

УДК 520.6.05, 523.9-739, 535-34

## СПЕКТРОФОТОМЕТР МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА SphinX: НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ, КОНСТРУКЦИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ

© 2011 г. С. Гбурек<sup>1</sup>, Я. Сильвестер<sup>1</sup>, М. Ковалински<sup>1</sup>, Я. Бакала<sup>1</sup>, З. Кордылевски<sup>1</sup>,  
П. Подгорски<sup>1</sup>, С. Плосиеньяк<sup>1</sup>, М. Сиарковски<sup>1</sup>, Б. Сильвестер<sup>1</sup>, В. Тржебински<sup>1</sup>,  
С. Кузин<sup>2</sup>, А. Перцов<sup>2</sup>, Ю. Котов<sup>3</sup>, Ф. Фарник<sup>4</sup>, Ф. Реале<sup>5</sup>, К. Дж. Х. Филлипс<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Центр космических исследований, Польская академия наук, Польша

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Россия

<sup>4</sup>Астрономический институт Академии наук Чехии, Чехия

<sup>5</sup>Астрономическая обсерватория Палермо им. Джузеппе С. Вайана, Италия

<sup>6</sup>Центр космических исследований Мулларда, Великобритания

Поступила в редакцию 16.05.2010 г.

Описаны научные задачи и детали конструкции нового польского рентгеновского спектрофотометра SphinX. Прибор предназначен для наблюдения излучения от всего Солнца и входит в качестве отдельного блока в состав российского ВУФ-комплекса ТЕСИС на борту ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН. В SphinX используются детекторы на основе кремниевых PIN-диодов для измерения спектрального состава излучения в диапазоне 0.8–15 кэВ с высоким временным разрешением. Высокое спектральное разрешение SphinX позволяет проводить измерения более чем в 100 отдельных энергетических интервалах всего диапазона. Динамический диапазон охватывает значения энергии на четыре порядка шире, чем динамический диапазон ИСЗ GOES. Относительная и абсолютная погрешности спектральных измерений составляют несколько процентов, что следует из многочисленных лабораторных калибровок.

### ВВЕДЕНИЕ

Измерения потоков рентгеновского излучения Солнца крайне важны для изучения солнечной активности, физики вспышечных процессов и космической погоды. Температура плазмы солнечной короны лежит в диапазоне от 1 до 50 МК и, следовательно, корона излучает преимущественно в мягком рентгеновском (МР) диапазоне спектра. Измерения спектрального состава излучения в диапазоне 0.8–15 кэВ составляют основу для диагностики температуры и меры эмиссии корональной плазмы, в особенности термодинамических характеристик спокойной короны и вспышек. Более 30 лет рентгеновские ионизационные камеры ИСЗ GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) наблюдают Солнце в двух спектральных диапазонах: 0.5–4 Å и 1–8 Å (3–25 кэВ и 1.5–12 кэВ соответственно). Современные наблюдения солнечной активности проводятся практически в непрерывном режиме с временным разрешением 3 с и регистрируются в соответствующей базе данных. Однако существует недостаток количественной информации о МР-излучении Солнца в диапазонах как больших, так и малых величин потока. Недостаток информации об излучении ниже класса А (по классификации GOES) возникает из-за недо-

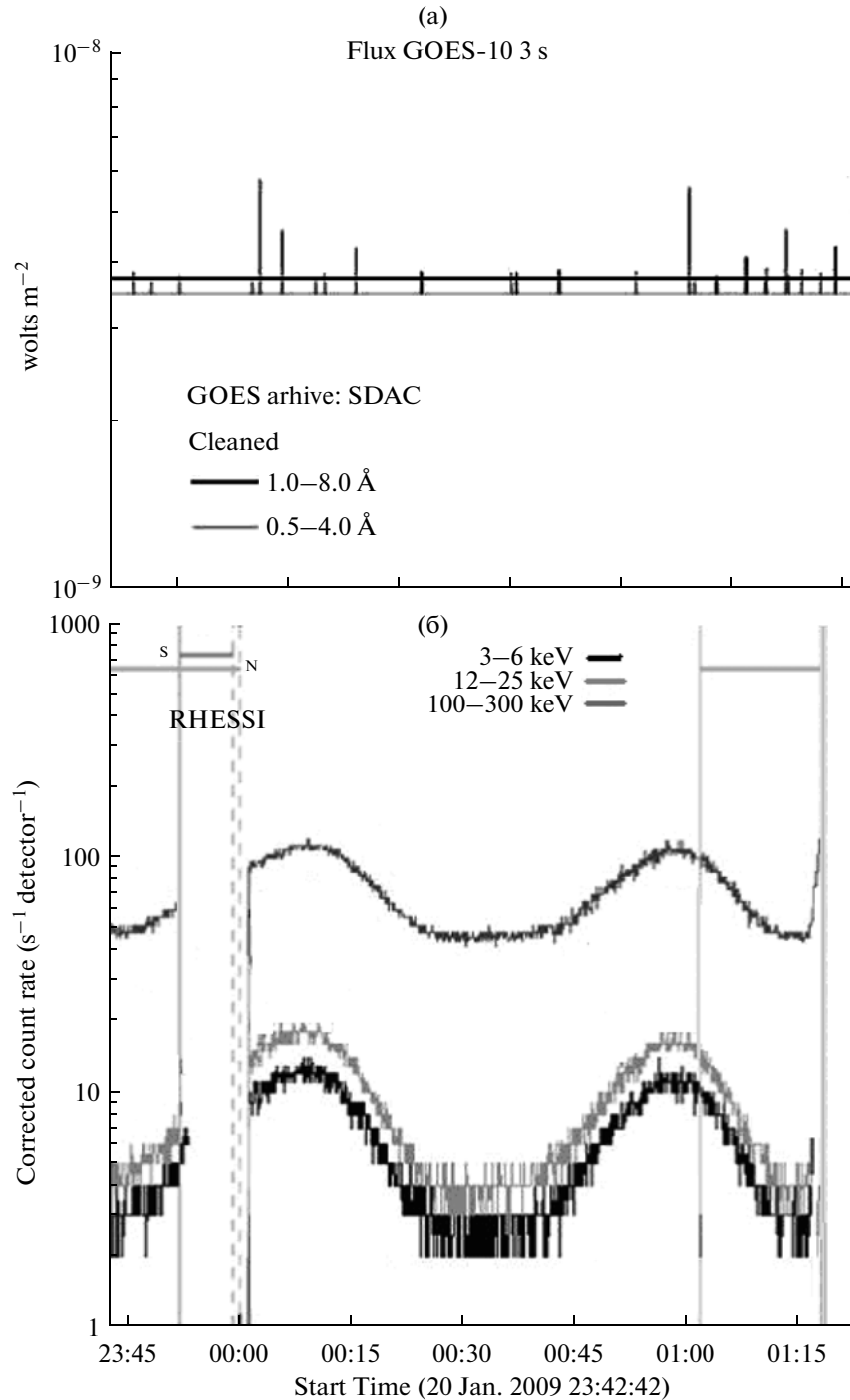
статочной чувствительности детекторов GOES. Выше уровня класса X10 происходит эффект насыщения, и в данных GOES теряется информация о действительном значении потока.

Другой действующий солнечный спектрометр ИСЗ RHESSI (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (Lin и др., 2002)), имеет детекторы с большой площадью и объемом, которые чувствительны к излучению с энергией более 3 кэВ. Однако высокий уровень фона не позволяет производить количественные измерения солнечного потока в условиях низкой солнечной активности во время текущего минимума (2008–2009 гг.).

Иллюстрация этих неблагоприятных обстоятельств представлена на рис. 1, где приводятся примеры измерений ИСЗ GOES и RHESSI за февраль 2009 г., когда не наблюдалось вспышечной активности Солнца.

Для мониторинга солнечного рентгеновского излучения на российском ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН необходимо иметь возможность проведения точных измерений солнечного потока в мягком рентгеновском диапазоне, причем и во время низкой активности.

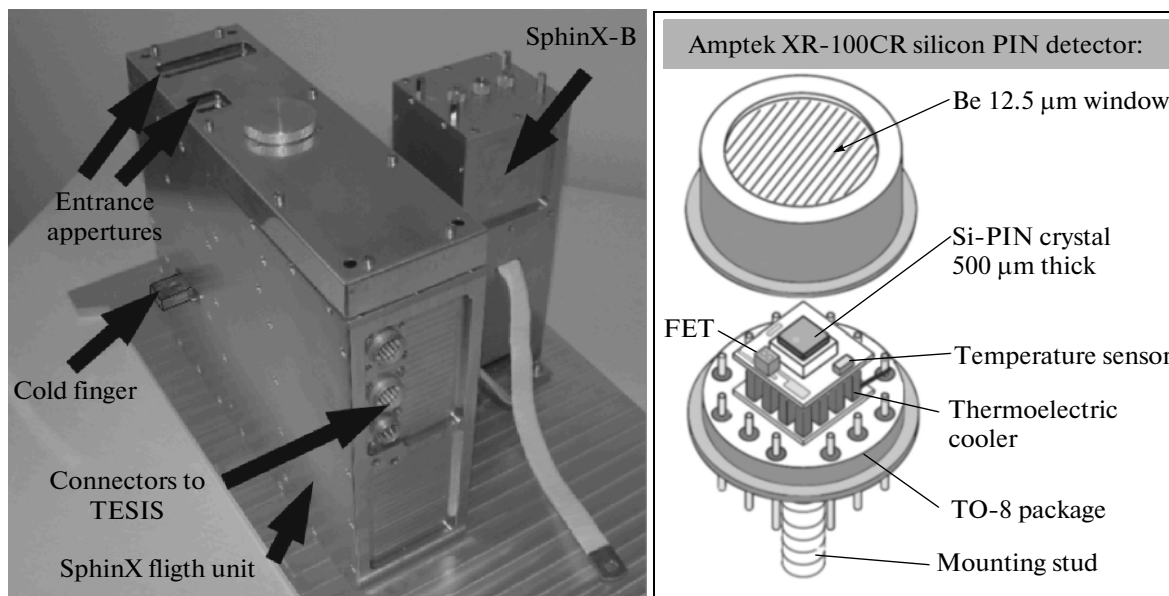
Для этой цели группой ученых Отделения физики Солнца в Центре космических исследований



**Рис. 1.** Пример измерений рентгенового потока Солнца в период низкой солнечной активности. Верхний рисунок – данные ИСЗ GOES. В течение всего интервала наблюдений показания мягкого канала ИСЗ GOES (1–8 Å) постоянны и находятся на уровне  $3.7 \times 10^{-9} \text{ Вт/м}^2$  (существенно ниже, чем величина, соответствующая А-классу солнечной активности). Показания жесткого (0.5–4 Å) канала ИСЗ GOES в основном также постоянны, за исключением некоторых всплесков, которые могут быть объяснены шумом электроники либо попаданием энергичных частиц в детектор ИСЗ GOES. Нижний рисунок – данные ИСЗ RHESSI, в которых преобладает сигнал, связанный с радиационной обстановкой орбиты.

(Space Research Centre) г. Вроцлава был разработан спектрофотометр SphinX (Solar photometer in X-rays, Sylwester и др., 2008), который позволяет измерять

потоки рентгенового излучения короны с большой чувствительностью. SphinX оснащен кремниевыми детекторами, схожими с детекторами индий-



**Рис. 2.** Слева: летный экземпляр спектрофотометра SphinX и блок SphinX-B, куда устанавливались летные детекторы и электроника для калибровки на синхротроне BESSY II ввиду малых размеров вакуумной камеры синхротрона. На основном блоке SphinX видны входные окна, электрические разъемы для соединения с аппаратурой ТЕСИС, термопалец для соединения с внешним радиатором. Справа: внутреннее устройство детекторов Amptek. Четыре таких детектора используются в аппаратуре SphinX.

ского прибора SOXS (Jain и др., 2005). SphinX был включен в состав научной аппаратуры ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН на очень поздней стадии подготовки (в 2006 г., за 3 года до запуска) в качестве дополнительного блока в составе аппаратуры ТЕСИС, разработанной в ФИАН (Kuzin и др., 2006). Детальное описание ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН содержится в статье Котова и др. (2010).

При разработке спектрофотометра SphinX учитывались следующие научные задачи.

- Исследование процессов нагрева спокойной короны Солнца методами регистрации времени прихода фотонов.
- Изучение осцилляций МР-потока с периодами от 1 до 500 с.
- Поиск переходных эффектов ионизации плазмы, которые могут предоставить инструменты для измерения плотности вспышечной плазмы.
- Определение химического обилия элементов Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Fe в солнечной короне.
- Определение дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) и изучение ее динамики.
- Создание фотометрического детектора МР-диапазона с абсолютной чувствительностью 10%.
- Летные испытания новой концепции фильтров для фотометрии в узком диапазоне (ФУД).
- Проведение мониторинга излучения Солнца в МР-области спектра с динамическим диапазоном интенсивностей в 7 порядков.

Ниже приводится описание аппаратуры SphinX и обсуждаются результаты наземных калибровок. Приводятся примеры некоторых наблюдений.

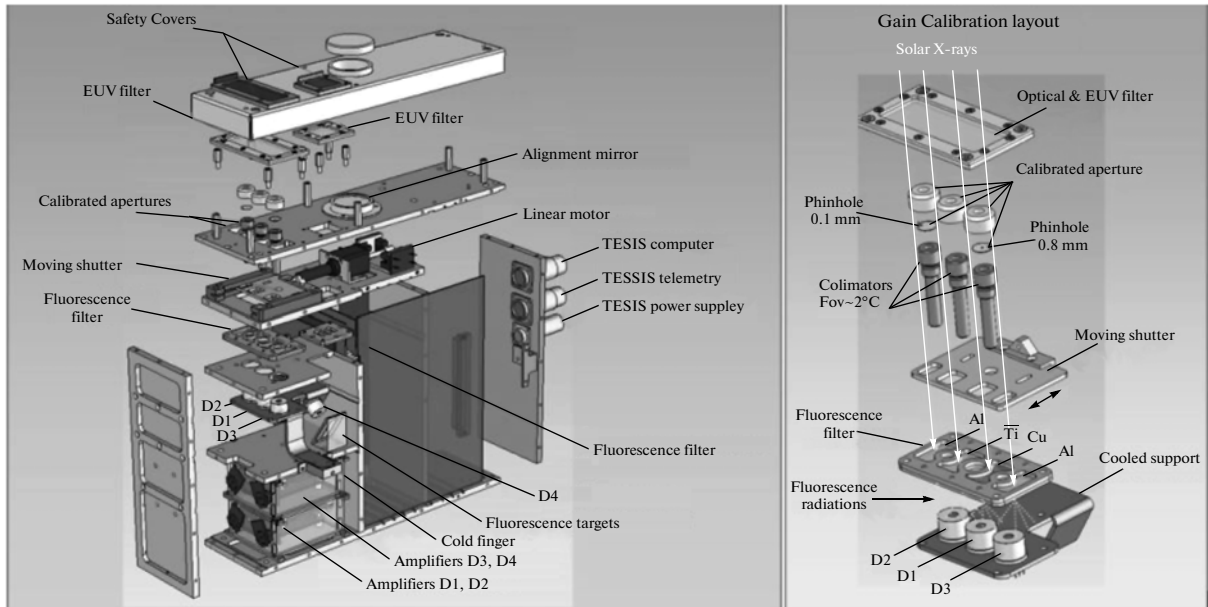
### КОНСТРУКЦИЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРА SphinX

Спектрофотометр SphinX состоит из одного блока размерами  $27 \times 28 \times 8$  см (рис. 2).

SphinX включает в себя четыре PIN-диода из чистого кремния толщиной 500 мкм (Amptek XR-100CR), которые оснащены входными Be-фильтрами толщиной 12.5 мкм (см. рис. 2). Каждый PIN-диод оснащен холодильником Пельтье, базовой электроникой и датчиком температуры.

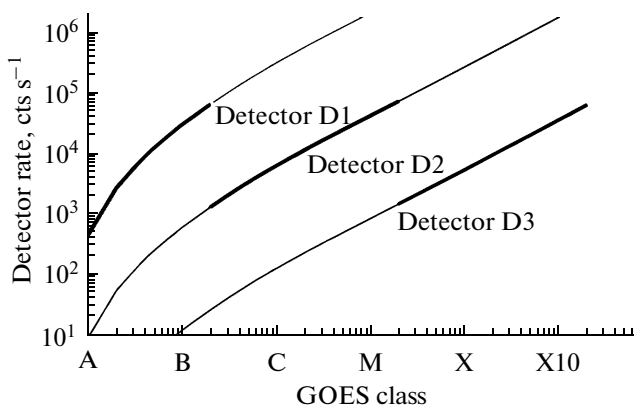
Детекторы SphinX закреплены на медной несущей площадке, термически изолированной от остальной части аппаратуры, но соединенной при помощи тепловых труб с внешним радиатором. При использовании холодильника Пельтье температура детектора примерно на  $50^\circ\text{C}$  ниже температуры несущей площадки. Подробное устройство SphinX показано на САД-сборке (Computer Aided Design – система автоматизированного проектирования) на рис. 3.

Три детектора спектрофотометра SphinX, названные D1, D2 и D3, расположены в основном измерительном блоке SphinX для спектрофотометрических измерений. Четвертый детектор D4 расположен в специальном блоке для флуоресцентных измерений, этот блок будет рассмотрен чуть позже.



**Рис. 3.** Слева: CAD-сборка летного экземпляра спектрофотометра SphinX с указанием всех основных компонент прибора. Справа: устройство главного измерительного блока SphinX, в который входят детекторы D1, D2 и D3, три коллиматора и соответствующие входные апертуры. Калибровочный затвор показан в позиции, при которой он закрывает прямой солнечный поток. Калибровка осуществляется за счет регистрации детекторами характеристических флуоресцентных линий, излучаемых фильтрами. В качестве фильтров используются тонкие фольги из Al, Ti и Cu, частично прозрачные для солнечного рентгеновского потока. Флуоресцентное излучение формируется в объеме фольг, на детектор попадает часть излучения, высвеченная вниз и прошедшая через остаточную толщину фольги.

В детекторе D1 используется вся входная апертура (площадью 21.50 мм<sup>2</sup>). Детекторы D2 и D3 закрыты специальными диафрагмами, которые ограничивают их входные апертуры до площадей 0.495 мм<sup>2</sup> и 0.01008 мм<sup>2</sup> соответственно, и, таким образом, уменьшают абсолютную чувствительность детекторов.



**Рис. 4.** Ожидаемый уровень сигналов детекторов SphinX в зависимости от солнечной активности, классифицированной по шкале GOES. Рассчитано по характерным параметрам корональной плазмы — температуре и мере эмиссии для разных уровней активности Солнца. Эффекты насыщения детекторов и электроники на данном рисунке не учитывались.

Такой выбор детекторов/диафрагм позволяет проводить измерения потоков МР-излучения в очень широком динамическом диапазоне — начиная от 1-й сотой величины A1.0 до величины X30 по шкале GOES.

Детектор D1, с наибольшей эффективной площадью, корректно измеряет слабоинтенсивные потоки. Когда поток возрастает и в детекторе D1 начинает происходить насыщение, измерения с хорошим отношением сигнал/шум ( $S/N$ ) проводятся детектором D2. Диафрагма детектора D2 выбрана такой, чтобы обеспечивать качественные измерения умеренных солнечных потоков. Детектор D3, с наименьшей эффективной площадью и менее чувствительный, чем два предыдущих, измеряет с хорошим соотношением  $S/N$  потоки во время мощных солнечных вспышек, когда насыщение в детекторе D2 становится значительным, а D1 не работает вовсе. Детектор D3 не должен насыщаться даже во время наиболее высокой активности Солнца. Таким образом, динамический диапазон чувствительности аппаратуры SphinX покрывает семь порядков величины. Статистическая точность измерений достигается лучше 1% при уровне активности Солнца выше A4.0 по шкале GOES (см. рис. 4).

Над узлом детекторов расположена движущаяся шторка с набором окон (см. рис. 3). Окна расположены таким образом, чтобы обеспечивать открытие и закрытие входных апертур детекторов при помо-

## Основные параметры детекторов SphinX

Детектор	D1	D2	D3	D4
Апертура, мм <sup>2</sup>	21.500 <sup>A</sup>	0.4947 <sup>S</sup>	0.01008 <sup>S</sup>	11.1 <sup>A</sup>
Энергетическое разрешение, эВ	480 <sup>B</sup>	350 <sup>B</sup>	370 <sup>B</sup>	290 <sup>P</sup>
Временное разрешение, мкс	1.25 <sup>e</sup>	4.17 <sup>e</sup>	4.17 <sup>e</sup>	4.17 <sup>e</sup>

A — по документации Amptek на соответствующие детекторы, S — измерено под микроскопом в Центре космических исследований г. Вроцлав, B — измерено на BESSY, P — измерено ХАСТ в Палермо, e — оценочное значение.

щи движущейся шторки. Это позволит защитить детекторы D1 и D2 от интенсивных потоков.

Энергетическое разрешение детектора D1 около 480 эВ, детекторов D2 и D3 — ~360 эВ (см. табл.), что позволит разрешать группы линий Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Fe на фоне непрерывного спектра.

В аппаратуре SphinX предусмотрена возможность проведения калибровки в полете. Калибровка проводится при введении так называемого калибровочного затвора в поле зрения детекторов (см. рис. 3 справа). По команде с блока электроники SphinX вводится калибровочный затвор с тремя различными фильтрами, вследствие чего детекторы освещаются и солнечным излучением, частично прошедшим через фильтры, и флуоресцентными линиями, которые формируются в объеме фильтров. В качестве фильтров используются фольги из различных материалов с монохроматическими и хорошо разрешаемыми линиями флуоресценции с энергиями: Al — 1.49 кэВ, Ti — 4.51 кэВ, Cu — 8.05 кэВ. Флуоресцентное излучение трех фильтров одновременно освещает все три детектора SphinX.

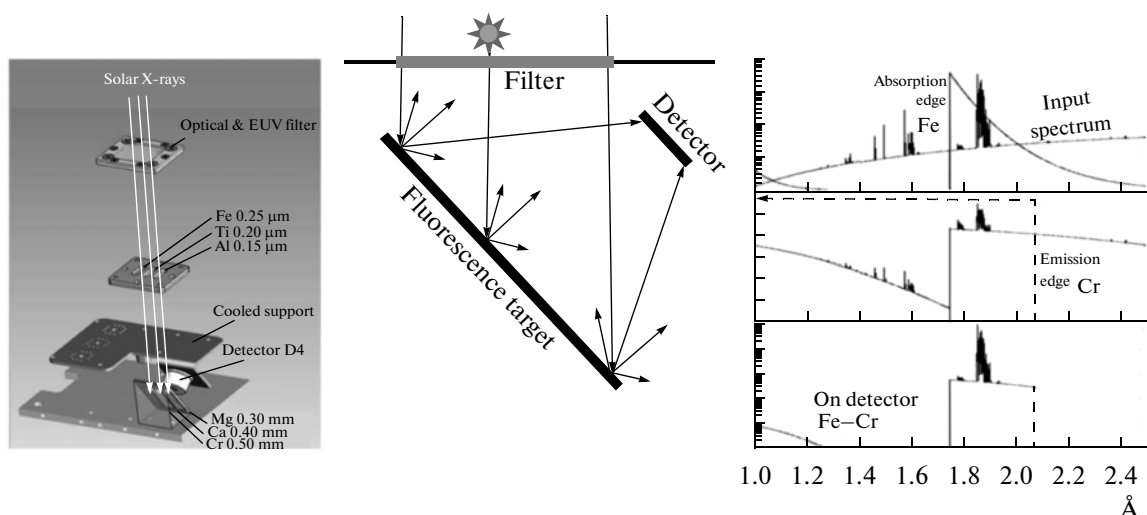
Измеряются амплитуды сигнала, соответствующие каждой линии флуоресценции. При обнаружении больших расхождений между предкалиброванными величинами и измеренными, электроникой SphinX проводится коррекция коэффициента усиления и смещения. В дополнение к этому ширины линий содержат информацию о фактическом спектральном разрешении аппаратуры. В зависимости от величины потока солнечного излучения, вторичные pile-up линии могут наблюдаться, создавая, таким образом, возможность динамически калибровать pile-up эффект.

После проведения калибровки затвор возвращается в исходное положение и детекторы снова освещаются прямым солнечным излучением. При использовании такой схемы для калибровки всегда существуют три известные энергии-амплитуды сигнала и отпадает необходимость в использовании радиоактивного препарата для калибровки. Процедура калибровки может быть запущена в любой момент, однако необходимо, чтобы степень солнечной активности была не ниже чем уровень M1 по классификации GOES. К сожалению, за время актив-

ной жизни ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН (февраль—ноябрь 2009 г.) таких событий не наблюдалось и полетная калибровка аппаратуры SphinX проведена не была.

Четвертый детектор D4 аппаратуры SphinX измеряет потоки в трех узких спектральных диапазонах: 1.74–2.07 Å, 2.50–3.08 Å и 7.95–9.54 Å. Для фотометрии в узких диапазонах (ФУД) используется новый подход, схематически изображенный на рис. 5. Солнечное излучение проходит входные КУФ-фильтры, затем абсорбционные фильтры и попадает на флуоресцентные мишени. Флуоресцентное излучение трех мишеней (используются мишени из чистых материалов Mg — 1.25 кэВ, Ca — 3.69 кэВ и Cr — 5.41 кэВ) освещает детектор D4. Каждый из трех абсорбционных фильтров изготовлен из материала с атомным номером, большим, чем номер соответствующей мишени (используются Al, Ti и Fe соответственно). В результате, флуоресцентное излучение каждой мишени содержит узкий участок спектра с длинами волн выше края поглощения фильтра и ниже края флуоресценции мишени. Соотношения величин потоков в этих интервалах сильно зависит от формы спектра и, следовательно, очень чувствительно к температуре излучающей солнечной плазмы. Пары материалов фильтр—мишень были подобраны такими, чтобы регистрировать спектральные интервалы, содержащие сильные корональные линии железа и магния. Это позволит исследовать переходные процессы, которые, как ожидается, происходят при изменении параметров излучающей плазмы с временным масштабом несколько секунд. Регистрация сигнала в детекторе D4 возможна, когда в короне происходят вспышечные события класса M1 и выше по классификации GOES. К сожалению, за время проведения эксперимента SphinX таких событий не наблюдалось.

Работы по разработке аппаратуры SphinX были завершены в 2007 г. Были выполнены общие испытания летного экземпляра SphinX, имитирующие жесткие орбитальные условия и перегрузки при запуске. Термовакuumные испытания были выполнены в Варшаве, акустические и виброиспытания были проведены в Праге, калибровки на рентгеновском источнике проводились в Палермо и Берлине.



**Рис. 5.** Слева: схема четвертого канала SphinX для фотометрии в узких спектральных диапазонах. Используются три пары материалов фильтр–мишень. В центре: оптическая схема, иллюстрирующая концепцию фотометрии в узких спектральных диапазонах. Справа: солнечное излучение, прошедшее абсорбционный фильтр, содержит спектральную часть с длинами волн, больше края поглощения материала фильтра. Далее освещается флуоресцентная мишень, во флуоресцирующем свете присутствует спектральная компонента с длинами волн, ниже границы флуоресценции. Флуоресцентное излучение трех пар фильтр–мишень регистрируется детектором D4. Такая двойная система фильтрации действует как узкополосный фильтр с естественными резкими спектральными границами.

После завершения испытаний летный экземпляр SphinX был доставлен на космодром Плесецк, где спектрофотометр был установлен на борт ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН. Спутник был запущен 30 января 2009 г. ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН с установленной научной аппаратурой и спектрофотометр SphinX на его борту изображены на рис. 6.

Вследствие исключительно низкой солнечной активности в период активной фазы жизни КОРОНАС-

ФОТОН полетная калибровка SphinX не проводилась, а также не проводились наблюдения флуоресцентным детектором D4. Обе эти технические особенности были приведены для полноты описания аппаратуры SphinX. Тем не менее эти два принципиально новых технических решения существенно расширяли возможности аппаратуры и могут быть реализованы в будущих рентгеновских солнечных экспериментах.

#### КАЛИБРОВКА СПЕКТРОФОТОМЕТРА SphinX

Калибровка спектрофотометра SphinX проходила в три этапа. Первый – на синхротронном источнике XACT (Collura и др., 2008) в Палермо (сентябрь 2007 г.), два других – на синхротронном источнике BESSY II в Берлине (ноябрь 2007 г. и март 2008 г.).

Во время испытаний на XACT были измерены энергетическое разрешение и чувствительность каждого детектора. Также оказалось возможным произвести кросс-калибровку всех детекторов SphinX, поскольку все детекторы спектрофотометра полностью освещались одним пучком одновременно.

Испытания на синхротроне BESSY II проводились при поддержке персонала Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Для измерения чувствительности детекторов D1, D2 и D3 использовался немонахроматизованный пучок, спектральная зависимость интенсивности которого известна с хорошей точностью. Пример таких измерений приведен на рис. 7. Благодаря широкому диапазону (~10 по-



**Рис. 6.** Фронтальная часть ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН во время предполетной подготовки на космодроме Плесецк. Обозначен комплекс аппаратуры ТЕСИС и расположение в нем спектрофотометра SphinX.

рядков) регулировок мощности синхротронного пучка, проведены измерения, покрывающие весь динамический диапазон аппаратуры SphinX. Также были проведены измерения с монохроматизованным пучком, при которых использовался четырехкристальный монохроматор.

Данные, полученные во время испытаний на ХАСТ и BESSY II, использовались для расчета отклика и эффективности всех детекторов аппаратуры SphinX. Подробности процедуры калибровки SphinX приведены в Siarkowski и др. (2010).

### ДОСТУП К ДАННЫМ, ПРИМЕРЫ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Калибровочные эксперименты показали, что оптимальным является использование 256 энергетических каналов. Поэтому во всех детекторах SphinX используется многоканальный анализатор с 256 каналами, которые в совокупности соответствуют диапазону энергий 0.85–15 кэВ.

Во время эксперимента данные SphinX упаковывались бортовым компьютером в блоки по 8 Кбайт и посылались в канал телеметрии. Обычно время накопления одного блока (DGI – data gather interval) составляло 1 с. Иногда скорость уменьшалась до 5 или 8 с для сохранения общего объема телеметрии.

Данные, полученные на Земле из каналов телеметрии, посылались через Интернет для дальнейшей обработки в Отделение физики Солнца в г. Вроцлаве. Здесь данные распаковывались и сохранялись в виде двоичных файлов, каждый из которых, обычно, содержит несколько тысяч телеметрических кадров и покрывает несколько часов наблюдений. Эти двоичные файлы (файлы 0-го уровня) публично доступны в виде IDL-файлов или FITS-файлов. Доступ к файлам возможен через Интернет при помощи каталогов, размещенных на серверах эксперимента SphinX. Основной сервер расположен в Центре космических исследований Польской академии наук<sup>1</sup> в г. Вроцлаве, второй – в Астрономическом институте Академии наук Чехии<sup>2</sup> в г. Онджейов (Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic), третий – в Астрономической обсерватории Палермо<sup>3</sup> им. Джузеппе С. Вайана, Италия (Osservatorio Astronomico di Palermo Giuseppe S. Vaiana). В настоящее время ведутся работы по вводу в строй четвертого сервера, расположенного в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, который, как ожидается, начнет функционировать в конце 2010 г. Доступ к файлам 0-го уровня может быть осуществлен напрямую при помощи любого веб-браузера.

<sup>1</sup> [http://156.17.94.1/sphinX\\_catalogue/SphinX\\_cat\\_main.html](http://156.17.94.1/sphinX_catalogue/SphinX_cat_main.html)

<sup>2</sup> [http://147.231.104.188/catalog/SphinX\\_cat\\_main.html](http://147.231.104.188/catalog/SphinX_cat_main.html)

<sup>3</sup> <http://www-sphinX.astro.pa.unipa.it/>

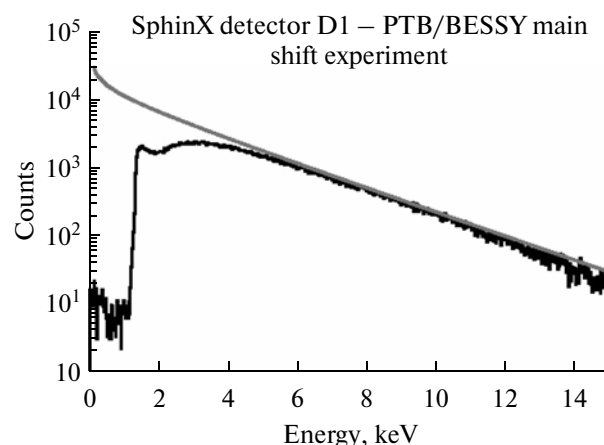


Рис. 7. Сравнение расчетного спектра синхротронного источника (серая кривая) со спектром, измеренным детектором D1 спектрофотометра SphinX (черная кривая), во время калибровочных экспериментов на BESSY II.

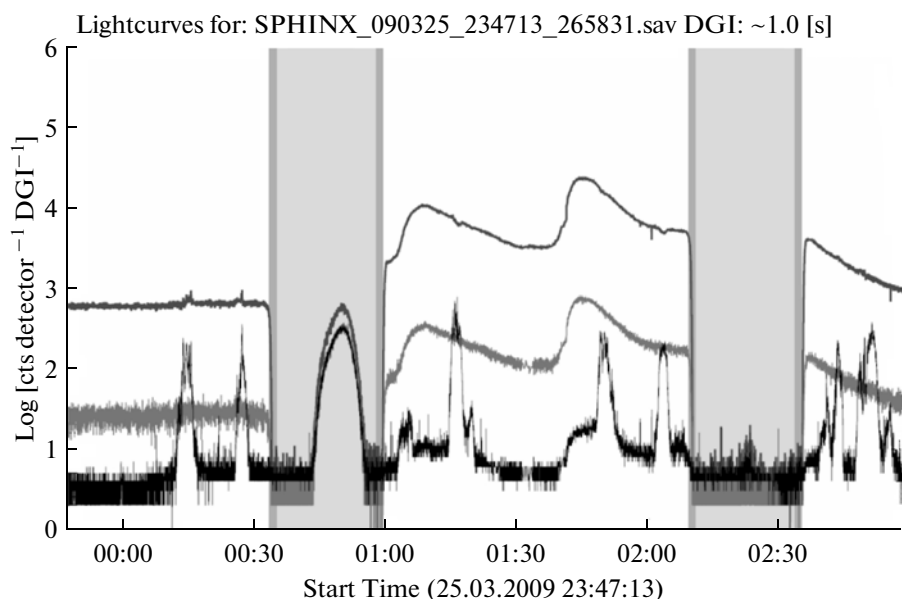
Анализ и интерпретация данных 0-го уровня возможны, однако требуют полного знания всех инструментальных эффектов, которые влияют на результаты наблюдений. В настоящее время ведутся работы по преобразованию данных 0-го уровня до данных 1-го уровня, которые будут гораздо удобнее для научного анализа. Примерно 40% всех данных 0-го уровня было преобразовано к июлю 2010 г. Данные 1-го уровня будут публично доступны на серверах данных SphinX во второй половине 2010 г.

Как альтернатива, широкий доступ к данным SphinX будет организован в рамках Виртуальной Солнечной Обсерватории (Virtual Solar Observatories) после завершения преобразования данных до 1-го уровня. Более подробная информация о формате данных, преобразовании форматов и распространении данных опубликована в Гбурек и др. (2011).

Во время проведения эксперимента SphinX работал в двух режимах: временном и спектральном режиме. При работе во временном режиме для каждого детектора регистрируются время прихода отдельно взятого фотона и его энергия. Точность времени регистрации фотона составляет 1–2 мкс.

В спектральном режиме SphinX суммирует количество фотонов в заданных энергетических диапазонах и посылает в канал телеметрии гистограмму распределения фотонов по энергии за время регистрации. Во время проведения эксперимента использовались только 256-канальные спектры и 4-канальные спектры (так называемый базовый режим).

Вместе со спектральными данными дополнительная информация о начале/конце каждого измерения и техническая информация также посылаются в канал телеметрии (см. также Гбурек и др., 2011).



**Рис. 8.** Интегральный сигнал детекторов SphinX, зарегистрированный во время серии вспышек, наблюдавшихся 26 марта 2009 г. Верхняя кривая показывает количество отсчетов, зарегистрированных за  $DGI = 1.0$  с детектором D1. Серые вертикальные полосы обозначают тенивые участки орбиты. Светло-серая кривая обозначает скорость отсчетов детектора D2. Черная кривая обозначает скорость отсчетов в четвертом спектральном канале детектора D1, в котором регистрируются энергичные частицы, попадающие в детектор.

Спектрофотометр SphinX вел практически непрерывные наблюдения Солнца, начиная с 20 февраля 2009 г. (момента включения) до конца активной фазы работы спутника — 29 ноября 2009 г. В этот период времени только данные детекторов D1 и D2 имеют хорошее соотношение сигнал/шум. Из-за низкой солнечной активности в этот период детекторы D3 и D4 регистрировали, в основном, шумовой сигнал.

Данные базового режима наблюдений SphinX дают общую информацию о рентгеновском потоке Солнца и об условиях, в которых работал спектрофотометр. В первом канале базового режима содержится, в основном, шум электроники. Величина отсчетов в этом канале может использоваться для проверки необходимости дополнительных коррекций/преобразований данных. Второй и третий каналы базового режима наблюдений соответствуют относительно широким спектральным интервалам: 1.5–3.0 кэВ и 3.0–14.9 кэВ для детектора D1 и 1.0–3.0 кэВ и 3.0–14.9 кэВ для детектора D2. Интегральный сигнал в этих спектральных диапазонах содержит много информации о динамике и свойствах солнечного рентгеновского потока, может быть использован для идентификации вспышечных событий — вспышек и повышений яркости. Интегральный сигнал может также использоваться для определения средней температуры и меры эмиссии излучающей плазмы и измерения динамики потока за длительный период.

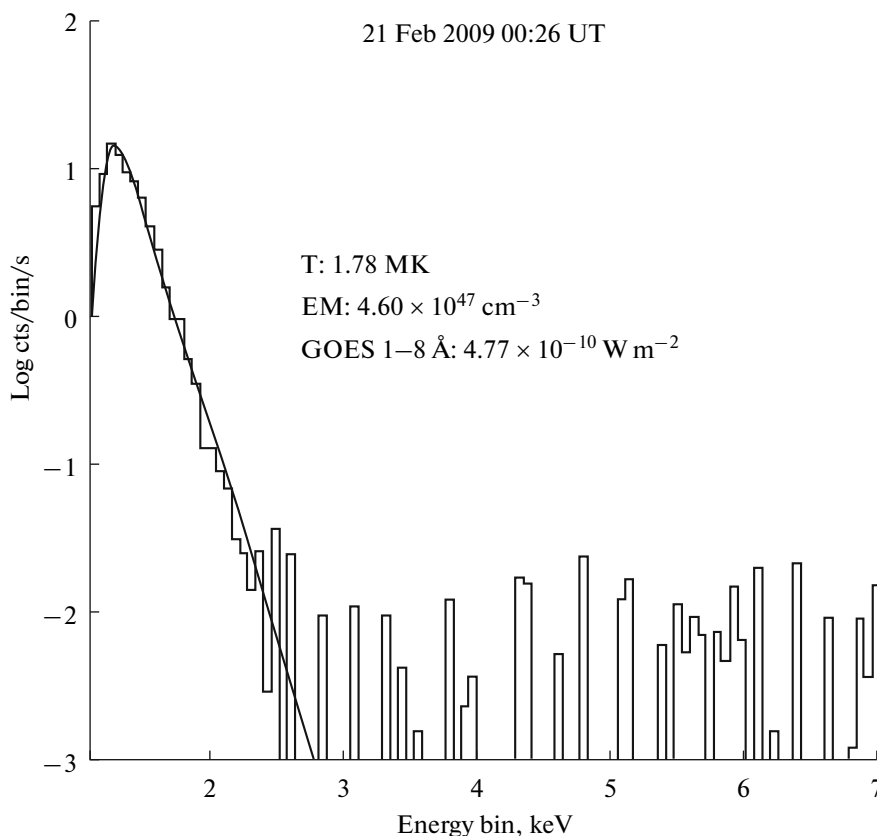
Анализ интегрального сигнала за длительный промежуток времени показал, что наиболее силь-

ный и изменчивый рентгеновский поток наблюдается, когда активные области присутствуют на солнечном диске. Также обнаружена минимальная величина потока — уровень сигнала в детекторе D2 не опускался ниже 5 отсчетов в секунду за все время эксперимента (см. также Гбурек и др., 2011).

В четвертом спектральном канале базового режима наблюдений мощный сигнал регистрировался в моменты, когда спутник проходил области с повышенным количеством энергичных частиц. Величины потока в этом канале могут использоваться для контроля прохождения спутника областей Южной Атлантической аномалии или полярных овалов (см. также следующий раздел). Данные, зарегистрированные в такие моменты, содержат дополнительный “ложный” сигнал, связанный с попаданием энергичных частиц в детектор, и требуют либо исключения из анализа, либо дополнительной специальной обработки. Пример интегрального сигнала базового режима наблюдений детектора D1 приведен на рис. 8.

Интегральный сигнал из второго и третьего спектральных каналов базового режима наблюдений SphinX позволил зарегистрировать около 800 небольших вспышечных событий за время активной фазы эксперимента. Большинство из них имеют мощность ниже порогового значения чувствительности ИСЗ GOES. Эти небольшие вспышечноподобные уярчения никогда ранее не наблюдались со столь высоким спектральным и временным разрешением, какое предоставляет SphinX. Для описания таких событий мы предлагаем ввести два новых клас-





**Рис. 9.** Спектр излучения спокойного Солнца, зарегистрированный SphinX 21 февраля 2009 г. Гладкая кривая соответствует модельному спектру. Модельный спектр рассчитан для температуры и меры эмиссии, обеспечивающих наилучшее соответствие модельного и экспериментального спектра. Также приведена величина потока в диапазоне 1–8 Å, соответствующем диапазону чувствительности ИСЗ GOES.

са, совместимых с классификацией GOES: класс S (от *small*) – величина потока  $10^{-9}$ – $10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup> и класс Q (от *quiet*) – величина потока  $10^{-10}$ – $10^{-9}$  Вт/м<sup>2</sup>. Полный каталог вспышек и повышений яркости, наблюдавшихся SphinX, будет публично доступен во второй половине 2010 года. Другие примеры наблюдений базового режима SphinX приведены в Гбурек и др. (2011).

Более детальный анализ данных SphinX возможен с использованием наблюдений в спектральном режиме с 256 спектральными каналами. Данные спектрального режима наблюдений, дополненные информацией об абсолютной чувствительности спектрофотометра, позволят проводить различные исследования: определять дифференциальную меру эмиссии (ДМЭ) плазмы, определять отклонение от ионизационных равновесий, проводить верификацию и сравнение модельных обилий элементов. Все это может быть осуществлено путем сравнения экспериментально измеренного спектра и теоретического, рассчитанного для данной модели. Благодаря высокой абсолютной чувствительности SphinX такие спектроскопические исследования возможны даже для моментов экстремально низкой актив-

ности Солнца, в отсутствие вспышек, повышений яркости и даже активных областей. Пример спектра спокойной короны, зарегистрированного SphinX, и его интерпретации приведен на рис. 9.

Временной режим наблюдений SphinX, при котором помимо 256-канального спектра сохраняется информация о времени регистрации каждого отдельно взятого фотона, является наиболее универсальным. Данные, полученные в этом режиме, могут также проходить дополнительную обработку во время общего преобразования данных. Поэтому временной режим работы является основным, в нем получено большинство данных 0-го уровня, которые могут быть преобразованы к данным 1-го уровня.

Вследствие некоторых технических особенностей (общего режима работы аппаратуры, способа, которым данные отправлялись на телеметрию, жестких перезагрузок и ряда других причин) временной режим не использовался непрерывно; длительность непрерывной серии наблюдений во временном режиме не превышает DGI (**D**ata **G**ather **I**nterval – время накопления сигнала).

Количество фотонов, обрабатываемых за одну серию непрерывных наблюдений, может варьиро-

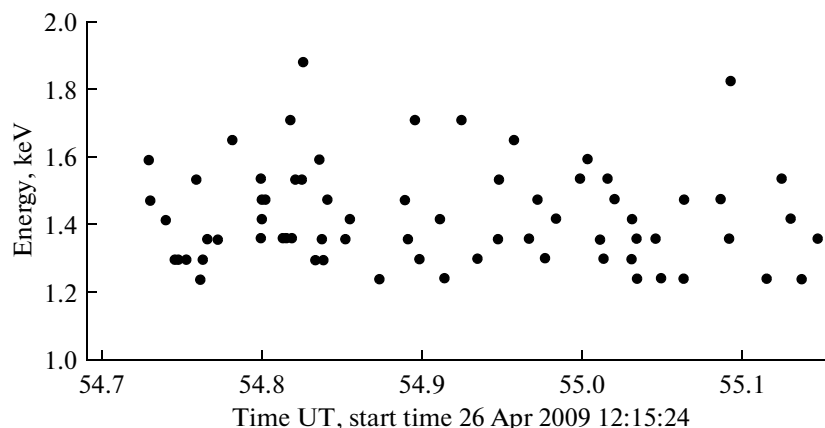


Рис. 10. Пример данных аппаратуры SphinX, полученных во временном режиме работы (наблюдения 26 апреля 2009 г.).

ваться от нескольких десятков до 1536, что соответствует максимальному объему буфера для одного кадра телеметрии одного детектора. Временной интервал между двумя последовательными сериями обычно составляет доли секунды.

Описанные выше варианты интерпретации данных, полученных в базовом и спектральном режимах наблюдений, могут также применяться и к данным, полученным во временном режиме. В дополнение к этому, наблюдения во временном режиме позволяют исследовать различие во временах прихода фотонов, что, в свою очередь, позволит лучше узнать физические условия в источнике излучения. В частности, с использованием этого режима возможно исследование динамики МР-излучения на очень коротких временных интервалах, поиск плазмы с немаксвелловским распределением частиц. Пример наблюдений спокойного Солнца, выполненных спектрофотометром SphinX во временном режиме, приведен на рис. 10.

#### РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА НА ОРБИТЕ СПУТНИКА

Вследствие высокого наклона орбиты ( $82.5^\circ$ ) ИСЗ КОРОНАС-ФОТОН пересекает на высотах порядка 550 км области энергичных частиц, в частности Южную Атлантическую аномалию и полярные овалы. Во время таких пересечений регистрируется сигнал с амплитудой больше, чем средний, с отсчетами, в основном соответствующими наибольшим энергиям многоканальных анализаторов, подключенных к каждому из детекторов. Сигнал от таких частиц в детекторе D2 был проанализирован и нанесен на карту, приведенную на рис. 11. На карте показано, где измерения SphinX в большей степени подвергаются влиянию частиц.

Вне областей повышенного радиационного фона сигнал от заряженных частиц вносит очень малый вклад в реальный сигнал (менее чем 0.01 отсче-

тов/с/bin) и может быть исключен в процессе обработки данных.

SphinX расположен на передней панели аппаратуры ТЕСИС (<http://www.thesis.lebedev.ru/>), освещаемой Солнцем (см. рис. 6). Яркий солнечный свет приводит к тому, что температура внутри блока SphinX обычно выше, чем было во время лабораторных тестов и калибровок, и изменяется на несколько  $^\circ\text{C}$  в течение орбитальных дня и ночи. На бестеневых участках орбиты, длившихся до трех недель (см. рис. 12), температура внутри блока SphinX была повышенной, что привело к увеличению шума младших энергетических каналов. Этот эффект будет учтен на следующих этапах обработки данных.

#### ПЛАНИРУЕМЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

Вследствие исключительно низкой солнечной активности в 2009 г. и низкого уровня МР-потока в течение всей активной фазы эксперимента SphinX не удалось выполнить все научные задачи, поставленные при разработке эксперимента. В частности, не удалось испытать принципиально новый блок узкополосных фильтров. По этим же причинам не проводились калибровки аппаратуры в полете.

Задача обеспечения мониторинга рентгеновского потока с широким динамическим диапазоном в 7 порядков выполнена только частично, так как во время проведения эксперимента поток менялся не более чем на 4 порядка величины.

Остальные научные задачи, которые были перечислены во Введении, могут быть успешно решены по данным, зарегистрированным спектрофотометром SphinX. В настоящее время работы по интерпретации данных сфокусированы на следующих задачах.

- Определение средних параметров ( $T$ , МЭ) корональной плазмы и их динамики.

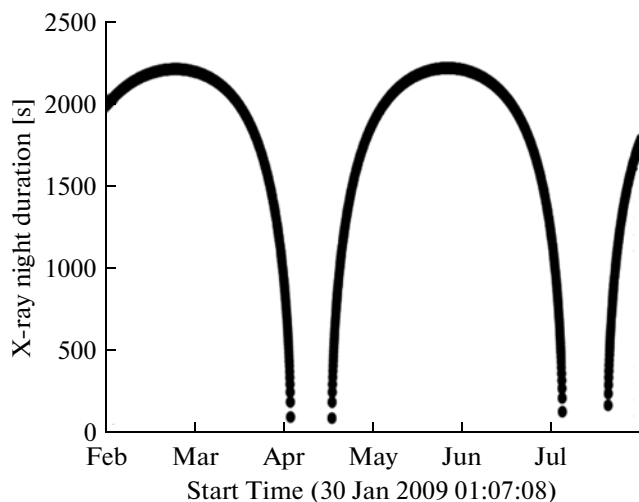


Рис. 12. Продолжительность теневых участков орбиты в течение первых шести месяцев работы ИСЗ.

- Исследование солнечных вспышек (динамики характеристик).
- Исследование появления активных областей на ранних фазах.
- Анализ средних характеристик и временных масштабов динамики рентгеновского потока от спокойного Солнца.
- Идентификация и анализ очень слабых повышений яркости.
- Поиск горячей компоненты в плазме спокойного Солнца и активных областей.
- Анализ физических параметров плазмы в моменты времени, предшествующие выбросам корональных масс.

Кроме этого, планируется проводить исследование динамики радиационных поясов Земли с временными масштабами от недель до месяцев.

После завершения преобразований всех данных SphinX к данным 1-го уровня их можно будет использовать как радиометрический стандарт. Небольшие отклонения в чувствительности SphinX в основном объясняются изменением температуры прибора. Анализ полученных данных показал, что изменение чувствительности достигает величины 10%. Однако эти отклонения могут быть учтены благодаря технической информации, которая поступала в канал телеметрии с каждым информационным блоком. Сведения о состоянии прибора позволяют рассчитывать текущую чувствительность аппаратуры более точно и достигнуть абсолютной чувствительности лучше, чем 10%. Это позволит, также, провести кросс-калибровки между данными SphinX и другими космическими экспериментами, такими как GOES, RHESSI, SOXS.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

SphinX является наиболее чувствительным солнечным рентгеновским спектрофотометром, который работал на орбите в период с февраля по ноябрь 2009 г. Предварительная интерпретация данных SphinX показывает, что во время минимума своей активности Солнце является слабой рентгеновской звездой, самой слабой среди звезд, расположенных на удалении 7 пк от Земли. Зарегистрированные спектры и интегральный сигнал спокойной короны свидетельствуют о наличии базового уровня излучения, практически неизменного в течение длительного времени. Появление любого признака активной области на диске Солнца приводит к существенному увеличению рентгеновского потока. Обнаруженная динамика излучения такой спокойной короны указывает на переходную природу излучающей плазмы с временными масштабами несколько минут. Спектрофотометр SphinX впервые позволил изучать физику микровспышек и параметры плазмы так называемой спокойной короны Солнца.

В настоящее время ведется работа по первичной обработке данных и их распространению. В обработанных данных 1-го уровня учтены большинство инструментальных эффектов, поэтому они подходят для научной интерпретации. По завершении обработки точность измерения величины рентгеновского потока будет лучше 10%. Это позволит проводить кросс-калибровку спектрофотометра SphinX и других солнечных рентгеновских инструментов. Также в настоящее время ведутся работы по анализу и научной интерпретации зарегистрированных данных. Усилия сконцентрированы на определении основных параметров плазмы, идентификации вспышек и уярчений, поиске горячей плазмы в спокойной короне и активных областях, исследовании фазы рождения и исчезновения активных областей и на статистическом анализе для предсказания космической погоды.

Проект SphinX был реализован при поддержке гранта № N203 381736 Министерства образования и науки Польши. Проект SphinX проводится в рамках двустороннего соглашения о сотрудничестве в области космических исследований между Польской академией наук и Российской академией наук.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 08-02-01301-а, программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Плазменные процессы в Солнечной системе”, гранта № 218816 (проект SOTERIA, www.SOTERIA-space.eu) седьмой рамочной программы Европейского Союза (FP7/2007-2013).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гбурек С., Сиарковски М., Кемпа А. и др.* Динамика мягкого рентгеновского излучения Солнца в период текущего минимума солнечной активности по наблюдениям прибора SphinX // *Астрон. вестн.* 2011. Т. 45. № 2. С. 186.
- Котов Ю.Д. и др.* // *Астрон. вестн.* 2011. Т. 45. № 2.
- Collura A., Barbera M., Varisco S., et al.* Calibration of the SphinX experiment at the XACT facility in Palermo // *Proc. SPIE.* 2008. V. 7011. 70112U. doi:10.1117/12.789277.
- Jain R., Dave H., Shah A.B., et al.* Solar X-ray spectrometer (SOXS) mission on board GSAT2 Indian spacecraft: The low-energy payload // *Sol. Phys.* 2005. V. 227. P. 89.
- Kuzin S.V., Zhitnik I.A., Bogachev S.A., et al.* Solar activity and its magnetic origin // *Proc. 233rd Symp. Int. Astron. Union, Cairo, Egypt, 2006 / Eds Volker Bothmer; Ahmed Abdel Hady. Cambridge Univ. Press, 2006. P. 449–451.*
- Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., et al.* The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // *Sol. Phys.* 2002. V. 210. P. 3.
- Siarkowski M., Gburek S., Kowalinski M., et al.* Interpretation of the ground calibration of SphinX detectors using BESSY synchrotron beams // *In preparation.*
- 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.