполнить следующую команду через заданное время после сигнала ВШИР”. Сигнал СВЕТ поступает в прибор при выходе спутника на освещенный участок орбиты, а сигнал ВШИР – при заходе спутника в радиационные пояса Земли. В целом, существующий набор разметки по времени позволяет сформировать любой график исполнения команд.

Для упрощения управления в алфавит команд ТЕСИС также входят команды организации циклов (LOOP, ENDLOOP), позволяющие несколько раз повторять исполнение одной и той же последовательности команд. Число повторов – от 1 до 255, а допустимый уровень вложенности циклов друг в друга – 8. Внутренняя память ТЕСИС позволяет хранить на борту до 128 циклограмм объемом до 256 байт каждая. Циклограммы вызываются специальной командой из алфавита ТЕСИС, после чего исполняются таким же образом, как и программы, поступившие с Земли. На практике, в настоящее время задействовано около 30 готовых бортовых циклограмм.

Частота управления ТЕСИС составляет в среднем 1 сеанс связи за 2 суток. Так за первый год работы ТЕСИС с 31 января по 31 декабря 2009 г. было использовано 165 сеансов связи, в которых на борт было передано около 700 программ управления. В целом потребность комплекса телескопов в управлении можно оценить как весьма высокую.

По состоянию на январь 2010 г. алфавит ТЕСИС включает 71 команду, позволяющую контролировать все режимы работы аппаратуры. Из них 68 команд присутствовали на момент запуска, а 3 были добавлены в ходе первого года эксперимента.

ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТЕСИС

Режим работы ТЕСИС определяется тремя основными факторами: (1) выбранные каналы регистрации изображений, (2) частота получения изображений, (3) формат изображения и (4) метод сжатия изображения. Очевидно, что оптимальным режимом работы прибора является ситуация, когда все его каналы активизированы, работают с максимальной частотой и получают изображения полного формата с наилучшим пространственным разрешением. К сожалению, такая идеализированная ситуация невозможна на практике, прежде всего из-за ограничений на телеметрию. Кроме того, одновре-

менная работа всех каналов прибора невозможна с технической точки зрения.

С точки зрения выбора каналов регистрации изображений, режимы работы ТЕСИС делятся на синоптические и научные. В синоптическом режиме работы задействуется максимальное число каналов, но с ограниченной частотой съемки. С учетом ограничений на ежедневный объем телеметрии (~0.5 Гбайт), временное разрешение синоптических программ ТЕСИС составляет около 5–10 мин. Целью синоптических программ является мониторинг атмосферы Солнца (главным образом, вспышечных и взрывных процессов).

Альтернативой синоптическим являются целевые научные программы наблюдений, когда основное наблюдение осуществляется в 1–2 каналах ТЕСИС. Выбор каналов, очевидно, зависит от научной задачи. Так, например, в программе исследования высокотемпературной плазмы задействованы каналы ТЕСИС Fe XXIII 132 Å и Mg XII 8.42 Å, изображение в которых формируется при температурах плазмы 5–20 млн. К. Ограничение на число каналов позволяет улучшить временное разрешение наблюдений до 1–5 мин.

В течение первого года работы ТЕСИС около 40% телеметрии было отдано под синоптические наблюдения, а около 60% под целевые научные исследования.

С точки зрения частоты получения изображений, режимы ТЕСИС делятся на обычные и режимы с высоким временным разрешением. Под высоким разрешением понимается частота лучше 1 мин. Серии с высоким временным разрешением относятся к научным программам и применяются для изучения быстрых нестационарных процессов в короне Солнца. В течение 2009 г. под них было выделено около 10% объема телеметрии, в том числе около 2% под серии сверхвысокого разрешения с частотой получения кадров быстрее 10 с.

Что касается формата изображения, то в ходе эксперимента ТЕСИС применяются два основных режима: режим получения изображения полного диска Солнца и режим получения изображения фрагмента диска. В последнем случае на борту получается полное изображение, из которого в память сохраняется только заданный фрагмент. Параметры окна считывания (его положение и размер в пикселях) устанавливаются по команде с Земли.

Режим наблюдения полного диска Солнца является основным режимом синоптических программ наблюдения, а также применяется при исследовании выбросов массы, гигантских эруптивных протуберанцев и других явлений, имеющих глобальный характер. Оконный режим наблюдения Солнца позволяет значительно увеличить число получаемых изображений в рамках заданного лимита телеметрии, поэтому активно применяется в целевых научных программах. Кроме того, в оконном режиме значительно ускоряется время обработки изображения, что позволяет достигать высо-

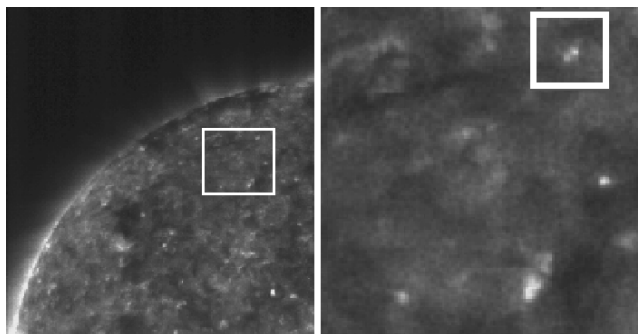


Рис. 8. Фрагмент изображения канала 171 Å прибора ТЕСИС, демонстрирующий пространственное разрешение аппаратуры. Слева – фрагмент полного изображения Солнца. Выделенная квадратная область приведена справа. На ней отмечены хорошо различимые две яркие точки, отстоящие друг от друга на расстояние 3.6 пикселей (6").

кого и сверхвысокого временного разрешения. Основными целями исследования в этом режиме ТЕСИС являются объекты и явления на Солнце, размер которых порядка и меньше одного радиуса Солнца. Это солнечные активные области и группы областей, вспышки, яркие точки, системы корональных петель, спикулы и высокотемпературные источники излучения. В настоящее время с использованием оконного режима ТЕСИС проведены серии уникальным программ наблюдения целого ряда солнечных объектов с временным разрешением лучше 4 с.

Наиболее часто используемые синоптические и научные программы наблюдений реализованы в виде стандартных программ, хранящихся в бортовой памяти ТЕСИС и вызываемых по командам с Земли.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Первые включения научной аппаратуры ТЕСИС состоялись 20 февраля (примерно через 3 недели после запуска), а первые изображения поступили на Землю 26 февраля 2009 г. В течение февраля–апреля 2009 г. проводились летные испытания ТЕСИС: в этот период вместе с научными программами исследований велись калибровочные и отладочные работы, а также отрабатывались основные программы наблюдений. С апреля 2009 г. ТЕСИС перешел в стадию реализации натурного эксперимента.

Ниже на примере конкретных наблюдений демонстрируются возможности научной аппаратуры ТЕСИС.

Телескопические каналы

На рис. 8 приведен фрагмент изображения канала на 171 Å, зарегистрированного 05.03.2009 г. в 17:32 UT с временем экспозиции $t = 10$ с. На изображении видны структуры, отстоящие друг от друга на расстоянии ~3 пикселей.

Временное разрешение телескопов определяется системой считывания изображений с ПЗС-мат-

риц. При регистрации полного кадра 2048×2048 время считывания данных составляет ~8 с. Возможна работа аппаратуры в режиме регистрации выбранной части кадра. При этом временное разрешение сокращается пропорционально площади считываемого кадра. Такие режимы работы обычно

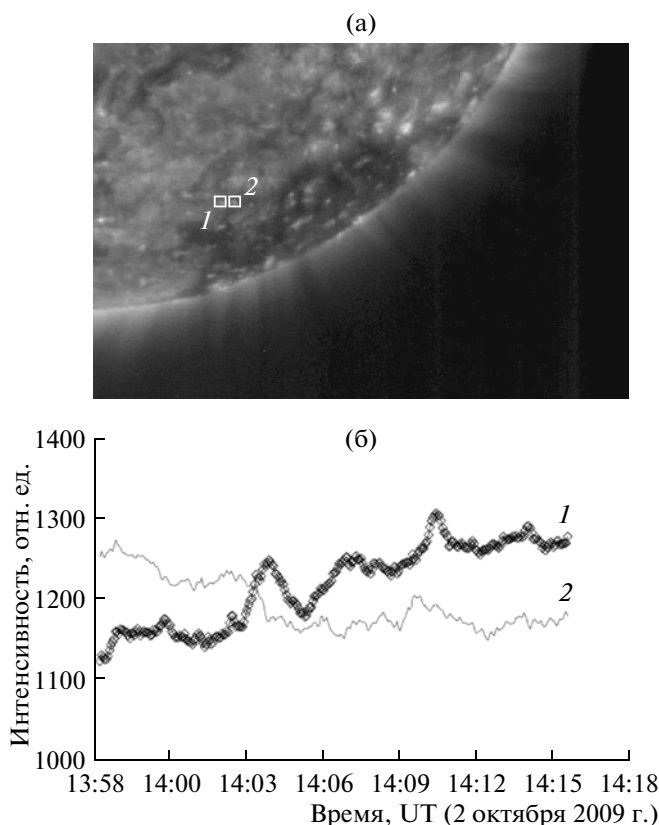


Рис. 9. (а) – изображение канала 171 Å аппаратуры ТЕСИС, полученное в ходе программы наблюдений 2 октября 2009 г. ярких областей с большим временным разрешением. Отмечены исследовавшиеся яркие области. (б) – временной профиль интенсивностей исследуемых областей.

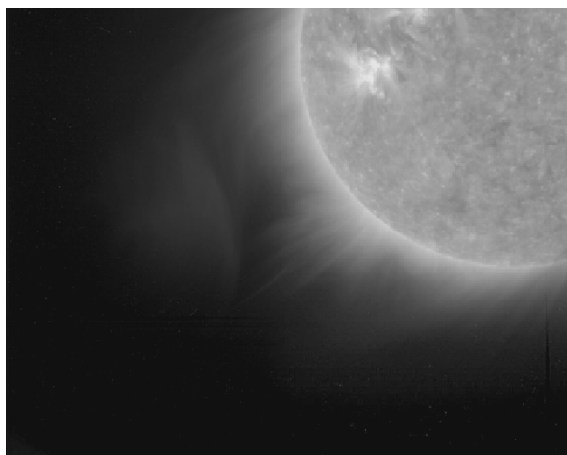


Рис. 10. Составное изображение солнечной короны вблизи 171 \AA , созданное на основе трех изображений с экспозициями 1, 3 и 100 с. По данным наблюдений канала 171 \AA прибора ТЕСИС 5 мая 2009 г.

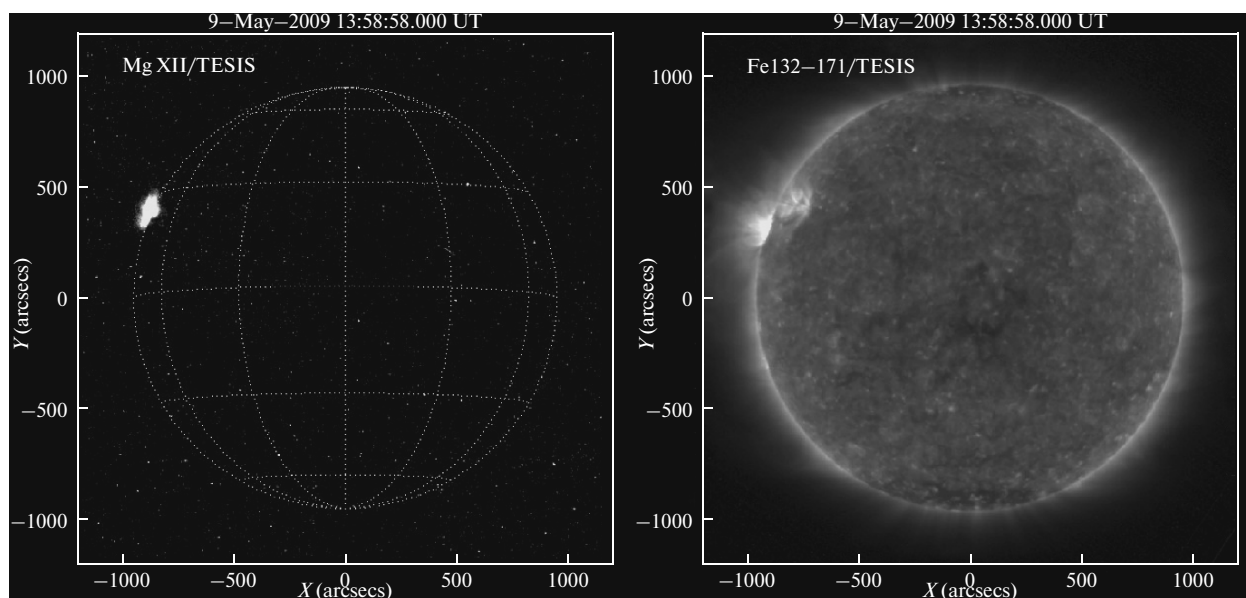


Рис. 11. Изображение солнечной короны в линии $\lambda \approx 8.42 \text{ \AA}$, полученное спектрогелиографом Mg XII (слева), и ВУФ-телескопом $132/171 \text{ \AA}$ (справа).

используются во время проведения целевых наблюдений — наблюдений отдельных локальных структур (активных областей, корональных дыр, спикул в полярных областях и др.). К настоящему времени были проведены серии “быстрых” наблюдений, с временным разрешением около 4 с и длительностью одной серии около 1 ч. На рис. 9а приведено изображение Солнца, на котором отмечены 2 яркие области, наблюдавшиеся 2 октября 2009 г. с большим временным разрешением в рамках целевой программы. На рис. 9б приведен временной профиль интенсивностей этих областей, измеренный с 13:58 до 14:15 UT.

Высокая чувствительность телескопов, обусловленная применением зеркал большой апертуры,

высокоэффективными многослойными покрытиями и детекторами с большой чувствительностью, позволила впервые наблюдать корональные структуры на больших $R > 1$ расстояниях от поверхности Солнца. На рис. 10 показано изображение канала 171 \AA , составленное из трех изображений с временами экспозиции 1, 3 и 100 с. Изображения были зарегистрированы 5 мая 2009 г. около 01:40 UT. На составном изображении виден выброс корональной массы на расстоянии $\sim 1 R$.

Спектрогелиограф Mg XII

На рис. 11 слева приведен пример изображения, зарегистрированного спектрогелиографом Mg XII

9 мая 2009 г. в 13:58 UT с временем экспозиции 100 с. На этом же рисунке справа приведено изображение, зарегистрированное телескопом 132/171 Å аппаратуры ТЕСИС в это же время, с временем экспозиции 1 с. На телескопическом изображении присутствуют две области с повышенной активностью. Излучение линии Mg XII $\lambda = 8.42 \text{ \AA}$ происходит только в одной области, что свидетельствует о существенном отличии плазмы в ярких областях. Яркая область, присутствующая на изображении Mg XII, содержит большое количество горячей плазмы ($T \sim 10 \text{ MK}$).

Авторы выражают благодарность Институту астрофизики НИЯУ МИФИ, осуществляющему научное руководство проекта КОРОНАС-ФОТОН.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 08-02-01301-а и 08-02-13633-офи_ц, программы фундаментальных исследований Президиума РАН Программы № 16, Часть 3, программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Плазменные процессы в Солнечной системе”, гранта № 218816 (проект SOTERIA, www.soteria.eu) седьмой рамочной программы Европейского Союза (FP07/2007-2013) фонда некоммерческих программ “Династия”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бейгман И.Л., Боженков С.А., Житник И.А. и др. Солнечные спектры крайнего ВУФ диапазона, полученные в ходе эксперимента СПИРИТ на борту ОС КОРОНАС-Ф. Каталог линий в области 280–330 Å // Письма в Астрон. журн. 2005. Т. 31. № 1. С. 39–58.
- Вишняков Е.А., Медников К.Н., Рагозин Е.Н. и др. Измерение спектров отражения многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области спектра при помощи широкополосного лазерно-плазменного источника излучения // Квантовая электроника, 2009. Т. 39. № 5. С. 474–480.
- Житник И.А., Кузин С.В., Ораевский В.Н. и др. Спектральный анализ солнечных изображений в области 180–210 Å с помощью спектрогелиографа РЕС-К на ОС КОРОНАС-И // Письма в Астрон. журн. 1998. Т. 24. № 12. С. 943–950.
- Зуев С.Ю., Клюенков Е.Б., Кожевникова З.Л. и др. Многослойные тонкопленочные фильтры экстремального ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов // Рабочее совещание “Рентгеновская оптика-2008”, Черноголовка, 2008: Сб. тез. докл. 2008а. С. 47–49.
- Зуев С.Ю., Кузин С.В., Лопатин А.Я. и др. Многослойная оптика для рентгеновской астрофизики в рамках эксперимента ТЕСИС // Рабочее совещание “Рентгеновская оптика-2008”, Черноголовка, 2008: Сб. тез. докл. 2008б. С. 50–52.
- Кузин С.В., Шестов С.В., Перцов А.А. и др. Спектральные калибровки фильтров и детекторов солнечного телескопа на диапазон 13.2 нм проекта ТЕСИС // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008. № 7. С. 19–23.
- Кузин С.В., Шестов С.В., Перцов А.А. и др. Калибровка рентгеновского спектрогелиографа на длину волны 0.84 нм проекта ТЕСИС // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 7. С. 51–54.
- Ораевский В.Н., Собельман И.И. Комплексные исследования активности Солнца на спутнике КОРОНАС-Ф // Письма в Астрон. журн. 2002. Т. 28. № 6. С. 457–467.
- Собельман И.И., Житник И.А., Игнатьев А.П. и др. Рентгеновская спектроскопия Солнца в области 0.84–30.4 нм в экспериментах ТЕРЕК-К и РЕС-К на спутнике КОРОНАС-И // Астрон. журн. 1996. № 7. С. 604–619.
- Урнов А.М., Шестов С.В., Богачев С.А. и др. О пространственно-временных характеристиках и механизмах образования мягкого рентгеновского излучения в солнечной короне // Письма в Астрон. журн. 2007. Т. 33. № 6. С. 446–462.
- Шестов С.В., Боженков С.А., Житник И.А. и др. Солнечные спектры крайнего ВУФ диапазона, полученные в ходе эксперимента СПИРИТ на борту ОС КОРОНАС-Ф. Каталог линий в области 176–207 Å // Письма в Астрон. журн. 2008. Т. 34. № 1. С. 38–57.
- Шестов С.В., Урнов А.М., Кузин С.В. и др. 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 Астрон. журн. 2009. Т. 35. № 1. С. 50–62.
- Шестов С.В., Кузин С.В., Урнов А.М. и др. Диагностика температуры солнечной плазмы во вспышках и активных областях по линиям спектрального диапазона 280–330 Å в эксперименте СПИРИТ/КОРОНАС-Ф // Письма в Астрон. журн. 2010. Т. 36. № 1. С. 46–60.
- Kotov Yu.D. 35th COSPAR Sci. Assem. 18–25 July 2004. Paris, France. P. 1283.
- Sylwester J., Kuzin S., Kotov Yu.D., et al. SphinX: A fast solar photometer in X-rays // J. Astrophys. and Astron. 2008. V. 29. P. 339–343.
- Zhitnik I.A., Bugaenko O.I., Ignat'ev A.P., et al. Dynamic 10 MK plasma structures observed in monochromatic full-Sun images by the SPIRIT spectroheliograph on the CORONAS-F mission // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2003. V. 338. P. 67–71.