

ISSN 2075-6836

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН



**ПЕРВЫЕ ЭТАПЫ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ
И ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОГРАММЫ НАУЧНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОЕКТУ
«КОРОНАС-ФОТОН»**

ТРУДЫ
РАБОЧЕГО СОВЕЩАНИЯ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ

Р. Р. НАЗИРОВА
И. В. ЧУЛКОВА
В. Н. ЮРОВА

СЕРИЯ
МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА

РОССИЯ
ТАРУСА
22–24 апреля 2009 года

В данный сборник трудов включены материалы, рассмотренные на выездном семинаре по проекту «КОРОНАС-ФОТОН». Этот семинар проводился Институтом космических исследований Российской академии наук (с 08.2009 г. — Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН) и Московским инженерно-физическим институтом (Государственным университетом) (МИФИ) (с 07.2009 — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)) в г. Таруса Калужской обл. 22–24 апреля 2009 г.

Приводятся описания приборов, научные и методические результаты функционирования на орбите приборного комплекса «ФОТОН».

Материалы представляют интерес для научных сотрудников, занимающихся исследованиями в области физики Солнца и солнечно-земных связей, студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

Original topics have been presented on the CORONAS-PHOTON-mission seminar were included in this Proceedings. The seminar was conducted by National research nuclear university MEPHI and Space research institute Russian Academy of Sciences in Tarusa, Kaluga region, 22–24.04.2009.

The device descriptions, scientific and methodological results of in-orbit functioning equipment complex PHOTON are given.

This information is interesting for scientists have been engaged in Solar and Solar-terrestrial physics, and for post-graduate students of the similar specialities.

Редакционная коллегия:

И. В. Чулков, В. Н. Юров, А. С. Гляненко, Е. А. Антоненко

Редактор:

В. С. Корниленко

Компьютерная верстка:

Н. Ю. Комарова

Некоторые особенности создания космического аппарата «КОРОНАС-ФОТОН».....	8
<i>Аликин Ю. И., Гассиева М. П., Гуткин А. Р., Кравец В. Г., Салихов Р. С.</i>	
Комплекс управления и передачи данных научной аппаратуры спутникового проекта «КОРОНАС-ФОТОН».....	27
<i>Аликин Ю. И., Ануфрейчик К. В., Гляненко А. С., Охматовский Г. В., Чулков И. В., Юров В. Н.</i>	
Наземный комплекс приема, обработки и распространения информации в космическом эксперименте «КОРОНАС-ФОТОН».....	41
<i>Буслов А. С., Котов Ю. Д., Юров В. Н., Бессонов М. В., Калмыков П. А., Орешников Е. Н., Алимов А. М., Туманов А. В., Жучкова Е. А.</i>	
Спектрометр высокоэнергичных излучений «НАТАЛЬЯ-2М». Полетная калибровка, настройка и первые научные данные.....	55
<i>Архангельский А. И., Бессонов М. В., Буслов А. С., Власик К. Ф., Гляненко А. С., Кадилин В. В., Котов Ю. Д., Лупарь Е. Э., Рубцов И. В., Самойленко В. Т., Юров В. Н.</i>	
Прибор «ПИНГВИН-М», предназначенный для исследования поляризации жёсткого рентгеновского излучения Солнца в космическом проекте «КОРОНАС-ФОТОН».....	83
<i>Дергачев В. А., Матвеев Г. А., Круглов Е. М., Лазутков В. П., Савченко М. И., Скородумов Д. В., Пятигорский А. Г., Пятигорский Г. А., Чичикалюк Ю. А., Шишов И. И., Хмылко В. В., Васильев Г. И., Драневич В. А., Крутьков С. Ю., Степанов С. В.,</i>	
Информационные и технические возможности комплекса инструментов ТЕСИС/«КОРОНАС-ФОТОН» по исследованию Солнца в условиях минимума и максимума солнечной активности.....	107
<i>Кузин С. В., Богачев С. А., Шестов С. В., Бугаенко О. И., Житник И. А., Иванов Ю. С., Игнатьев А. П., Митрофанов А. В., Опарин С. Н., Перцов А. А., Слемзин В. А., Суходрев Н. К., Зыков М. С., Рева А. А., Ульянов А. С.</i>	
Первые результаты эксперимента ФОКА по регистрации солнечного жесткого ультрафиолетового излучения.....	119
<i>Котов Ю. Д., Кочемасов А. В., Гляненко А. С., Юров В. Н., Архангельский А. И.</i>	
Эксперимент «КОНУС-РФ» по исследованию жесткого рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек и космических гамма-всплесков: первые научные результаты.....	128
<i>Уланов М. В., Аптекарь Р. Л., Голенецкий С. В., Мазец Е. П., Олейник Ф. П., Пальшин В. Д., Свинкин Д. С., Фредерикс Д. Д., Котов Ю. Д., Юров В. Н.</i>	

Быстрый рентгеновский монитор (БРМ), результаты первого этапа летных испытаний	143
<i>Трофимов Ю. А., Котов Ю. Д., Юров В. Н., Глянченко А. С., Федоровых Е. В., Бессонов М. В.</i>	
Первые результаты эксперимента ТЕСИС по исследованию атмосферы Солнца на спутнике «КОРОНАС-ФОТОН»	155
<i>Кузин С. В., Богачев С. А., Перцов А. А.</i>	
Функционирование поляриметра жёсткого рентгеновского излучения Солнца «ПИНГВИН-М» на борту космического аппарата «КОРОНАС-ФОТОН»	167
<i>Дергачев В. А., Матвеев Г. А., Круглов Е. М., Лазутков В. П., Савченко М. И., Скородумов Д. В., Пятигорский А. А., Шишов И. И., Котов Ю. Д., Юров В. Н., Глянченко А. С., Архангельский А. И., Бессонов М. В., Буслов А. С.</i>	
Функционирование гамма-спектрометра RT-2 комплекса научной аппаратуры космического аппарата «КОРОНАС-ФОТОН» на первых этапах летных испытаний.	183
<i>Котов Ю. Д., Рао А. Р., Чакрабартти С. К., Малкар Д. П., Шрикумар С., Хингар М. К., Нанди А., Юров В. Н., Архангельский А. И., Зятьков Р. А.</i>	
Вариации потока релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли в марте 2009 г. — первые результаты прибора «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» («КОРОНАС-ФОТОН»)	196
<i>Мягкова И. Н., Панасюк М. И., Денисов Ю. И., Калегаев В. В., Старостин Л. И.</i>	
Система обработки и хранения данных измерений прибора «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» в эксперименте на ИСЗ «КОРОНАС-ФОТОН»	206
<i>Калегаев В. В., Парунакян Д. А., Баринова В. О., Денисов Ю. И., Мягкова И. Н., Панасюк М. И., Старостин Л. И.</i>	
Экспериментальные возможности спектрометра-телескопа СТЭП-Ф и первые результаты радиационного картографирования	217
<i>Дудник А. В., Персиков В. К., Бошер Д., Котов Ю. Д., Юров В. Н.</i>	
Наблюдения собственных колебаний Солнца: постановка эксперимента и первые результаты	229
<i>Кузнецов В. Д., Жугжда Ю. Д., Юров В. Н., Лебедев Н. И., Болдырев С. И.</i>	
О первых результатах обеспечения прибором БУС-ФМ выполнения программы научных исследований КА «КОРОНАС-ФОТОН»	239
<i>Козлов И. В., Новиков А. Д., Пустовалов М. Н., Рябова А. Д., Громкова И. Е., Магурина Т. П., Шпагина Т. Л.</i>	

Предисловие

Российская программа исследования физики Солнца и солнечно-земных связей КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца) предусматривала запуск на околоземную орбиту трёх космических аппаратов (КА).

Космические аппараты «КОРОНАС-И» и «КОРОНАС-Ф», созданные на базе автоматической орбитальной станции (АУОС-СМ) разработки КБ «Южное» (г. Днепропетровск, Украина), были запущены 2 марта 1994 г. и 31 июня 2001 г.

Космический аппарат «КОРОНАС-ФОТОН» с комплексом научной аппаратуры (КНА) «ФОТОН», созданный на базе КА «Метеор-3М» разработки ФГУП «Научно-исследовательский институт электро-механики» (НИИЭМ) (с 11.2009 г. — Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электромеханики» (ОАО «НИИЭМ»)), г. Истра, Московская обл., Россия, был выведен на околоземную орбиту ракетой-носителем «Циклон-3М» с космодрома Плесецк 30 января 2009 г.

Работы по проекту финансировались Федеральным космическим агентством России. Головной исполнитель по созданию комплекса научной аппаратуры — Московский Инженерно-физический институт (государственный университет) (МИФИ), Институт астрофизики МИФИ, Москва (с 07.2009 г. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)). Головной исполнитель по созданию КА «КОРОНАС-ФОТОН» — ФГУП НИИЭМ.

Научный руководитель проекта — Ю. Д. Котов. Главный конструктор космического комплекса (КК) — Р. С. Салихов. Главный конструктор комплекса научной аппаратуры — В. Н. Юров.

Основной задачей проекта «КОРОНАС-ФОТОН» являлось исследование процессов накопления энергии и её трансформации в энергию ускоренных частиц во время солнечных вспышек, изучение механизмов ускорения, распространения и взаимодействия энергичных частиц в атмосфере Солнца, исследование корреляции солнечной активности с физико-химическими процессами в верхней атмосфере Земли.

*Состав КНА «ФОТОН»**

- «НАТАЛЬЯ-2М» — спектрометр высокоэнергичных излучений
- RT-2 — телескоп низкоэнергетичного гамма-излучения
- БРМ — быстрый рентгеновский монитор
- «ПИНГВИН-М» — поляриметр жесткого рентгеновского излучения
- ФОКА — многоканальный монитор ультрафиолетового излучения
- «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» — анализатор заряженных частиц
- ТЕСИС — телескоп-спектрометр EUV-диапазона
- СТЭП-Ф — спутниковый телескоп электронов и протонов
- «КОНУС-РФ» — рентгеновский и гамма-спектрометр
- СОКОЛ — солнечный фотометр
- СМ-8М — магнитометр
- БУС-ФМ — блок управления и соединений
- ССРНИ — система сбора и регистрации научной информации

Указанные приборы предназначены:

- для изучения временного поведения и энергетических спектров электромагнитного излучения от нескольких килоэлектронвольт до единиц гигаэлектронвольт;
- регистрации солнечных нейтронов;
- измерения линейной поляризации жесткого рентгеновского излучения;
- построения изображений в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазоне;
- мониторинга излучения в инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах;
- измерения потоков заряженных частиц на орбите КА;
- обеспечения интерфейса научных приборов со служебными бортовыми системами КА по электропитанию, управлению, сбору, регистрации и передаче научных данных.

После вывода КА на околоземную квазикруговую орбиту с высотой 540...583 км и наклоном 82,5° было начато выполнение «Программы научных исследований и экспериментов в космическом

* Название проекта, космического аппарата и научных приборов даны согласно Техническому заданию на комплекс научной аппаратуры «ФОТОН» для КА «КОРОНАС-ФОТОН».

пространстве». С 4 по 20 февраля 2009 г. были осуществлены анализ состояния и последовательное включение всех приборов КНА. С 21 февраля по 22 марта проверено функционирование в околоземных условиях регистрирующих каналов приборов, обрабатывались циклограммы управления.

Результаты проверки показали, что все приборы КНА «ФОТОН» способны выполнять запланированную программу научных экспериментов в соответствии с их целевым назначением.

С 23 марта 2009 г. начался этап оптимизации параметров, и одновременно все приборы приступили к выполнению научных экспериментов.

Комплекс научной аппаратуры «ФОТОН» безотказно работал на орбите до декабря 2009 г. В выполненных экспериментах были получены важные научные и методические результаты по проявлениям солнечной активности в глубоком минимуме и выявлены особенности эксплуатации аппаратуры на орбите. К сожалению, из-за нештатного функционирования бортовых служебных систем космического аппарата КНА «ФОТОН» был отключен в декабре 2009 г.

В данном сборнике представлены описания аппаратуры и первые результаты экспериментов, дополненные данными за период с мая по декабрь 2009 г.

Главный конструктор КНА «ФОТОН»
В. Н. Юров

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «КОРОНАС-ФОТОН»

**Ю. И. Аликин, М. П. Гассиева, А. Р. Гуткин,
В. Г. Кравец, Р. С. Салихов**

ФГУП «Научно-исследовательский институт электромеханики» (НИИЭМ), Истра, Московская обл. (с 11.2009 г. — ОАО «Научно-исследовательский институт электромеханики» (ОАО «НИИЭМ»))

В настоящей статье рассмотрены особенности конструкции и конструкции космического аппарата (КА) «КОРОНАС-ФОТОН», а также его некоторых служебных систем — системы ориентации и стабилизации (СОС) и системы обеспечения теплового режима (СОТР), — подвергшихся наиболее существенным изменениям в сравнении с метеорологическими КА, на базе которых создавался КА «КОРОНАС-ФОТОН».

Кроме того, рассмотрены:

- методы наземной экспериментальной отработки СОТР и сравнения их результатов с данными летных испытаний;
- сохранения положительной температуры КА в процессе транспортирования с завода-изготовителя до старта в зимних условиях.

Ключевые слова: КА — космический аппарат, компоновка и конструкция, система ориентации и стабилизации КА (СОС), система обеспечения теплового режима (СОТР), наземные испытания, результаты летных испытаний.

При выборе технических решений, лежащих в основе разработки и создания космического аппарата, особое внимание было уделено минимизации затрат и сокращению сроков создания КА с применением и использованием (с минимальными доработками):

- отработанных элементов конструкции с целью уменьшения объема наземных испытаний;

Аликин Юрий Иванович — начальник отдела, заместитель главного конструктора. E-mail: i9al@istranet.ru.

Гассиева Мария Петровна — начальник отдела, заместитель главного конструктора. E-mail: otd24@istranet.ru.

Гуткин Адик Рафаилович — начальник лаборатории. E-mail: fvniiem@istranet.ru.

Кравец Валентин Григорьевич — начальник отдела, заместитель главного конструктора. E-mail: multi_c@gambler.ru.

Салихов Рашид Салихович — заместитель Генерального директора — главного конструктора, канд. техн. наук. E-mail: elkos@istranet.ru.

- отработанных размеров диаметров корпусов гермоотсеков с целью использования типоразмеров поковок, автоматического сварочного оборудования и типоразмеров резино-технических изделий (РТИ);
- существующего наземно-технологического оборудования для изготовления и сборки составных частей КА и КА в целом;
- серийных техпроцессов космических аппаратов «Метеор-3», «Метеор-3М».

Компоновка КА «КОРОНАС-ФОТОН»

В соответствии с ТЗ космический аппарат «КОРОНАС-ФОТОН» должен был:

- разрабатываться на базе космических аппаратов «Метеор-3», «Метеор-3М» не только по конструкции КА, но и по максимальному использованию блоков комплексов управления и служебных систем;
- выводиться на орбиту ракетой-носителем (РН) «Циклон-3»;
- в процессе орбитального полета ориентироваться на Солнце;
- иметь срок активного существования на орбите не менее трех лет;
- эксплуатироваться на наземном этапе, в том числе и при транспортировании КА, при температуре окружающей среды не ниже +5 °С.

Конструктивно КА состоит из следующих основных частей:

- гермоотсека, включающего цилиндрические корпуса с диаметрами обечаек 1400 и 1100 мм с днищами и фрезерованными поясами герморазъемов;
- фермы цилиндрической формы с установленными на ней блоками системы ориентации, максимально удаленными от блоков научной аппаратуры «солнечного» направления, блоками «антисолнечного» направления и опорным кольцом РН;
- внутренней приборной рамы с блоками служебной и научной аппаратуры, требующими для своего функционирования наличия газовой среды;

- батареи фотоэлектрической;
- штанги магнитометра СМ-8М.

Вне корпуса КА располагаются служебная аппаратура и научные приборы, а также антенны. Внутри корпуса размещаются служебная аппаратура и научные приборы, требующие специальной среды.

Компоновка КА обеспечивает:

- требуемую точность установки блоков на КА;
- поля обзоров блоков научных и служебных систем с учетом заданных сохраняемых зон;
- сохраняемые зоны на прогибы и центровку КА до разрешенной зоны головного обтекателя РН (ГО РН);
- частичную преемственность технологии изготовления составных частей КА;
- преемственность технологии проведения электрических испытаний разобранного и собранного комплексов КА в составе стенда общей сборки;
- безосколочное и бездымное отделение КА от РН;
- минимизацию механических воздействий на аппаратуру при отделении КА от РН;
- максимальное использование существующего технологического оборудования с применением необходимых доработок.

Однако из-за требований комплекса научной аппаратуры по ориентации на Солнце и в «антисолнечном» направлении, удалению от магнитных исполнительных органов КА, удалению магнитометров КНА от магнитных исполнительных органов и батареи фотоэлектрической (БФ), расположению телескопов больших габаритов внутри гермоотсека («НАТАЛЬЯ-2М») и вне гермоотсека (ТЕСИС), постоянному направлению батареи фотоэлектрической на Солнце необходимо было кардинально изменить компоновку КА по сравнению с КА-аналогами («Метеор-3», «Метеор-3М»), создать новые, не заимствованные, составные части КА:

- цельнофрезерованные отсеки как платформу для основного комплекса научной аппаратуры, расположенного вне гермоотсека и ориентированного на Солнце;

- четырехметровую двухколенную штангу магнитометра;
- батарею фотоэлектрическую со схемой раскрытия без доворота и без использования системы ориентации солнечной батареи (СОСБ), так как только такая схема позволила установить на КА прибор ТЕСИС;
- негерметичный отсек (агрегат стыковки) между РН и гермоотсеком КА с установленными на нем блоками системы ориентации, требующими удаления от научной аппаратуры, ориентированной на Солнце, и блоками комплекса научной аппаратуры (КНА), ориентированными в «антисолнечном» направлении;
- сварной отсек диаметром 1100 мм с днищем для прибора «НАТАЛЬЯ-2М», являющийся одновременно частью (продолжением) гермоотсека.

Такая компоновка КА «КОРОНАС-ФОТОН» (рис. 1 и 2) и связанные с ней конструктивные изменения потребовали:

- 1) разработки полного комплекта конструкторской документации на составные части КА и КА в целом;
- 2) разработки и изготовления макетов КА:
 - динамического макета КА;
 - антенного макета КА;
 - тепловых макетов основных сборок КА — платформ с приборами «солнечного» и «антисолнечного» направлений, блоков ТЕСИС-БД и передатчиков научной информации 8,2 ГГц для проведения термовакуумных испытаний;
- 3) разработки и изготовления стендов для наземной экспериментальной отработки макетов и вновь разработанных составных частей КА:
 - стенда ТВИ, созданного на базе барокамеры, укомплектованной внутренним криогенным экраном (–100 °С), подставками с нагревателями и термодатчиками, имитирующими тепловой баланс гермоотсека КА, внешней «тепловой» рубашкой для создания внутри барокамеры плюсовой температуры до 80 °С и управляющего измерительным вычислительным комплексом МІС-400;
 - стендов раскрытия БФ (автономно и в составе КА);
 - стенда раскрытия штанги;

- 4) доработки существующего комплекта наземного технологического оборудования (стенд общей сборки, подставки, кантователи, балки такелажной системы, контейнеры и т. д.);
- 5) проведения полного комплекса наземной экспериментальной отработки в соответствии с нормативными документами.

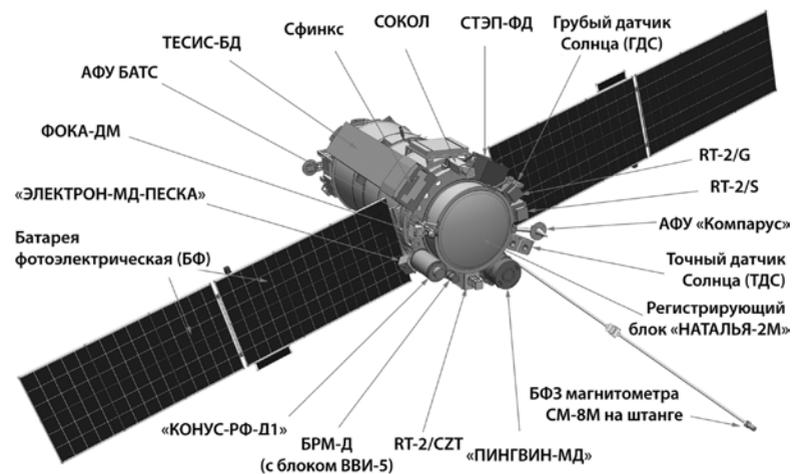


Рис. 1. Вид КА «КОРОНАС-ФОТОН» по оси $-Z$: ТЕСИС-БД — блок датчиков телескопа-спектрометра ТЕСИС (телескоп-спектрометр EUV-диапазона); СТЭП-ФД — блок детекторов спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф; ФОКА-ДМ — блок детекторов многоканального монитора ультрафиолетового излучения; «НАТАЛЬЯ-2М» — спектрометр высокоэнергичных излучений; ЭЛЕКТРОН-МД-ПЕСКА — блок детекторов анализатора заряженных частиц «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА»; «ПИНГВИН-МД» — блок детекторов поляриметра жесткого рентгеновского излучения «ПИНГВИН-М»; RT-2/S, RT-2/G, RT-2/CZT — блоки детекторов телескопа низкоэнергичного гамма-излучения RT-2; «КОНУС-РФ-Д1» — детектор (солнечный) рентгеновского и гамма-спектрометра «КОНУС-РФ»; ВВИ-5/БРМД — высоковольтный источник спектрометра «НАТАЛЬЯ-2М» и блок детекторов быстрого рентгеновского монитора БРМ (установлены на одном кронштейне); БФЗ — блок феррозондовый; АФУ БАТС — антенно-фидерное устройство бортовой аппаратуры телесигнализации; АФУ «Компарус» — антенно-фидерное устройство бортовой аппаратуры командно-измерительной системы «Компарус-А2»; СОКОЛ — солнечный фотометр; SphirX — абсолютно калиброванный спектрофотометр рентгеновского диапазона



Рис. 2. Вид КА «КОРОНАС-ФОТОН» по оси $+Z$: ТЕСИС-ОД — оптические датчики (астродатчики) телескопа-спектрометра ТЕСИС (телескоп-спектрометр EUV-диапазона); «КОНУС-РФ-Д2» — детектор (антисолнечный) рентгеновского и гамма-спектрометра «КОНУС-РФ»; АФУ БАТС — антенно-фидерное устройство бортовой аппаратуры телесигнализации; АФУ «Компарус» — антенно-фидерное устройство бортовой аппаратуры командно-измерительной системы «Компарус-А2»; БИС-КФ — бортовая информационная система

Обеспечение температуры КА при транспортировании и наземной эксплуатации на космодроме «Плесецк»

Для поддержания температуры окружающей среды на уровне не ниже $+5^\circ\text{C}$ при транспортировании КА в зимних условиях был выполнен расчет по обеспечению теплового режима на различных участках движения КА, учитывающий средства перемещения КА, скорость и продолжительность движения, и выданы рекомендации по дооснащению средств перемещения КА.

В соответствии с расчетом выполнялись следующие работы по дооснащению средств перемещения КА:

- дооснащение транспортировочного контейнера КА тепловентилятором мощностью 3 кВт, напряжением 220 В, работающим от автономного генератора, и внешним утепленным чехлом для уменьшения теплосъема с поверхности контейнера в процессе движения; контроль температуры внутри контейнера выполнялся с помощью

дистанционных термометров; фактическая температура в контейнере при транспортировании КА из монтажно-испытательного комплекса (МИК) НИИЭМ до погрузки в спецвагон на станции Лукино была в пределах 11...14 °С при наружной — 3 °С;

- дооснащение спецвагона 11Т732 четырьмя тепловентиляторами мощностью 5 кВт, напряжением 380 В, работающими от дизельного генератора отдельного вагона, и, кроме того, полное внутреннее утепление спецвагона 11Т732 с помощью пенопласта ПВ-1; контроль температуры внутри вагона и контейнера выполнялся с помощью дистанционных термометров из дизельного вагона; фактическая температура внутри контейнера с КА — в пределах 12...16 °С при внешней — 8 °С.

В процессе нахождения КА на техническом комплексе КА температура в помещении составляла 11...14 °С.

При транспортировании контейнера с космическим аппаратом с технического комплекса КА на технический комплекс ракетоносителя в качестве источника тока для тепловентиляторов спецвагона использовался дизель-генератор агрегата термостатирования 11Т71. Фактическая температура внутри контейнера с КА находилась в пределах 10...16 °С при внешней — 20 °С.

В процессе нахождения КА на техническом комплексе ракетоносителя температура в помещении составляла 14...16 °С.

В процессе транспортирования с технического комплекса ракетоносителя на стартовый комплекс температура под головным обтекателем вблизи КА упала до 12 °С.

На стартовом комплексе заданный температурный режим КА поддерживался с помощью штатных средств. Термостатирование началось при температуре под обтекателем 12 °С, и при дальнейших работах с КА температура ниже 15 °С не опускалась при внешней температуре до —20 °С.

Наземные испытания летного образца КА «КОРОНАС-ФОТОН»

Летный образец (ЛО) КА «КОРОНАС-ФОТОН» на заводе-изготовителе прошел с положительными результатами полный объем электрорадиотехнических испытаний, испытания на

ЭМС, на герметичность в барокамере, заправку азотом, взвешивание, центровку.

На космодроме ЛО КА «КОРОНАС-ФОТОН» прошел все виды испытаний в соответствии с эксплуатационной документацией и был запущен 30 января 2009 г. в 16 ч 30 мин.

Летные испытания КА «КОРОНАС-ФОТОН»

За период с 30.01. по 30.03.09 г. при проведении летных испытаний КА «КОРОНАС-ФОТОН» не было замечаний к конструкции КА, АФУ*, СТР и СОТР:

1. Батарея фотоэлектрическая раскрыта.
2. Штанга магнитометра СМ-8М раскрыта.
3. КА герметичен. Давление внутри гермоотсека (~ 845 мм рт. ст.) стабильно.
4. Поля обзора и незатенения приборов служебной аппаратуры и комплекса научной аппаратуры (КНА) «ФОТОН» соответствуют конструкторской документации (КД).
5. АФУ системы телеизмерений (СТИ) передает телеметрическую информацию без замечаний. Телеметрические параметры АФУ СТИ в норме и стабильны.
6. АФУ радиолинии бортовой аппаратуры командно-измерительной системы (БА КИС «Компарус-А2») обеспечивает работу БА КИС во всех штатных режимах без замечаний.
7. АФУ (8,2 ГГц) бортовой информационной системы (БИС-КФ) в составе КА передает научную информации с заданной достоверностью.

Система ориентации и стабилизации (СОС)

Ориентация и стабилизация КА «КОРОНАС-ФОТОН» осуществляется линейной системой автоматического регулиро-

* Основные условные обозначения: АФУ — антенно-фидерное устройство; БИС-КФ — бортовая информационная система; БА КИС — бортовая аппаратура командно измерительной системы; БФ — батарея фотоэлектрическая; БФЗ — блок ферро; ГДС — грубый датчик Солнца; ГБ — гироблок; КНА — комплекс научной аппаратуры; СОС — система ориентации и стабилизации; СОТР — система обеспечения теплового режима; СТР — система терморегулирования; СТИ — система телеизмерений; ТДС — точный датчик Солнца; ЭМС — электромагнитная совместимость; ЭВТИ — экранно-вакуумная теплоизоляция.

вания активного типа с тремя независимыми каналами управления (X , Y , Z). Чувствительными элементами СОС являются датчик угловых скоростей и датчик Солнца.

Датчик угловых скоростей — гироблок (ГБ), чувствительными элементами в котором служат поплавковые астатические гироскопы ГПА-Л2-2.

Датчик Солнца состоит из двух датчиков — точного (ТДС) и грубого (ГДС), выполненных на ПЗС-матрицах и фотодиодах соответственно.

Датчики Солнца позволяют осуществить поиск Солнца при любом произвольном положении КА.

Исполнительными органами системы являются электромеханические двигатели — маховики, предназначенные для создания управляющих механических моментов, воздействующих на корпус КА.

Для сброса накапливаемого избыточного кинетического момента КА и двигателей маховиков используется система сброса кинетического момента (ССКМ). Чувствительным элементом ССКМ является трёхкомпонентный магнитометр, а исполнительным органом служат электромагниты, электромагнитное поле которых взаимодействует с магнитным полем Земли.

Состав системы ориентации и стабилизации

В состав СОС входят следующие приборы, устройства, блоки:

- точный датчик Солнца основной — ТДСО;
- точный датчик Солнца резервный — ТДСР;
- грубый датчик Солнца — ГДС;
- гироблок основной — ДУС (ГБ) ОК;
- гироблок резервный — ДУС (ГБ) РК;
- преобразователь геомагнитного поля основной — ППП-3М;
- преобразователь геомагнитного поля резервный — ППП-3МД;
- устройство преобразования сигналов Солнца — БПСС (ОК) и (РК);
- устройство коммутации и согласования — УКС;
- двигатель-маховик DM_X с блоком управления — БУ DM_X (ОК) и (РК);

- двигатель-маховик DM_Y с блоком управления — БУ DM_Y (ОК) и (РК);
- двигатель-маховик DM_Z с блоком управления — БУ DM_Z (ОК) и (РК);
- электромагнит — $ЭM_Y$;
- электромагнит — $ЭM_Z$.

Функциональная схема СОС.

Размещение элементов СОС на КА «КОРОНАС-ФОТОН»

Структурно-функциональная схема системы ориентации и стабилизации дана на рис. 3.

Размещение датчиков. Блоки ТДС (основной и резервный) установлены на КА так, что:

- положительное направление оси $X_{ТДС}$ совпадает с положительным направлением оси X_C КА;
- положительное направление оси $Y_{ТДС}$ совпадает с отрицательным направлением оси Y_C КА;
- положительное направление оси $Z_{ТДС}$ совпадает с отрицательным направлением оси Z_C КА.

Привязка осей датчиков СОС к связанной системе координат КА «КОРОНАС-ФОТОН» обеспечена с точностью $\pm 30'$.

Точность совмещения приборных осей ГБ относительно КА — не хуже $40'$.

Направление осей преобразователей магнитного поля Земли (ППП-3М, ППП-3МД) совпадает с направлением соответствующих связанных осей КА, точность совмещения — не хуже 1° .

Исполнительные органы. Электромагниты установлены так, что $ЭM_Y$ параллелен оси Y_C , а $ЭM_Z$ — оси Z_C КА «КОРОНАС-ФОТОН». При этом расстояние между торцами ЭМ не менее 0,15 м, а точность установки ЭМ — не хуже 1° .

Двигатели-маховики установлены так, что оси вращения роторов блоков (DM_X , DM_Y , DM_Z) параллельны соответствующим осям КА.

Точность установки двигателей-маховиков (ДМ) показана в табл. 1.

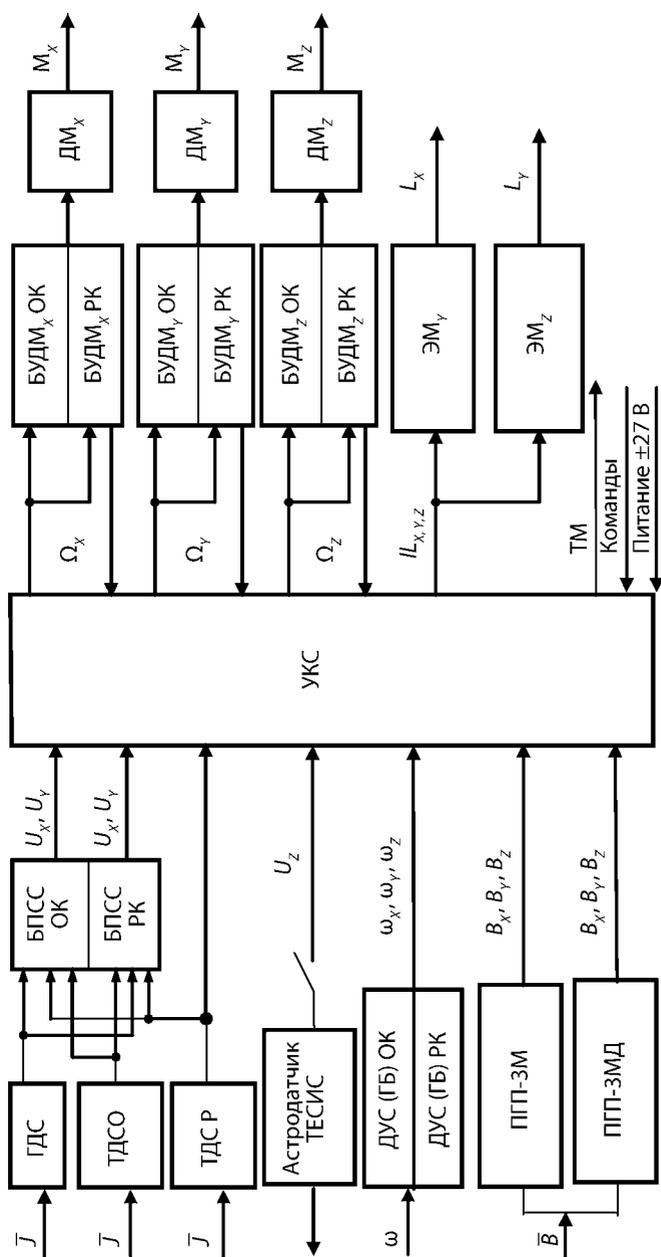


Рис. 3. Структурно-функциональная схема системы ориентации и стабилизации (СОС): ω – угловая скорость КА относительно собственных осей; Ω – скорость вращения двигателей-маховиков; B – индукция магнитного поля Земли; J – плотность светового потока; L – магнитный момент электромагнитов; M – механический момент двигателей-маховиков; I – ток электромагнитов

Таблица 1. Точность установки двигателей-маховиков (ДМ)

Блок	Погрешность установки (поворот относительно оси), не более, угл. мин		
	X_C	Y_C	Z_C
ДМ _x		±30	±30
ДМ _y	±30		±30
ДМ _z	±30	±30	

Режимы работы СОС

1. *Режим первоначального успокоения (РПУ)*, осуществляется по внешней команде «ОТДЕЛЕНИЕ». РПУ является первоначальным режимом работы системы после отделения КА от РН, в процессе выполнения которого осуществляется сброс начального кинетического момента КА до минимального (K_0). В этом режиме включены УКС, ССКМ, ГБ. Гироблоки работают в режиме пониженного кинетического момента гиromоторов гироскопов, обеспечивающем диапазон измерения угловых скоростей до 3 град/с с крутизной характеристики 2 В·с/град.

2. *Режим поиска Солнца (РПС)*, осуществляется по внутренней команде при снижении кинетического момента КА до K_0 . В этом режиме работают УКС, ССКМ, ГБ, ТДС, ГДС, БПСС и ДМ. Гироблок переводится в режим номинального кинетического момента гиromоторов, а УКС в режимах РПУ и РПС работает с грубым каналом ГБ, что обеспечивает измерение угловых скоростей до 0,75 град/с с крутизной характеристики 8 В·с/град. В процессе поиска ориентира в зависимости от пространственного расположения КА (направление оси Z_C КА относительно Солнца) возможны четыре условия:

- 1) Солнце находится вне поля зрения ГДС, осуществляется поворот КА с угловой скоростью $\omega_{пх} = 0,16$ град/с, направление которой совпадает с положительным направлением оси X_C ;
- 2) Солнце не попадает в поле зрения ТДС и попадает в поле зрения ГДС, но не находится в «зоне нечувствительности» (ЗН), осуществляется поворот оси Z_C с угловой скоростью $\omega_{пz} = 0,16$ град/с, таким образом, чтобы Солнце оказалось в ЗН;
- 3) Солнце находится вне поля зрения ТДС, но оказалось в ЗН ГДС, при этом осуществляется поворот КА вокруг оси X_C с угловой скоростью $\omega_{пх} = 0,16$ град/с, направление которой

совпадает с положительным направлением оси; поворот выполняется до совмещения поля зрения ТДС с направлением на Солнце;

4) при положении Солнца в поле зрения ТДС управление ориентацией КА осуществляется по сигналам датчика, соответствующим угловым отклонениям оптической оси ТДС от направления на геометрический центр видимого диска Солнца.

3. *Режим ориентации на центр видимого диска Солнца (режим РОС):* ТДС в этом режиме работает в линейной двухградусной зоне с крутизной характеристики 2,4 В·с/град и при угловых отклонениях менее 0,5° блок управления (УКС) обеспечивает работу с точным каналом ГБ при диапазоне измерения угловой скорости до 0,03 град/с и крутизне характеристики 100 В·с/град.

Сигналы угловых рассогласований из ТДС поступают в каналы X и Y , а в канал Z в штатном режиме сигнал углового рассогласования не поступает и по сигналу о координатной составляющей угловой скорости производится стабилизация вращения КА относительно Z_C .

При заходе КА в «область тени» (Солнце пропадает из поля зрения ТДС без выхода его за границу поля зрения) осуществляется стабилизация угловой скорости по всем трём каналам управления. Если в течение 45 мин после захода в тень Солнце появляется в поле зрения ТДС, управление осуществляется по его сигналам. Максимально возможный угловой уход не должен превысить 10...12°. В ситуации, когда за время более 45 мин Солнце не попадает в поле зрения ТДС, вновь осуществляется поиск по описанной выше логике.

При «уходе» Солнца за границу поля зрения ТДС сохраняются предыдущие значения угловых рассогласований. Если в течение 30 с Солнце попадает в поле зрения ТДС, должна происходить отработка рассогласования по изложенной выше логике. В случае, когда Солнце не возвращается в поле зрения ТДС, осуществляется полная логика поиска.

В СОС КА «КОРОНАС-ФОТОН», для компенсации возможных неточностей установки приборов, предусмотрен режим коррекции (РК) направления на Солнце в пределах 3, 6, 9 угл. мин по осям X и Y . Коррекция осуществляется путём введения в СОС смещений по внешним командам;

В СОС КА «КОРОНАС-ФОТОН» для исключения дрейфа вокруг продольной оси КА предусмотрен экспериментальный

режим (РЭ) с введением в канал рыскания СОС сигнала углового отклонения поперечных осей КА от выбранного направления (полюса эклиптики) астродатчика прибора ТЕСИС.

Технические характеристики СОС

Напряжение электропитания	24...34 В
Среднее за виток значение потребляемой мощности, не более:	
режим РПУ	65 Вт
режим РПС	180 Вт
режим РОС	120 Вт
Время начального успокоения поиска Солнца и установления режима РОС, при максимальных угловых скоростях отделения (3 град/с), не более	6 ч
Точность ориентации на центр диска Солнца в режиме РОС, не более	5 угл. мин (по ТЗ)
Максимальное значение угловой скорости стабилизации в режиме РОС, не более	0,005 град/с (по ТЗ)

В процессе летных испытаний по показаниям датчиков телеметрической информации получены следующие значения:

- точность ориентации — не хуже 2 угл. мин, скорость стабилизации — не более 0,002 град/с;
- время переходного процесса при выходе из тени на освещённый участок орбиты — не более 80 с;
- время начального успокоения поиска Солнца и установления режима РОС при максимальных угловых скоростях отделения (3 град/с) — не более 1 ч.

Система обеспечения теплового режима (СОТР)

Система обеспечения теплового режима КА включает газовую систему терморегулирования основного гермоотсека КА (СТР), систему управления электронагревателями, автономные системы отвода тепла от агрегатов КА, научной аппаратуры, средства пассивного и активного терморегулирования (маты ЭВТИ, терморегулирующие покрытия, тепловые трубы, электронагреватели).

Все работы по СОТР были проведены в соответствии с программой наземной тепловакуумной отработки.

Система терморегулирования КА «КОРОНАС-ФОТОН» выполнена на базе СТР КА «Метеор-3М» с необходимыми доработками. Учитывая размещение в неветилируемой части гермоотсека регистрирующего блока аппаратуры «НАТАЛЬЯ-2М» (спектрометр высокоэнергичных излучений), наличие в аппаратуре «НАТАЛЬЯ-2М» модулей системы обработки и вывода информации СОВИ-3 и СОВИ-5, требующих для своего охлаждения продувки газом-теплоносителем с расходом не менее 1,5 л/с, СТР была доработана следующим образом:

- изменена логика работы устройства управления вентиляторами для обеспечения непрерывной работы одновременно двух контуров циркуляции газа-теплоносителя, при этом наружный контур циркуляции обеспечивает сброс тепла из гермоотсека в космическое пространство через радиационную поверхность гермоотсека, а внутренний контур циркуляции — требуемый расход газа-теплоносителя через блоки, нуждающиеся в интенсивном конвективном отводе тепла, в частности, СОВИ-3 и СОВИ-5;
- исключен защитный тепловой экран, так как КА имеет систему ориентации с направлением продольной оси на Солнце;
- увеличена площадь радиационной поверхности гермоотсека с целью снижения максимальной температуры газа-теплоносителя с 35 до 22...25 °С, для обеспечения теплового режима спектрометров СЕ-1М, СЕ-2М регистрирующего блока аппаратуры «НАТАЛЬЯ-2М».

В рамках наземной тепловакуумной отработки СТР были учтены результаты летно-конструкторских испытаний (ЛКИ) КА «Метеор-3», «Метеор-3М», проведены расчеты тепловых режимов КА в новых условиях внешнего теплообмена, вентиляционные испытания гермоотсека, по результатам которых выполнена доработка внутренней приборной рамы по устройству газопроводов для блоков СОВИ-3, СОВИ-5.

Наземная тепловакуумная отработка комплекса научной аппаратуры и блоков служебной аппаратуры, установленной снаружи гермоотсека, проводилась по схеме:

- расчеты тепловых режимов блоков по разработанным тепловым математическим моделям в натуральных условиях эксплуатации КА и в условиях термобарокамеры;

- проведение автономных тепловакуумных испытаний узлов и сборок, на которых размещались блоки аппаратуры;
- корректировка тепловых математических моделей по результатам автономных тепловакуумных испытаний (сравнение экспериментальных и расчетных значений температуры, полученных в условиях теплообмена термобарокамеры);
- расчеты тепловых режимов блоков аппаратуры в натуральных условиях эксплуатации по откорректированным тепловым моделям;
- корректирование средств термостатирования.

Автономные тепловакуумные испытания проводились в условиях, приближенных к натурным условиям эксплуатации, которые в термобарокамере достигались следующими средствами:

- пониженным давлением среды в термобарокамере не выше 10^{-5} мм. рт. ст.
- установкой в термобарокамере криогенного (азотного) экрана;
- наличием в термобарокамере термостабилизированной плиты, обеспечивающей требуемый уровень температуры места стыковки испытываемой сборки с КА;
- имитацией поглощенных внешних потоков элементами испытываемой сборки путем включения электронагревателей, установленных на элементах сборки.

Автономным тепловакуумным испытаниям подвергались следующие сборки и узлы КА:

- блок внешних приборов 9041, включающий научную аппаратуру «НАТАЛЬЯ-2М», приборы и блоки СОКОЛ, СТЭП-ФД, «ПИНГВИН-МД», БРМ-Д, «ЭЛЕКТРОН-МД-ПЕСКА», «КОНУС-РФ-Д1», ФОКА-ДМ, RT-2/S, RT-2/G, RT-2/CZT, а также служебную аппаратуру; точный и грубый датчики Солнца;
- агрегат стыковки 9018 с блоками научных приборов ТЕСИС-ОД, «КОНУС-РФ-Д2» и служебной аппаратурой системы ориентации (МИО, двигатели-маховики);
- теплоотводящая плита передатчика 8,2 ГГц с установленным на ней тепловым макетом передатчика ША1127;
- блок рентгеновского телескопа ТЕСИС-БД с элементами имитации корпуса гермоотсека.

Прогнозируемые тепловые режимы СОТР КА, полученные при реализации программы наземной тепловакуумной обработки, согласуются с данными, полученными с КА по каналам телеметрической информации.

Тепловой режим КА по результатам обработки телеметрической информации за период с 30.01. по 30.03.2009 г.

Рассматривался полет КА на теневых витках с длительностью тени 35...17 мин. Этот период включал этап ввода служебных систем КА в эксплуатацию, пробные и штатные включения комплекса научной аппаратуры.

Система терморегулирования гермоотсека работала в штатном режиме эксплуатации: температура газа-теплоносителя составляла 9,4...21 °С при допустимом диапазоне 5...35 °С.

Система обеспечения теплового режима поддерживала пассивными (покрытия, маты ЭВТИ) и активными (нагреватели) средствами температурный режим блоков, расположенных в гермоотсеке КА и вне его, без замечаний.

Диапазон изменения температуры блоков комплекса научной аппаратуры и отдельных блоков служебных систем за указанный период и допустимые диапазоны температуры приведены в табл. 2.

Начальный период эксплуатации КА показал, что наземная тепловакуумная обработка проведена в необходимом и достаточном объеме.

За период с 30.01. по 30.03.2009 г. система обеспечения теплового режима КА работала в штатном режиме эксплуатации, обеспечивая требуемые тепловые режимы служебной и научной аппаратуры.

Таблица 2

Наименование блока	Диапазон температуры по телеметрической информации (ТМИ), °С	Допустимый диапазон температуры, °С
Регистрирующий блок спектрометра высокоэнергичных излучений «НАТАЛЬЯ-2М»	12,1...24	5...35
Быстрый рентгеновский монитор (БРМ)	12,7...26,9	-10...+50

Окончание табл. 2

Наименование блока	Диапазон температуры по телеметрической информации (ТМИ), °С	Допустимый диапазон температуры, °С
Поляриметр жесткого рентгеновского излучения «ПИНГВИН-МД»	6,6...18,5	0...45
Блок детектора RT-2/S телескопа низкоэнергичного гамма-излучения RT-2	12,3...25,8	-10...+50
Блок детектора RT-2/G телескопа низкоэнергичного гамма-излучения RT-2	13,2...25,7	-10...+50
Блок детектора RT-2/CZT телескопа низкоэнергичного гамма-излучения RT-2	-15,3...+14,5	-0...+30*
Блок детекторов СТЭП-ФД спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф	7,4...53,4	-20...+60**
Многоканальный монитор ультрафиолетового излучения ФОКА	10,7...29,4	-10...+40
Блок детекторов Э-МД-П анализатора заряженных частиц «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА»	12,2...27,9	-10...+50
Посадочное место блока детекторов «КОНУС-РФ-Д1»	12,7...22,2	0...50
Посадочное место блока детекторов «КОНУС-РФ-Д2»	5...15	0...50
Блок феррозондовый БФЗ магнитометра СМ-8М	-34,8...-1	-50...+70
Плита в местах установки передатчиков ША1127, ША1127А (8,2 ГГц)	-4...-1	-15...+35
Кронштейн установки точного датчика Солнца	20,7...31,1	0...35
Кронштейн установки грубого датчика Солнца	10,8...27,4	-50...+50
Система сбора и регистрации научной информации (ССРНИ)	10...14,6	5...50

* Для понижения температурного диапазона по просьбе разработчиков блок установлен на теплоизолирующие прокладки.

** Диапазон изменения температуры увеличен по решению № 1/9-ХНУ-08, в связи с увеличением энергопотребления с 24 до 31 Вт.

Заключение

Начальный период летных испытаний КА показал, что КА «КОРОНАС-ФОТОН» соответствует требованиям технического задания. Все вновь созданные и заимствованные системы и комплексы КА функционировали в штатном режиме и обеспечивали получение научной информации без ограничений. В процессе дальнейшего проведения летных испытаний необходимо было проверить и отработать экспериментальный режим СОС с использованием сигналов оптического датчика прибора ТЕСИС, а также обеспечить функционирование всех служебных систем КА в течение всего заданного срока активного существования КА.

SOME PECULIARITIES OF SATELLITE CORONAS-PHOTON CREATION

Yu. I. Alikin, M. P. Gassieva, A. R. Gutkin, V. G. Kravets, R. S. Salikhov

Research Institute for Electromechanics (NIEM), Istra, Moscow region (from 11.2009 — Open Joint Stock Company Research Institute for Electromechanics (OJSC NIEM))

In this article are considered the peculiarities of satellite CORONAS-PHOTON design, configuration and some on board system: stabilization and orientation system (SOS) and temperature regime secure system (TRSS), modifying in the most degree in comparison with metrological satellites, which were the base models for CORONAS-PHOTON satellite.

The procedures are considered also:

- on-ground experimental TRSS tests and comparison the test results with in-orbit data;
- the preservation of positive satellite temperature during winter transportation period from factory to launch place.

Keywords: satellite, configuration and design, stabilization and orientation system, CORONAS-PHOTON, temperature regime secure system, on-ground tests, in-orbit data.

Alikin Yuri Ivanovich — Head of department, deputy chief designer. E-mail: 19al@istranet.ru.

Gassieva Maria Petrovna — Head of department, deputy chief designer. E-mail: otd24@istranet.ru.

Gutkin Adik Rafailovich — Head of laboratory. E-mail: fvniem@istranet.ru.

Kravets Valentin Grigorievich — Head of department, deputy chief designer. E-mail: multi_c@rambler.ru.

Salikhov Rashid Salikhovich — Deputy General director — chief designer, Ph. D. E-mail: elkos@istranet.ru.

УДК

КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВОГО ПРОЕКТА «КОРОНАС-ФОТОН»

**Ю. И. Аликин¹, К. В. Ануфрейчик², А. С. Гляненко³,
Г. В. Охматовский¹, И. В. Чулков², В. Н. Юров³**

¹ ФГУП «Научно-исследовательский институт электромеханики» (НИИЭМ), г. Истра, Московская обл. (с 11.2009 г. — ОАО «Научно-исследовательский институт электромеханики» (ОАО «НИИЭМ»))

² Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва (с 08.2009 — Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН))

³ Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)), Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва

Рассмотрена структура созданного и успешно эксплуатируемого бортового комплекса управления и передачи данных научной аппаратуры спутникового проекта «КОРОНАС-ФОТОН». Интеграция в единую структуру возможностей специализированных систем для обслуживания научной аппаратуры и стандартных спутниковых систем позволило реализовать гибкую и мощную систему обслуживания космических экспериментов. Первые месяцы работы комплекса научной аппаратуры на спутнике «КОРОНАС-ФОТОН» подтвердили правильность заложенных технических решений.

Ключевые слова: КОРОНАС-ФОТОН, спутниковый проект, сбор данных, управление, научные приборы, информация, команды, служебные параметры, бортовой комплекс, информационный обмен.

Одной из главных задач при подготовке любого космического проекта является создание максимально комфортных условий для управления научной аппаратурой, а также сбора и

Аликин Юрий Иванович — начальник отдела, заместитель главного конструктора. E-mail: 19al@istranet.ru.

Ануфрейчик Константин Владимирович — начальник лаборатории. E-mail: kos@iki.rssi.ru.

Гляненко Александр Степанович — заведующий научно-исследовательским сектором, канд. физ.-мат. наук. E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Охматовский Георгий Васильевич — заместитель начальника отдела, канд. техн. наук. E-mail: 19al@istranet.ru.

Чулков Илья Владиленович — заместитель директора ИКИ РАН. E-mail: chulkov@iki.rssi.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

передачи получаемых в ходе эксперимента научных данных на Землю. В предыдущих проектах «КОРОНАС» для обеспечения потребностей научной аппаратуры в сборе и передаче на Землю научной информации традиционно использовались ресурсы двух телеметрических систем — штатной спутниковой системы и специализированной системы сбора научной информации (ССРНИ) (Stepanov et al., 1994). При этом сброс на Землю данных осуществлялся через две независимые радиолинии на различные пункты приема информации. Управление научной аппаратурой в предыдущих проектах реализовывалось стандартными средствами космического аппарата передачей на научные приборы разовых и программных команд.

Для информационного обеспечения проекта в составе комплекса научной аппаратуры (КНА) «ФОТОН» также предусмотрено использование специализированной системы сбора и регистрации научной информации (ССРНИ). Дальнейшим развитием этой тенденции является бортовой комплекс управления и передачи данных научной аппаратуры спутникового проекта «КОРОНАС-ФОТОН», позволяющий интегрировать возможности специализированных систем, ориентированных только на обслуживание научной аппаратуры, и штатных систем космического аппарата (КА) (Космический..., 2007).

Вся научная информация КНА представляется в виде нескольких типов данных:

- цифровых массивов данных, передаваемых с приборов в систему ССРНИ;
- цифровых параметров, показаний контактных и резистивных датчиков, аналоговых сигналов, передаваемых с приборов в бортовую аппаратуру телесигнализации (БАТС), а также набора служебных параметров о состоянии систем КА.

В КА «КОРОНАС-ФОТОН» используется более современная, по сравнению с космическими аппаратами (КА) «КОРОНАС-И» и «КОРОНАС-Ф», аппаратура бортового комплекса управления (БКУ), что предоставляет дополнительные возможности организации бортового комплекса управления и передачи данных научной аппаратуры спутникового проекта «КОРОНАС-ФОТОН», включающего сбор и регистрацию информации, а также управление КНА при проведении эксперимента. Структура представляемого комплекса приведена

на рис. 1. Наряду с традиционными средствами таких систем (ССРНИ и бортовая служебная телеметрическая система КА — БАТС) в работе этого комплекса активно используются средства БКУ и он, таким образом, является распределенной системой сбора, предварительной обработки и регистрации информации научной аппаратуры с дополнительными средствами управления с участием КНА и штатных систем КА. В состав этой системы вошли ССРНИ КНА, БАТС КА, мультиплексный канал обмена КА (МКО), ГОСТ 26765.52-87 (Mil STD 1553b), бортовая управляющая машина (БУМ) КА с соответствующим математическим обеспечением, бортовой стандарт времени и частот (БСВЧ), блок выдачи команд управления (БВКУ).

На представленном ниже рисунке не показана обязательная связь между БУМ и системой питания и БВКУ КА, используемым для управления комплексом научной аппаратуры при помощи дискретных команд управления. Команды управления от БВКУ и напряжение от системы электропитания КА принимаются еще одним специализированным блоком, входящим в состав КНА, — блоком управления и соединений (БУС-ФМ), играющим роль буфера между приборами КНА и бортовыми

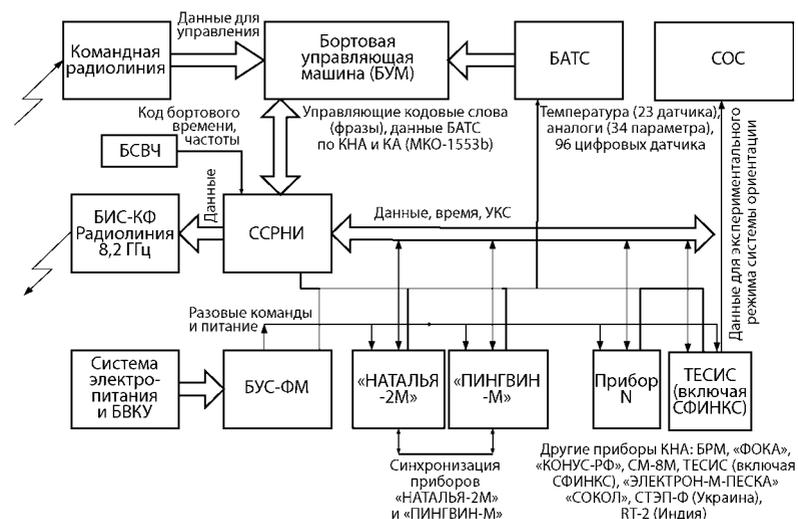


Рис. 1. Функциональная схема системы сбора, предварительной обработки и регистрации научной информации проекта «КОРОНАС-ФОТОН». СОС — система ориентации и стабилизации

системами. Таким образом (кроме приема аналоговых и других вспомогательных параметров КНА на БАТС), все взаимодействие со спутниковыми системами осуществляется через ССРНИ и БУС-ФМ.

Основной поток научной информации передается в виде цифровых массивов с научных приборов на систему ССРНИ. Эта специализированная система позволяет осуществлять прием данных от 20 (24) научных приборов (источников цифровых массивов — далее ИЦМ). Массивы данных вводятся по запросу на обслуживание со стороны ИЦМ. Суммарный объем запоминающего устройства (ЗУ) системы ССРНИ составляет 1,5 Гбайт. Каждому из ИЦМ на сеанс наблюдения выделяется гарантированный (фиксированный на данный сеанс) объем ЗУ — квота. В процессе проведения исследований распределение квот между приборами может быть изменено по команде с Земли. Если ИЦМ в сеансе наблюдения передает объем информации, превышающий квоту, то считывание данных с этого ИЦМ прекращается и ввод новых данных становится возможным только после передачи данных из ЗУ ССРНИ на Землю, т. е. методом квотирования устанавливается предельный объем данных для каждого прибора на сеанс наблюдений. Изначально в процессе программирования аппаратных средств ССРНИ заносятся четыре переключаемые по командам с Земли таблицы, содержащие квоты для приборов КНА. Кроме того, в сеансах связи существует возможность произвольного изменения квот для всех приборов КНА.

Передача научной информации от ИЦМ в систему ССРНИ осуществляется массивами по 960 бит в последовательном коде. Скорость передачи одного массива информации от ИЦМ — 62,5 или 125 кбит/с. Временные диаграммы обмена приведены на рис. 2. Для повышения надежности работы комплекса научной аппаратуры система ССРНИ построена по схеме с двумя полуккомплектами, один из которых является рабочим, а второй находится в «холодном» резерве. Все сигналы интерфейса обмена данными ИЦМ-ССРНИ задублированы, причем на каждую дублированную линию работает свой передатчик и приемник информации.

Для использования в целях точной временной привязки научных данных ССРНИ формирует из сигналов бортовой шкалы времени (БШВ), поступающих от БСВЧ космического аппа-

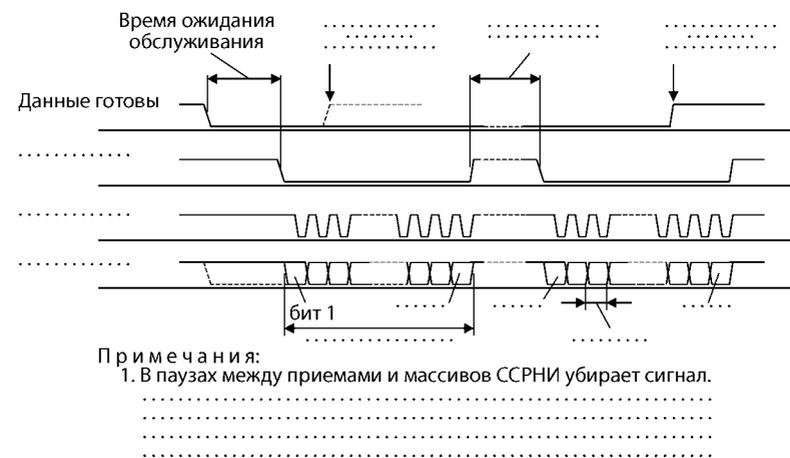
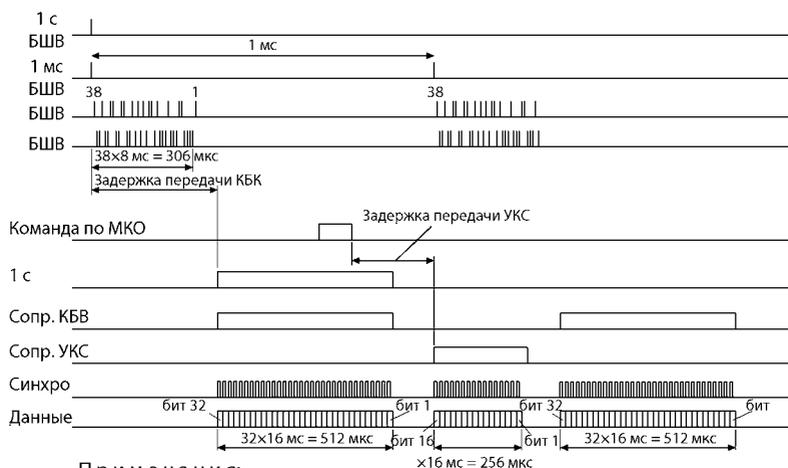


Рис. 2. Временная диаграмма взаимодействия ИЦМ-ССРНИ по каналу приема данных

рата, 32-разрядный последовательный код бортового времени (КБВ), который передается по специальному интерфейсу, вместе с управляющей информацией каждому ИЦМ. Кроме того, бортовой комплекс управления (БКУ) космического аппарата (КА) позволяет принимать с Земли в сеансах связи до 52 кбит управляющей информации, которая может быть использована для КНА. Поэтому для ввода в ССРНИ из БКУ управляющей информации для комплекса научной аппаратуры, поступающей с Земли в сеансах связи, использован указанный выше мультиплексный канал обмена (МКО).

Для передачи на ИЦМ был разработан специализированный интерфейс передачи КБВ и управляющих кодовых слов (УКС) с ССРНИ на ИЦМ. Его временные диаграммы приведены на рис. 3, 4. Код бортового времени передается 1 раз в 1 мс, в темпе поступления обновляемых данных от систем КА, формирующих БШВ. Точность привязки данных БШВ к единому времени составляет 1 мс. Ввод данных БШВ в ССРНИ сопровождается сигналом-меткой 1 мс. Для упрощения интерфейса ССРНИ-ИЦМ было принято решение об объединении линий данных КБВ и УКС и использовании единой синхронизации частотой 62,5 кГц. Для идентификации типа передаваемых данных по мультиплексированной линии связи используются

два сигнала-признака — «Сопр. КБВ» и «Сопр. УКС», причем УКС на ИЦМ поступают всегда в паузе в передаче КБВ, когда ССРНИ принимает данные по линиям БШВ. Это позволяет избежать возможного джиттера положения КБВ при передаче УКС на ИЦМ.



- Примечания:
1. Код КБВ-НА передается каждую 1 мс. Сигнал «Сопр. КБВ» можно использовать в качестве 1 мс метки. Код УКС-НА передается в промежутках между кодами КБВ-НА. Код УКС-НА передается не чаще 1 раза за 2 с. Данные меняются по переднему фронту сигнала «Синхро».

Рис. 3. Временная диаграмма передачи данных ССРНИ-ИЦМ (канал управления и передачи КБВ)

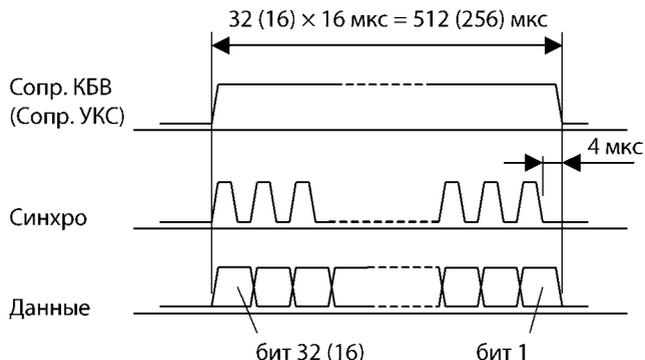


Рис. 4. Фрагмент временной диаграммы передачи данных ССРНИ-ИЦМ

Для этого канала ССРНИ-ИЦМ также применены схемные решения с резервированием системы ССРНИ. Все сигналы интерфейса передачи КБВ/УКС ИЦМ-ССРНИ задублированы, причем на каждую дублированную линию работает свой передатчик и приемник информации.

Введение дополнительной возможности — передачи УКС — позволяет организовывать адаптивные цифровые системы управления характеристиками приборов, существенно улучшив возможности «тонкой» подстройки аппаратуры по сравнению, например, с управлением характеристиками приборов при помощи дискретных команд управления.

В соответствии с протоколом согласования ресурсов космического комплекса (КК) «КОРОНАС-ФОТОН», выделяемых для управления КНА «ФОТОН» на этапах первоначального включения, настройки КНА и летных испытаний выделяются следующие ресурсы КК «КОРОНАС-ФОТОН» (табл. 1).

Таблица 1. Ресурсы командно-программной информации (КПИ) и разовых импульсных команд (РК) для управления КНА

Вид ресурса	Этапы	
	первоначальное включение и настройка КНА (до 45 дней)	летные испытания КНА (не менее 3 лет)
Максимальный объем передаваемой на борт КА КПИ за 1 сеанс связи, кбит	52	
Максимальное количество разовых импульсных команд (РК), передаваемых за 1 сеанс связи	44	
Объем КПИ, передаваемых в одном сеансе связи, кбит / количество РК управления КНА	52/30	
Объем памяти ОЗУ БУМ для хранения КПИ и для формирования данных программных команд при пересечении границ неблагоприятных зон наблюдений, кбит	24	
Максимальное потребное количество сеансов связи для управления работой КНА:		
за сутки	2	
за неделю	14	9

Окончание табл. 1

Вид ресурса	Этапы	
	первоначальное включение и настройка КНА (до 45 дней)	летные испытания КНА (не менее 3 лет)
Оперативность управления — время от момента передачи данных в ЦУП до начала сеанса связи, ч:		
при одном сеансе в день, не более	24	
при двух сеансах в день, не более	12	

По режимам работы приборов КНА можно условно выделить три основных типа:

- начальный этап эксплуатации;
- нормальный режим работы;
- режим устранения неисправности.

Для всех приборов в нормальном режиме эксплуатации максимальная суммарная потребность в ресурсах по управлению, передаваемых в виде УКС, не превышает (без учета упаковки данных об УКС в КПИ) 2720 бит. Таким образом, объем КПИ, передаваемый для управления прибором ТЕСИС (эксперимент по исследованию атмосферы Солнца) в данных режимах работы приборов КНА может составлять не менее 48 кбит/сеанс.

Некоторые физические параметры, а также подавляющая часть контрольно-служебной информации приборов КНА представлены в виде цифровых сигналов контактных, резистивных и аналоговых датчиков, которые для обработки и передачи на Землю традиционно поступают в служебную телеметрическую систему КА — БАТС. Подобное разделение информационных потоков с КНА имеет свои недостатки, главный из которых — необходимость постоянного использования двух различных радиолиний для передачи информации на Землю и, следовательно, постоянной работы двух различных наземных приемных пунктов (НИП). Это приводит, помимо увеличения трудоемкости в получении информации на Земле, их взаимной привязке по времени и т. д., еще и к значительному увеличению эксплуатационных расходов.

Все эти причины привели к тому, что в проекте «КОРОНАС-ФОТОН» для информационного обеспечения КНА была разработана распределенная система с участием КНА и штатных систем КА. В состав этой системы вошли ССРНИ КНА, БАТС КА, мультиплексный канал обмена КА (МКО), бортовая управляющая машина КА (БУМ) с соответствующим математическим обеспечением.

В штатном режиме работы аппаратура БАТС преобразовывает цифровые параметры, показания контактных и резистивных датчиков, аналоговых сигналов КНА в цифровой код, БУМ осуществляет необходимую выборку параметров и пересылку их по каналу МКО в ССРНИ. Дополнительно по этому каналу в ССРНИ передается ряд параметров КА и управляющая информация от БУМ для использования в приборах КНА. Выборка полного набора данных БАТС осуществляется с периодом 1 раз в 4 с.

Для реализации подобной структуры работы с параметрами КНА и КА, поступающими по каналу МКО, в ССРНИ предусмотрено выделение ресурсов ЗУ для этого потока — индивидуальный номер ИЦМ и соответствующая квота ЗУ, т. е. поток приравнен к информации, поступающей от научного прибора. Все эти данные передаются на Землю в едином информационном потоке ССРНИ и, наряду с данными от приборов КНА, разделяются на этапе предварительной обработки данных на Земле.

Суммарные потребности приборов КНА «ФОТОН» в информационных ресурсах для вывода научной информации и выделенные квоты приведены в табл. 2.

Суммарный объем ЗУ ССРНИ составляет 1,5 Гбайт. Организация ЗУ ССРНИ допускает два режима сохранения информации — с помехоустойчивым кодированием (по Хэммингу) и без него. Для помехоустойчивого кодирования используется кодирование. Помехоустойчивое кодирование повышает надежность хранения информации, но уменьшает суммарный объем доступного по записи ЗУ до 1 Гбайт. В ЗУ ССРНИ может храниться как помехозащищенная, так и не защищенная информация. Информация кодируется блоками по 128 кбайт. Если кодируется весь объем ЗУ, то максимальный объем сохраняемой информации снижается до 1 Гбайт. Кодирование и декодирование информации осуществляется «на лету» и не приводит к ухудшению временных характеристик ССРНИ.

Таблица 2. Потребность приборов КНА «ФОТОН» в информационных ресурсах

№ п/п	Источник	Пропускная способность ССРНИ для данного ИЦМ, байт/сут	Квота, байт/сут
1	«НАТАЛЬЯ-2М» (R1+R2)	221 184 000	102 297 600
2	«НАТАЛЬЯ-2М» (R3+R4)	221 184 000	102 297 600
3	«НАТАЛЬЯ-2М» (БВРВ)	55 296 000	15 000 000
5	«НАТАЛЬЯ-2М» (L+T)	55 296 000	45 977 600
6	«НАТАЛЬЯ-2М» (M+N)	55 296 000	22 118 400
7	«НАТАЛЬЯ-2М» (НГР)	221 184 000	221 184 000
9	ФОКА	55 296 000	1 588 224
10	БРМ	221 184 000	100 555 776
11	«ПИНГВИН-М»	55 296 000	6 337 553
13	«КОНУС-РФ-1»	55 296 000	8 388 608
14	«КОНУС-РФ-2»	55 296 000	8 388 608
15	«ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА»	55 296 000	3 145 728
16	СТЭП-Ф	55 296 000	7 520 256
19	RT2-1	55 296 000	5 242 880
20	RT2-2	55 296 000	5 242 880
21	ТЕСИС-1	221 184 000	174 762 667
22	ТЕСИС-2	221 184 000	174 762 667
23	ТЕСИС-3	221 184 000	174 762 667
24	СОКОЛ	55 296 000	2 097 152
25	БАТС		5 529 600
26	ССРНИ (1/64)		18 550 008
	Всего:		1 205 750 473

Примечание: номер, указанный рядом с названием прибора, означает номер канала связи с ССРНИ для данного прибора.

Сброс информации на НИП осуществляется системой КА БИС-КФ на частоте 8,2 ГГц. Штатные скорости передачи информации составляют 7,68 и 15,36 Мбит/с. Для получения заданной вероятности сбоев в процессе передачи данных на Землю на уровне 10^{-6} в системе БИС-КФ используется смешанная схема кодирования информации на основе рекомен-

даций для космических информационных систем комитета CCSDS (The Consultative Committee For Space Data Systems) и Европейского космического агентства. В БИС-КФ реализуется каскадная схема кодирования, включающая коды Рида-Соломона и сверточные.

Особенностью КА «КОРОНАС-ФОТОН» является одноосная ориентация (по оси $-Z$, направленной на Солнце). Две другие оси КА могут прецессировать во время орбитального движения КА. Для устранения сложностей с передачей информации на борту КА установлены два работающих на близких частотах передатчика, передающие антенны каждого из которых имеют диаграмму направленности 2л. Это позволяет осуществлять передачу данных на НИП при любой ориентации осей КА. НИП принимает данные одновременно на двух частотах, декодирует их и передает оба зарегистрированных потока данных в МИФИ. В МИФИ осуществляется сшивка этих двух потоков информации в единый информационный массив.

В период с 18 февраля по 17 марта 2009 г. непрерывно функционировал 1-й полуконкомплект ССРНИ. Данные телеметрии показывают стабильное, безошибочное функционирование ССРНИ в этот период. Было получено, сохранено и выдано в радиоканал 100 218 977 кадров ИЦМ, 553 отчета БУМ и 607 520 пакета с телеметрической информацией БАТС. С 18 марта по декабрь 2009 г. непрерывно функционировал 2-й полуконкомплект ССРНИ. За этот период получено, сохранено и выдано в радиоканал 2 056 509 298 кадров ИЦМ, 6596 отчетов БУМ и 9 488 428 пакетов с телеметрической информацией БАТС. Таким образом, суммарные объемы переданной информации за весь период функционирования (с 18 февраля по декабрь 2009 г.) составили: 2 156 728 275 кадров ИЦМ, 7149 отчетов БУМ и 10 095 948 пакетов БАТС. Для расширения возможностей КНА по накоплению и передаче информации на Землю был реализован вместо суточного полусуточный цикл работы ССРНИ с очисткой памяти и переустановкой информационных квот, что позволило увеличить объемы передаваемой на Землю информации как минимум в 1,5 раза, благодаря чему практически все информационные запросы приборов были удовлетворены.

В состав прибора ТЕСИС КНА «ФОТОН» входят два звездных оптических датчика. В процессе эксплуатации КА предусмотрена реализация экспериментального режима ориентации,

когда данные с оптических датчиков прибора ТЕСИС передаются в систему ориентации КА с целью организации режима с полноценной трехосной ориентацией.

Для многих приборов, регистрирующих жесткие электромагнитные излучения, использующих ядерно-физические методы регистрации и не имеющих четкой угловой направленности для элементов, важно получать вспомогательные данные о нахождении КА на освещенной или теневой части орбиты, а также в зонах, где радиационные условия могут имитировать эффекты, связанные с регистрацией солнечных вспышек. Для реализации такой дополнительной структуры управления в функции БУМ введены дополнительные возможности. Это выдача на КНА команд о нахождении КА на освещенной или теневой частях орбиты и команд о входе в географические зоны с неблагоприятными фоновыми условиями наблюдений — в зоны сильного влияния радиационных поясов и в зону Южно-Атлантической Аномалии. В качестве исходных данных для определения неблагоприятных для наблюдения зон взяты результаты, полученные МИФИ в эксперименте с прибором АВС-Ф (амплитудно-временной спектрометр) на борту КА «КОРОНАС-Ф». В сеансах передачи управляющих данных прогнозно-расчетная информация о временах начала и конца нахождения в зонах с повышенными фоновыми условиями или входа и выхода из теневых участков орбиты загружается в память БУМ и в соответствующие времена передается через БВКУ в БУС-ФМ для трансляции данных признаков приборам КНА. Использование в режиме реального времени такой информации позволяет качественно улучшить получаемые научные данные. Точность выдачи реальных сигналов (расчетных) об изменении условий измерений относительно действительного орбитального положения КА не превышает 10...15 с.

Описанная выше структура бортового комплекса управления и передачи данных научной аппаратуры спутникового проекта «КОРОНАС-ФОТОН» позволяла удовлетворить всем требованиям, предъявляемым со стороны КНА для этого космического проекта. Использование распределенной системы с участием КНА и штатных систем КА обеспечивало возможности для гибкого и оперативного управления параметрами различных приборов, сбора и передачи на Землю полных потоков информации о всех типах датчиков и данные о состоянии и ра-

ботоспособности систем КА. Уменьшение числа сеансов связи по каналам штатной системы (для сброса данных БАТС) за счет использования только одной линии связи ССРНИ позволяло существенно сократить эксплуатационные расходы, связанные с арендой и использованием НИП для приема данных по служебной радиолинии.

Функционирование бортового комплекса управления и передачи данных научной аппаратуры подтвердило правильность заложенных технических решений и эффективность, с точки зрения конечных пользователей (разработчиков научной аппаратуры), управления приборами и обработки получаемых научных данных.

Литература

- Космический комплекс «КОРОНАС-ФОТОН»: Справочные материалы (2007) / Под ред. Л. А. Макриденко. М.: ФГУП НПП «ВНИИЭМ», 2007. С. 101. ISBN 978-5-903194-03-2. 2007.
- Stepanov A. I., Klepikov V. Yu., Oraevsky V. N. et al. (1994) //CORONAS Information. 1994. N. 10. Astrophysical Institute, Potsdam, Germany, 1994.

CONTROL AND SCIENTIFIC DATA ACQUISITION COMPLEX FOR «CORONAS-PHOTON» SATELLITE PROJECT

Yu. I. Alikin¹, K. V. Anufreychik², A. S. Glyanenko³,
G. V. Okhmatovskiy¹, I. V. Chulkov², V. N. Yurov³

¹ Research Institute for Electromechanics (NIEM), Istra, Moscow region (from 11.2009 — Open Joint Stock Company Research Institute for Electromechanics (OJSC NIEM))

² Space Research Institute, Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow

³ Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 — National Research Nuclear University “MEPHI” (NRNU MEPhI)), Astrophysics Institute MEPhI, Moscow

In this paper the structure of control and scientific data acquisition complex for CORONAS-PHOTON satellite project, which is successfully operate, is showed. Integration the possibilities of special scientific services systems and standard satellites systems in common structure it's allowed to realize powerful and flexible space scientific experiments service system. The some first months of operation of scientific devices complex onboard satellite CORONAS-PHOTON confirms, that all used technical solutions are correct.

Keywords: CORONAS-PHOTON, satellite project, data acquisition, control, scientific devices, information, telecommands, control parameters, onboard complex, information interchange.

Alikin Yuri Ivanovich — Head of department — deputy chief designer. E-mail: 19al@istranet.ru.

Anufreychik Konstantin Vladimirovich — Head of the Laboratory. E-mail: kos@iki.rssi.ru).

Glyanenko Alexander Stepanovich — Head of the scientific group, Ph. D. E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Okhmatovskiy Georgy Vasilievich — Assistant head of department. Ph. D. E-mail: 19al@istranet.ru.

Chulkov Ilya Vladilenovich — Deputy director IKI RAN. E-mail: chulkov@iki.rssi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy director of the Astrophysics Institute MPhI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС ПРИЕМА, ОБРАБОТКИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В КОСМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ «КОРОНАС-ФОТОН»

**А. С. Буслов, Ю. Д. Котов, В. Н. Юров,
М. В. Бессонов, П. А. Калмыков, Е. М. Орешников,
А. М. Алимов, А. В. Туманов, Е. А. Жучкова**

*Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)),
Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва*

В работе рассматриваются особенности организационных и технических решений, принятых при создании наземного комплекса приема, обработки и распространения информации КА «КОРОНАС-ФОТОН», а также представляются основные результаты работы комплекса в ходе летных испытаний космического аппарата.

Ключевые слова: «КОРОНАС-ФОТОН», приемные станции, центр управления полетом, обработка информации.

Введение

При создании наземного комплекса приема, обработки и распространения целевой информации (НКПОР) космического проекта научного назначения следует учитывать ряд особенностей, обусловленных самой природой научных исследований в космическом пространстве. К таким особенностям можно отнести жесткое расписание и ограничение по продолжительности сеансов приема, невозможность потерь накопленных научных данных, необходимость максимально оперативной передачи

Буслов Антон Сергеевич — инженер. E-mail: ASBuslov@mephi.ru.

Котов Юрий Дмитриевич — директор ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук, доцент. E-mail: kotov@mephi.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Бессонов Михаил Владимирович — инженер. E-mail: mvbessonov@gmail.com.

Калмыков Петр Андреевич — аспирант. E-mail: kalmykov_petr@mail.ru.

Орешников Евгений Михайлович — студент. E-mail: EOreshnikov@gmail.com.

Алимов Александр Михайлович — студент. E-mail: ellairion@mail.ru.

Туманов Андрей Викторович — студент. E-mail: ceonhd@gmail.com.

Жучкова Евгения Анатольевна — инженер. E-mail: jan-k@mail.ru.

обработанных данных конечному потребителю и важность быстрой подготовки программ управления научными приборами, в соответствии с результатами экспресс-анализа информации (например, изменением характера протекания физических процессов на Солнце). Как правило, научные космические проекты выполняются широкой кооперацией ученых из разных стран, и число потребителей целевой информации может быть крайне велико, а это накладывает дополнительные требования на создаваемые наземные системы управления и распространения информации. Немаловажным, с организационной и технической точек зрения, является то, что в течение длительного времени в Российской Федерации практически не было запусков космических аппаратов, ориентированных на научные исследования. Существующие наработки в области управления и обработки данных научных космических экспериментов требуют, по меньшей мере, адаптации к современным аппаратно-программным комплексам, а целый ряд организационных мероприятий по распространению и обеспечению доступа к научной информации нуждается в разработке.

При подготовке к запуску российской космической обсерватории «КОРОНАС-ФОТОН», предназначенной для комплексных исследований Солнца и солнечно-земных связей, решался целый ряд организационных и технических вопросов, связанных с созданием НКПОР и наземного комплекса управления научными приборами, обеспечивающих решение задач научных исследований на современном техническом уровне. В данной работе рассмотрены организационно-технические решения, примененные в проекте «КОРОНАС-ФОТОН», и дана оценка их целесообразности по итогам первых этапов летных испытаний космического аппарата.

1. Организационная структура

Совместным решением Роскосмоса и Совета по космосу Российской академии наук функции Оператора миссии были возложены на головную научную организацию проекта — Московский инженерно-физический институт (государственный университет, МИФИ), при этом прием данных было решено осуществлять в Научном центре оперативного мониторинга земли (НЦ ОМЗ ФГУП «РНИИКП»). Данное решение было

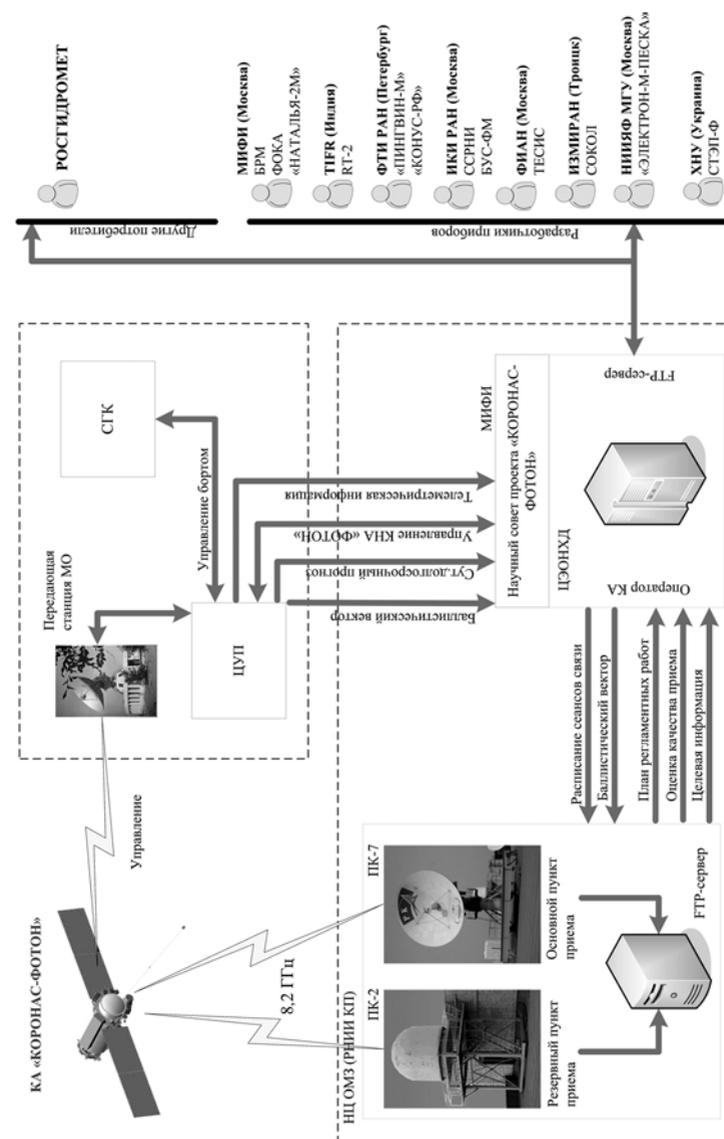


Рис. 1. Структура НКПОР КА «КОРОНАС-ФОТОН»

обусловлено особенностью эксплуатации научной аппаратуры, требующей контроля со стороны ученых-разработчиков данного оборудования на всех этапах подготовки программ управления и обработки получаемых данных. В результате, на базе НЦ ОМЗ был развернут наземный комплекс приема и обработки информации (НКПОИ), в составе основного и резервного приемных комплексов, а в МИФИ создан Центр экспресс-обработки, накопления и хранения данных (ЦЭОНХД), предназначенный для взаимодействия с НКПОИ, разработчиками приборов, структурами наземного комплекса управления (НКУ), а также прочими потребителями целевой информации. В совокупности структуры НКПОИ и ЦЭОНХД образовали наземный комплекс приема, обработки и распространения (НКПОР), управляемый Оператором проекта (рис. 1).

Внешними абонентами НКПОР стали в первую очередь структуры НКУ — Центр управления полетом «КОРОНАС-ФОТОН» (ЦУП К-Ф), созданный в ЦУП ФГУП «ЦНИИмаш», сектор главного конструктора (СГК), развернутый в ФГУП «НИИЭМ», а также десять научных коллективов, поставивших в комплекс научной аппаратуры (КНА) «ФОТОН» приборы собственной разработки. Практически сразу после начала работы число абонентов НКПОР стало расширяться с подключением сторонних потребителей целевой информации, таких как структуры Росгидромета.

2. Организация передачи и приема информации с КА

Сбор информации и ее хранение на борту КА осуществляется Системой сбора и регистрации научной информации (ССРНИ), разработанной Институтом космическим исследований РАН. ССРНИ проводит последовательный опрос источников цифровых массивов приборов, имеющих признак готовности блока данных, и получает от прибора для записи в собственную память блоки по 960 бит со скоростями 62,5 или 125 кбит/с, в зависимости от параметра «информативности», установленного жестко для каждого цифрового источника. Кроме того, в ССРНИ регулярно поступают данные бортовой аппаратуры телесигнализации (БАТС), для которых канал передачи на Землю через ССРНИ является резервным. Поступающая в ССРНИ информация дополняется собственным маркером кадра ССРНИ,

признаком цифрового источника, двухбайтовым номером кадра и контрольной суммой (рис. 2). Общий объем памяти, предназначенной для накопления научной информации, составляет 1,5 Гбайт. Для перераспределения свободной памяти между цифровыми источниками в ССРНИ существует система квотирования, управляемая по командам с Земли. При очередном сеансе связи на ССРНИ поступает команда «воспроизведение», по которой накопленный объем информации начинает передаваться в бортовую информационную систему «КОРОНАС-ФОТОН» (БИС-КФ), разработанную ФГУП «РНИИКП».

В рабочем режиме перед выдачей в радиолинию в БИС-КФ информация ССРНИ подвергается помехозащищающему кодированию кодером Рида-Соломона, снабжается маркером и трехбайтовым номером транспортного пакета, а также подвергается кодированию сверточным кодером. При проектировании описанный механизм преобразования информации перед выдачей в радиолинию предполагался в качестве экспериментального.

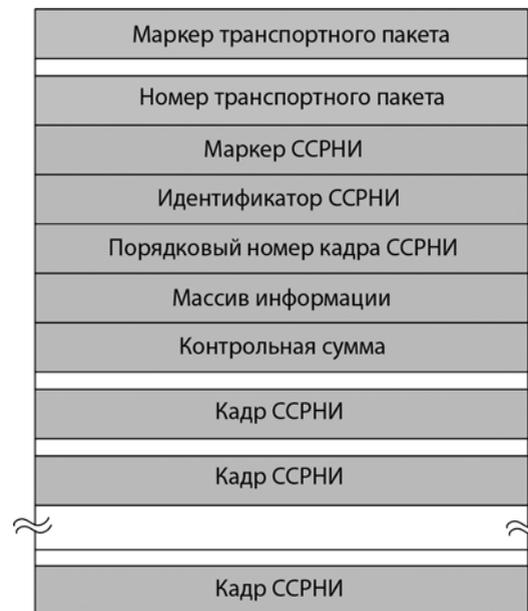


Рис. 2. Структура «упаковки» научной информации при передаче в радиолинии

В основном режиме информация должна была передаваться без наложения помехозащищающих кодеров, на вдвое меньшей скорости (7,68 Мбит/с). Однако тестовые передачи данных на начальном этапе работы КА в обоих режимах показали не только целесообразность введения кодирования, но и его незаменимость при работе с данным КА. Во избежание потерь научной информации режим работы «с кодированием» был выбран в качестве рабочего (рис. 3).

Особенностью работы КА «КОРОНАС-ФОТОН» является одноосная ориентация на Солнце, из-за которой не представляется возможной стабилизация аппарата относительно наземной приемной станции. Для предотвращения потерь целевой информации было принято решение о размещении на КА двух передающих антенн с перекрывающимися диаграммами направленности, которые передают в сеансе связи информацию одновременно на двух частотах — 8128 и 8320 МГц (для предотвращения интерференции сигнала). Соответственно, прием информации осуществляется приемным комплексом также на двух частотах одновременно. Однако данная особенность передачи данных поставила задачу обеспечения объединения данных, полученных по обоим каналам, в единый поток перед выдачей

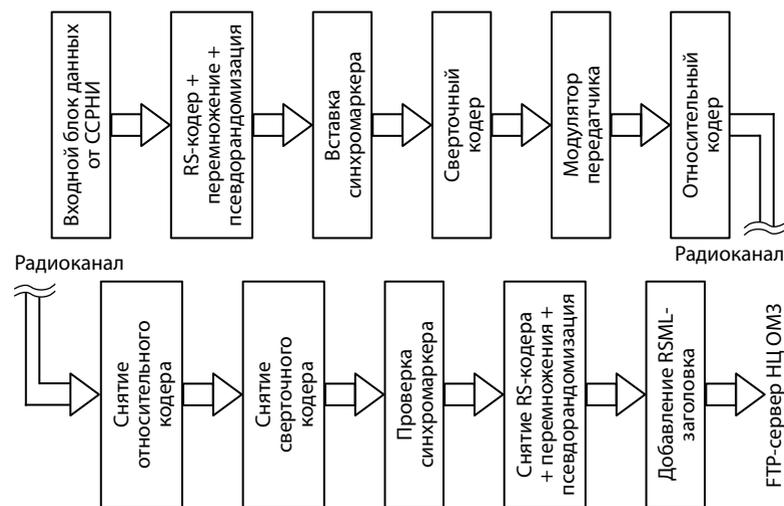


Рис. 3. Манипуляции при передаче и приеме данных с КА «КОРОНАС-ФОТОН»

целевой информации потребителям. В соответствии с принятыми решениями, данная операция проводится в ЦЭОНХД, в то время как НКПОИ обеспечивает регистрацию сигнала, снятие помехозащищающего кодирования и размещение полученных по обоим каналам данных на FTP-сервере (для доступа МИФИ). Там же размещается сопутствующая информация — протокол сеанса, отражающий число ошибок в синхромаркерах по каждому из каналов.

В проекте «КОРОНАС-ФОТОН», помимо основного приемного комплекса ПК-7, было принято решение использовать в качестве резервного комплекс ПК-2, для чего потребовалась его доработка. Данное решение принималось исходя из загруженности основного комплекса и возможности наложения по времени сеансов приема на нем для нескольких КА. На практике, для обеспечения полного беспробойного приема данных, потребовался перевод приемного комплекса ПК-2 в режим горячего резервирования из-за различных случайных факторов, влияющих на прием информации на ПК-7.

Планированием сеансов приема информации занимается Оператор проекта, исходя из необходимости проведения сеансов приема на четырех суточных витках (двух восходящих и двух нисходящих) и исключения витков с высоким углом места (из-за особенностей работы приемных комплексов). При этом подготовку командной информации для БИС-КФ и радиолинии осуществляет СГК, а выдачу плана-задания для НКПОИ — Оператор.

3. Организация управления приборами КНА «ФОТОН»

Управление КА «КОРОНАС-ФОТОН» разделено на две ключевые составляющие: управление бортовыми служебными системами КА осуществляется СГК, а управление КНА «ФОТОН» — Оператором. Для обеспечения надежного обмена командной информацией между Оператором и ЦУП К-Ф, а также между СГК и ЦУП К-Ф были организованы выделенные каналы файловой и голосовой связи, с созданием на базе ЦУП К-Ф файлообменного сервера, открытого для трех указанных абонентов. Заявки на управление размещаются и СГК и Оператором на файлообменном сервере, после чего объединяются в сводную программу сеанса связи и преобразуются к

виду, годному для восприятия КИС «Компарус», установленной на КА «КОРОНАС-ФОТОН». Перед выдачей программы сеанса связи на командно-измерительные пункты (КИП), для последующей ее загрузки на борт КА, подготовленные цифровые массивы проходят независимую перепроверку в ЦУП К-Ф, СГК и у Оператора.

Командная информация по отдельным приборам КНА «ФОТОН» начинает формироваться в организациях-разработчиках отдельных приборов, в соответствии с потребностями данного прибора в сервисном обслуживании и программой научных экспериментов, проводимых с его использованием. В ходе подготовки к летным испытаниям было принято решение, что форма заявки на управление прибором должна соответствовать принятой во время комплексных и лабораторных испытаний. Поэтому разработчики приборов готовят заявки на управление в знакомом им виде, а задача преобразования их к виду, годному для восприятия бортовой управляющей машиной (БУМ) ложится на Оператора. В эксперименте «КОРОНАС-ФОТОН» предусматривалось два типа команд — релейные команды, выдаваемые в прибор из БУМ через Блок управления и соединений (БУС-ФМ), и командные слова, выдаваемые в прибор из БУМ через ССРНИ. При этом команды, загружаемые на борт, могут не только непосредственно передаваться в прибор, но и выдаваться с привязкой к бортовой шкале времени. Во втором случае команды и их метки времени записываются в память БУМ и выдаются в заданные моменты.

Готовые заявки разработчиков загружаются ими на файлообменный FTP-сервер ЦЭОНХД, откуда автоматически копируются специальным программным обеспечением в директорию для подготовки сеанса управления. На все входящие заявки формируются квитанции о получении и соответствии установленному синтаксису (или, в полуавтоматическом режиме, описываются ошибки в форме заявки). Затем производится компилирование частных заявок в общую заявку на управление с расстановкой всех приборов по временам и типам выдаваемых команд. Оператор ЦЭОНХД при составлении общей заявки на управление КНА «ФОТОН» проверяет временной разнос команд для разных приборов, синтаксис команд, а также следит за соблюдением квоты на управление, выделенной для всего КНА. Команды, в зависимости от потребностей эксперимента, могут

подаваться с привязкой к бортовой шкале времени, восходящему узлу орбиты или в форме последовательности с паузой от предыдущей команды. Объединенная заявка составляется полуавтоматически с привязкой к бортовой шкале времени, после чего разработчикам приборов выдается квитанция с указанием времени выдачи команды и номера массива, в котором данная команда будет загружена на борт. Объединенная заявка составляется в форме, принятой для исходных данных сеанса управления ЦУП К-Ф, и загружается на файлообменный сервер ЦУП К-Ф. ЦУП К-Ф сопоставляет данные с планом сеанса управления, составленным СГК, и формирует программу связи, которая направляется по факсу для утверждения в СГК и Оператору проекта. Данные из ЦУП К-Ф в формате цифровых массивов поступают на передающие пункты МО РФ, откуда через КИС «Компарус» передаются на борт КА.

После выполнения сеанса управления ЦУП К-Ф формирует экспресс-отчет о сеансе управления и размещает на своем сервере данные о прохождении массивов в бортовую часть КИС «Компарус», принятую бортовую телеметрию БАТС, а также данные о расхождении бортовой и наземной шкал времени. После получения данной информации для разработчиков приборов формируется третья квитанция, извещающая о загрузке команд на борт.

В зависимости от интенсивности научной программы проекта может использоваться до двух сеансов управления приборами КНА в сутки. Для оперативной обработки поступающих данных и своевременного реагирования на изменения в наблюдаемых объектах все составные части цепочки управления работают круглосуточно.

4. Организация работы ЦЭОНХД

Построение работы ЦЭОНХД основывается на принципах дублирования и резервирования средств и максимальной автоматизации обработки данных, не требующих вмешательства операторов (рис. 4). В качестве аппаратной основы выбраны два кластера серверов под управлением операционной системы MS Windows Server 2003 и файловый RAID-массив на 16 жестких дисках, организованный по схеме RAID-5. Эта схема организации аппаратных средств позволяет исключить перерывы в работе

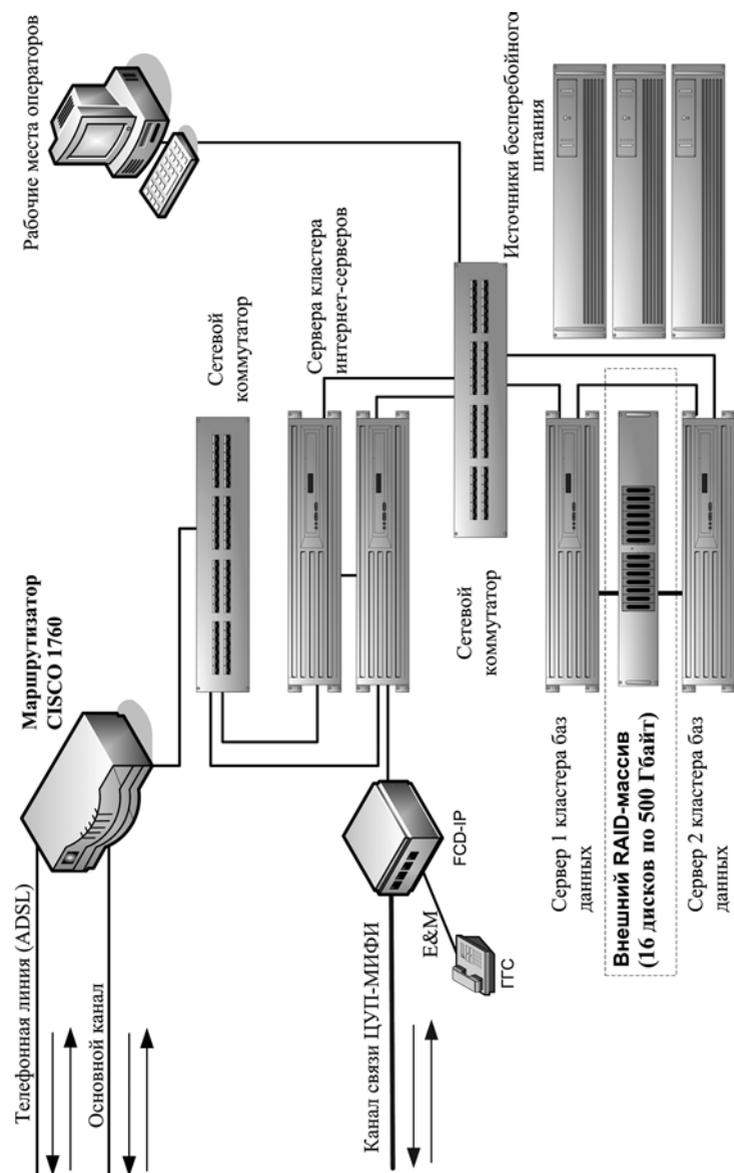


Рис. 4. Структурная схема аппаратных средств ЦЭОНХД

или потерю информации, связанные с выходом из строя оборудования. При этом первый кластер выполняет роль Интернет-сервера, на котором ведется файловый обмен с абонентами-потребителями информации, а второй кластер, подключенный к RAID, выполняет роль файлового архива и места организации базы данных (БД) ЦЭОНХД. Два операторских места объединены с кластерами в единую локальную сеть, имеющую шлюз в Интернет через маршрутизатор CISCO 1760, коммутирующий основной (провайдер МИФИ) и резервный (ADSL-провайдер) каналы Интернет, а также имеющую выход по выделенному каналу E1 на файлообменный сервер ЦУП К-Ф. Во избежание вирусных атак, внедрения посторонних лиц в сектор управления или порчи данных эксперимента места для экспресс-обработки данных находятся в отдельной от серверов локальной сети и доступ к ним осуществляется только через Интернет.

Поиск новых файлов и извещение операторов об их поступлении осуществляется многопоточным модульным FTP-клиентом, обеспечивающим не только занесение файлов в архив на RAID, но и первичную обработку (например, проверку синтаксиса заявок на управление). При этом все поступающие формализованные данные индексируются в БД ЦЭОНХД, реализованной на MySQL-сервере. Структура полей индексации в БД позволяет реализовать поиск и подготовку выборок файлов по заданным критериям, причем программное обеспечение (ПО) не только находит места хранения на RAID подходящих по выборке файлов, но и имеет возможность сохранить их в указанном месте на диске, или же, если это научные данные, отправить их на экспресс-обработку. Данное ПО разработано исходя из перспективной возможности выдачи каких-то типов данных по авторизованному запросу через Интернет для широкого круга сторонних пользователей.

Научная информация, размещенная на FTP-сервере НЦ ОМЗ, обнаруживается одним из потоков FTP-клиента, после чего копируется в ЦЭОНХД на RAID и операторские места для последующей обработки. Обработка включает в первую очередь объединение информации, поступившей по двум радиоканалам, в единый файл с кадрами, соответствующими критерию целостности контрольных сумм. Полученный файл, составленный из кадров ССРНИ, подвергается разделению по признаку цифрового источника. Результат разделения одним из потоков

FTP-клиента автоматически записывается в RAID-массив, а также выставляется на FTP-сервер ЦЭОНХД для пользователей информации. Отдельной обработке подвергается информация БАТС, пришедшая в потоке ССРНИ, — она разделяется поприборно и размещается для доступа разработчиков аппаратуры. Часть данных, необходимых для работы служб Росгидромета, оперативно выделяется и преобразуется к установленному виду. Все операции, проводимые ПО ЦЭОНХД, протоколируются в лог-файлах, а все виды поступающих корреспонденций автоматически записываются на RAID-массив, а формализованные корреспонденции, помимо этого, индексируются в БД ЦЭОНХД. На файлообменном FTP-сервере ЦЭОНХД протоколируются все действия пользователей по работе с размещенными файлами.

Помимо этого потоками FTP-клиента автоматически проводится обнаружение и обработка сопутствующей информации, поступающей в ходе работы КА: баллистических прогнозов, планов-заданий для приемных станций, данных по сверке бортовой и наземной шкал времени, данных об ориентации осей КА в пространстве и неформализованных текстовых сообщений между абонентами.

Целевая информация, для надежности, дополнительно записывается в долгосрочный архив на DVD-носителях.

Пользователи информации в течение одного часа рабочего времени должны обнаружить вновь поступившие данные и забрать их с FTP-сервера ЦЭОНХД для экспресс-обработки. В процессе экспресс-обработки разработчики аппаратуры должны установить статус ее работоспособности. Для этого целевая (научная) информация анализируется и выборочно сравниваются показания всех датчиков и детекторов, размещенных на приборе, с прогнозируемыми значениями. В случае возникновения подозрений в неработоспособности какого-либо из узлов оборудования разработчики проводят дополнительный анализ всей имеющейся целевой (научной) информации и показаний телеметрического оборудования. По итогам экспресс-анализа организация-разработчик прибора должна выложить в установленную директорию на FTP-сервере ЦЭОНХД отчет о статусе функционирования прибора в форме, соответствующей Протоколу информационного обмена между МИФИ и участниками эксперимента «КОРОНАС-ФОТОН». На основе посту-

пивших отчетов ЦЭОНХД готовит сводный отчет о функционировании КНА «ФОТОН» для представления его в ЦУП, СКГ и другие заинтересованные ведомства.

5. Основные результаты

Как показала практическая работа НКПОР за первые месяцы летных испытаний КА «КОРОНАС-ФОТОН» основные технические и организационные решения, выбранные при проектировании системы, оказались правильными. Определенные доработки потребовались только для ведения сопутствующих работ, по оценке качества и полноты приема информации, а также для учета заполнения памяти БУМ командами, выдаваемыми с меткой времени (во избежание ее переполнения). За истекший период было обработано порядка 630 Гбайт «сырой» информации, полученной на более чем 500 сеансах приема информации, из которой выделено около 300 Гбайт научных данных. Подготовлена командная информация для более чем 140 сеансов управления приборами КНА «ФОТОН». При этом по большинству параметров созданная система превзошла требования, предъявленные к ней в техническом задании (ТЗ). Оптимизация управления памятью ССРНИ позволила на 60 % повысить суточную информативность КНА «ФОТОН», суммарное время получения данных из НЦ ОМЗ составляет порядка 10 мин, что в 6 раз превосходит требования ТЗ, а время от получения данных в ЦЭОНХД до выдачи результатов разработчикам приборов составляет не более 30 мин, что в 4 раза превосходит требования ТЗ. В ходе работ были оперативно решены задачи по выделению и размещению оперативных данных с ряда приборов КНА «ФОТОН» для структур Росгидромета.

Существует возможность доработки принятых в создании НКПОР КА «КОРОНАС-ФОТОН» технических решений для создания центров хранения научных данных и комплексов приема, распределения информации и управления в перспективных космических экспериментах.

**GROUND COMPLEX OF INFORMATION RECEPTION,
PROCESSING AND DISTRIBUTION IN CORONAS-PHOTON
SPACE EXPERIMENT**

**A. S. Buslov, Yu. D. Kotov, V. N. Yurov, M. V. Bessonov, P. A. Kalmykov,
E. M. Oreshnikov, A. M. Alimov, A. V. Tumanov, E. A. Zhuchkova**

*Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 —
National Research Nuclear University “MEPhI” (NRNU MEPhI)),
Astrophysics Institute MEPhI, Moscow*

Organizational and technical decisions features, established while ground complex of information from CA CORONAS-PHOTON reception, processing and distribution setup are considered in this paper. Complex operation main results in the course of cosmic apparatus flight tests are also presented.

Keywords: CORONAS-PHOTON, receiving stations, Mission Control Center, information handling.

Buslov Anton Sergeevich — Engineer. E-mail: ASBuslov@mephi.ru.

Kotov Yury Dmitrievich — Director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: kotov@mephi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Bessonov Michail Vladimirovich — Engineer. E-mail: mvbessonov@gmail.com.

Kalmykov Petr Andreevich — Post-graduate student. E-mail: kalmykov_petr@mail.ru.

Oreshnikov Evgenie Mikhailovich — Student. E-mail: EOreshnikov@gmail.com.

Alimov Alexandr Mikhaylovich — Student. E-mail: ellairion@mail.ru.

Tumanov Andrey Viktorovich — Student. E-mail: ceonhd@gmail.com.

Zhuchkova Evgenya Anatol'evna — Engineer. E-mail: jan-k@mail.ru.

**СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ
«НАТАЛЬЯ-2М». ПОЛЕТНАЯ КАЛИБРОВКА, НАСТРОЙКА
И ПЕРВЫЕ НАУЧНЫЕ ДАННЫЕ**

**А. И. Архангельский, М. В. Бессонов, А. С. Буслов, К. Ф. Власик,
А. С. Глянченко, В. В. Кадилин, Ю. Д. Котов, Е. Э. Лупарь,
И. В. Рубцов, В. Т. Самойленко, В. Н. Юров**

*Московский инженерно-физический институт (Государственный
университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный
исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)),
Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва*

Дается краткое описание устройства и наблюдательных возможностей спектрометра высокоэнергичных излучений «НАТАЛЬЯ-2М». «НАТАЛЬЯ-2М» — часть комплекса научной аппаратуры «ФОТОН» спутника «КОРОНАС-ФОТОН». Спектрометр имеет широкий диапазон регистрации гамма-излучения 0,3...2000 МэВ и построен на базе монокристаллов CsI(Tl) с полной площадью 32×38 см и толщиной 18 см. Также прибор предназначен для наблюдений нейтронов солнечного происхождения с энергиями 20...300 МэВ.

Приводятся результаты полетной настройки и калибровки прибора, а также временные профили фоновых скоростей счета и спектры для всех энергетических диапазонов спектрометра, примеры регистрации прибором событий типа «гамма-всплеск».

Космический аппарат (КА) «КОРОНАС-ФОТОН» с научным оборудованием, предназначенным главным образом

Архангельский Андрей Игоревич — научный сотрудник. E-mail: angel1966@list.ru.

Бессонов Михаил Владимирович — инженер. E-mail: mvbessonov@gmail.com.

Буслов Антон Сергеевич — инженер. E-mail: ASBuslov@mephi.ru.

Власик Константин Федорович — ведущий инженер, канд. физ.-мат. наук. E-mail: KFV6490@mail.ru.

Глянченко Александр Степанович — заведующий научно-исследовательским сектором, канд. физ.-мат. наук. E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Кадилин Владимир Валерьевич — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук.

Котов Юрий Дмитриевич — директор ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: kotov@mephi.ru.

Лупарь Евгений Эдуардович — инженер. E-mail: EELupar@mephi.ru.

Рубцов Игорь Васильевич — ведущий инженер. E-mail: IVRubtsov@mephi.ru.

Самойленко Владимир Тимофеевич — старший научный сотрудник.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

для комплексных наблюдений Солнца, был запущен с космодрома Плесецк 30 января 2009 г. на низкую круговую околоземную орбиту (высота приблизительно 550 км, наклонение 82,5°).

Ключевые слова: «КОРОНАС-ФОТОН», исследования Солнца, «НАТАЛЬЯ-2М», гамма-спектрометр, полетная калибровка, спектры гамма-излучения, временные профили, гамма-всплески.

Описание прибора

Прибор «НАТАЛЬЯ-2М» является сцинтилляционным спектрометром гамма-излучения и предназначен для проведения следующих измерений:

- изучения временного поведения интенсивности и энергетических спектров жесткого электромагнитного излучения солнечного и космического происхождения в широком энергетическом диапазоне от 0,3 до 2000 МэВ;
- наблюдения нейтронов солнечного происхождения с энергиями 20...300 МэВ.

Регистрирующий блок прибора «НАТАЛЬЯ-2М» состоит из набора сцинтилляционных счетчиков (рис. 1). Для регистрации гамма-излучения используется спектрометр (СЕ) на основе монокристаллов CsI(Tl) общей площадью 32×38 см и толщиной 18 см, состоящий из двух секций (СЕ-1М и СЕ-2М), расположенных одна над другой. События, связанные с фоном заряженных частиц, исключаются при помощи пластмассовых сцинтилляционных детекторов (антисовпадательный колпак АК и плоский детектор АС).

Спектрометр СЕ построен по модульному принципу и состоит из 16 модулей с размерами монокристалла 380×80×45 мм, каждый из которых «просматривается» двумя фотоумножителями ФЭУ-183, установленными на торцевых гранях. Модули уложены в четыре слоя, соседние слои (А, В, С, D — по четыре модуля в каждом) повернуты относительно друг друга на 90°.

Энергетический диапазон спектрометра составляет 0,3 МэВ...2 ГэВ, который для уменьшения загрузки детекторов, улучшения соотношения эффект/фон и повышения надежности прибора разбит на четыре поддиапазона для гамма-излучения и нейтронный канал.

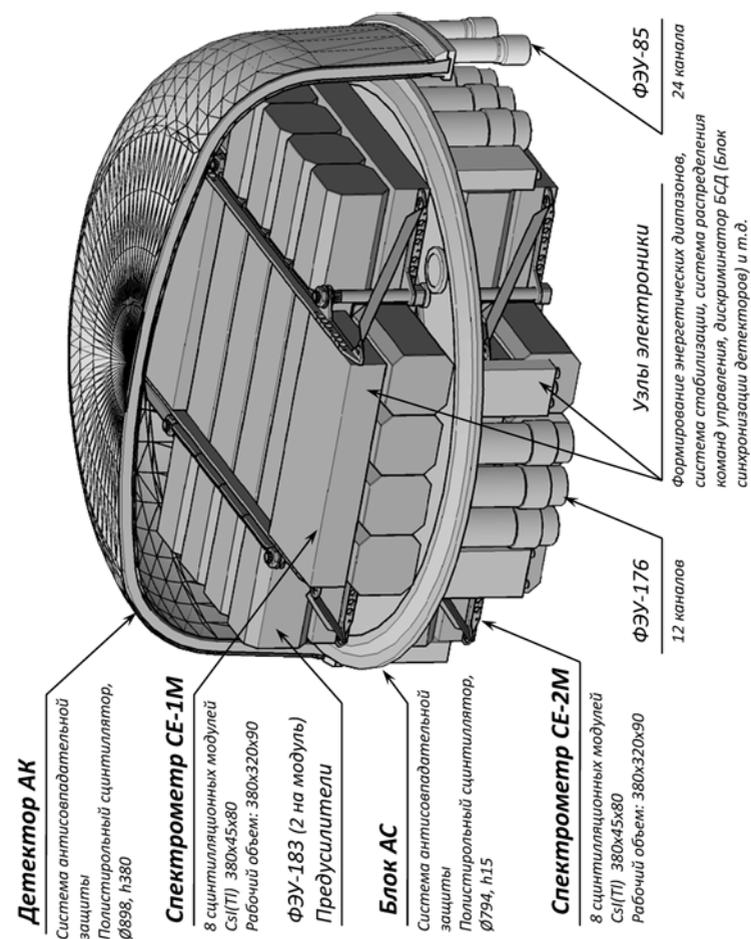


Рис. 1. Регистрирующий блок прибора «НАТАЛЬЯ-2М»

Диапазоны регистрации гамма-излучения приведены в табл. 1. Спектральная информация для каждого диапазона выводится на независимые каналы обработки (АЦП), для R-диапазона выводятся четыре сигнала — с каждого модуля верхнего слоя спектрометра СЕ-1М (R1-R4).

Таблица 1. Основные характеристики прибора

Канал	Энергетический диапазон, МэВ	Эффективная площадь, см ²	Энергетическое разрешение, ΔЕ/Е	Время накопления, с
<i>Рентген- и гамма-излучение</i>				
R (Roentgen)	0,2...2	920	10...11 % (662 кэВ) измеренное	Спектры: 1 Интенсиметры: 0,1
L (Low gamma)	1...18	900	5,9 % (2,2 МэВ) 4,6 % (4,4 МэВ) измеренное	Спектры: 10 Интенсиметры: 1
M (Medium gamma)	7...250	800	6 % (10 МэВ) расчет 28 % (130 МэВ) измеренное	Спектры: 10 Интенсиметры: 1
H (High gamma)	50...1600	750	28 % (130 МэВ) измеренное	Спектры: 10 Интенсиметры: 1
<i>Нейтроны</i>				
N (Neutrons)	20...300	40...120	—	Спектры: 70 Интенсиметры: 1

Приведенные в таблице значения эффективной площади для различных диапазонов получены расчетным путем. Калибровка L-диапазона получена с помощью нейтронного PuBe-источника, M- и H-диапазонов — на атмосферных мюонах с использованием режима телескопа.

Модули системы обработки и вывода информации СОВИ-3М и СОВИ-5М производят окончательную обработку сигналов:

- формирование энергетических диапазонов;
- логический отбор по заданным критериям;
- измерение и сжатие энергетических спектров;
- получение двухмерных спектров для выделения потоков нейтронов;

- вывод полученной информации на телеметрическую систему сбора и регистрации научной информации (ССРНИ).

Кроме того, с блока обработки событий модернизированного (БОСМ), осуществляющего отбор данных по программируемым критериям, выводится информация, которая используется для получения данных о потоках излучений в различных диапазонах (интенсиметры).

Режимы работы научной аппаратуры

Прибор «НАТАЛЬЯ-2М» работает в режиме непрерывного наблюдения. Вывод физической информации с прибора осуществляется по шести независимым каналам обмена информацией с телеметрической системой ССРНИ (табл. 2) с частотой 62,5 и 125 кГц. Суммарная суточная квота прибора «НАТАЛЬЯ-2М» составляет около 500 Мбайт/сут или 38 % от суммарных ресурсов ССРНИ.

В приборе реализована схема управления, позволяющая принимать с Земли в процессе эксплуатации массивы командно-программной информации, которые используются для прецизионного управления спектрометрическими узлами прибора «НАТАЛЬЯ-2М». Для точной временной привязки данных и управления режимами работы научной аппаратуры (НА) «НАТАЛЬЯ-2М» используются получаемый от ССРНИ код бортового времени (КБВ) и управляющие кодовые слова (УКС).

Для управления работой прибора «НАТАЛЬЯ-2М» используется 40 специальных команд от модифицированного блока управления и соединений (прибор БУС-ФМ) (команды включения/отключения основных и резервных источников низковольтного и высоковольтного питания спектрометров СЕ-1М, СЕ-2М, детекторов АК, АС, блоков СОВИ-3М, СОВИ-5М; инициализация процессоров блоков СОВИ-3М, СОВИ-5М; включение основной и резервной систем автоподстройки спектрометров СЕ-1М, СЕ-2М; включение/отключение дистанционного управления порогом детекторов АК, АС; команды управления фиксированными порогами детекторов АК, АС) и четыре общие комплексные команды (признаки нахождения КА в области «Свет/Тень» и «Высокие широты/средние широты» («Вшир/Сшир»)).

Таблица 2. Параметры каналов вывода научной информации прибора «НАТАЛЬЯ-2М»

Цифровой источник	Канал	Спектральная информация		Интенсиметры		Управление
		число каналов, $N_{\text{кан}}$	время накопления, $T_{\text{нак}}$	количество	время накопления, с	
0	R1	256	1	4	0,1	Основной канал СЕ1
	R2	256	1	4	0,1	
1	R3	256	1	4	0,1	Резервный канал СЕ2
	R4	256	1	4	0,1	
4	L	1024	10	1	1	Основной канал СЕ2
	T (подкл. Lx3)	1024	10	1	1	
5	M	256	10	1	1	Резервный канал СЕ1
	H	256	10	1	1	
6 (НГ)	N1	256×256 матрица	70	1	1	
	N2	256×256 матрица	70	1	1	
	N2(АК)	4096	см. прим.	1	1	
2 (БОСМ)	АК	–	–	1	1	
	АС	–	–	1	1	
	LC	–	–	1	1	
	LD	–	–	1	1	
	J1	–	–	1	1	Через СЕ1
	БСД	–	–	1	1	Через СЕ1
	LA	–	–	1	1	
	LB	–	–	1	1	

Примечание. Для режима НГ (нейтрон/гамма) возможна одновременная работа только одного канала из перечисленных.

Сбор и передача телеметрической информации о состоянии прибора «НАТАЛЬЯ-2М» при испытаниях в составе КА и при штатной эксплуатации осуществляется бортовой аппаратурой телесигнализации (БАТС). БАТС обеспечивает прием следующей служебной информации:

- *Цифровые датчики.* Количество — 24. Основное назначение — контроль состояния блоков СОВИ-3М и СОВИ-5М, контроль подачи низковольтного и высоковольтного напряжения на спектрометры СЕ-1М, СЕ-2М и детекторы АК, АС, контроль включения системы автоподстройки спектрометров СЕ-1М и СЕ-2М, контроль управления энергетическими порогами детекторов АК и АС.
- *Аналоговые датчики.* Количество — 8. Основное назначение — контроль параметров блоков высоковольтного источника (ВВИ) спектрометров СЕ-1М, СЕ-2М и детекторов АК, АС.
- *Датчики температуры.* Количество — 4. Основное назначение — контроль температуры спектрометров СЕ-1М, СЕ-2М и блоков СОВИ-3М, СОВИ-5М.

Полетная настройка и калибровка

Для проведения настройки и калибровки прибора в полете используются возможности, предоставляемые двумя системами: стабилизации усиления и полетной калибровки. Первая позволяет регулировать усиление каждого ФЭУ прибора таким образом, чтобы пик от известной гамма-линии попадал для всех модулей в один и тот же канал аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Вторая дает в R(L)-каналах каждого модуля линии встроенного изотопа Со-60, обеспечивает подавление фона в калибровочном режиме, позволяет проводить независимую калибровку низкоэнергичных каналов спектрометра. Тонкая настройка обеспечивает сведение энергетических шкал всех модулей прибора и позволяет улучшить энергетическое разрешение.

Система стабилизации

Стабильность параметров спектрометра обеспечивается системой стабилизации усиления, включающей эталонный световой источник и узлы регулирования усиления каждого ФЭУ спектрометра. Система стабилизации позволяет компенсировать влияние на коэффициент усиления ФЭУ следующих факторов:

- изменения загрузки детектора;

- внешних магнитных полей;
- эффектов деградации детекторной системы.

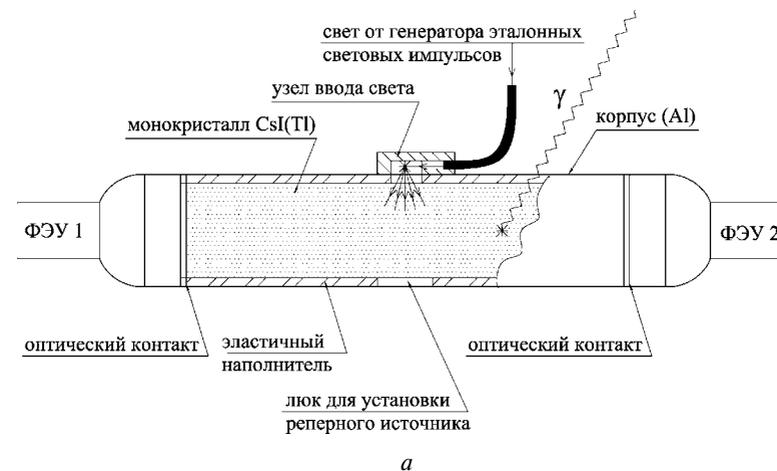
В каждом слое обоих спектрометров установлен эталонный источник световых импульсов на основе генератора импульсов тока (ГИТ) и светодиодов, свет от которых разветвляется при помощи волоконной оптики и вводится в центр большой грани каждого модуля (рис. 2). Схемы стабилизации для каждого ФЭУ измеряют сигнал, соответствующий эталонному импульсу, и изменяют напряжение на делителе ФЭУ таким образом, чтобы амплитуда сигнала оставалась постоянной и равной опорному напряжению, задаваемому цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП). Все ЦАП системы управляются контроллерами системы обработки информации через SPI-интерфейс. При включении прибора в них загружаются начальные уставки, которые могут изменяться как в процессе настройки аппаратуры, так и во время летного эксперимента (при помощи управляющих кодовых последовательностей, передаваемых по радиоканалу). Проведенные с системой стабилизации измерения показали, что она уменьшает нестабильность спектрометрического тракта до величины $\sim 0,1\%$.

Система полетной калибровки

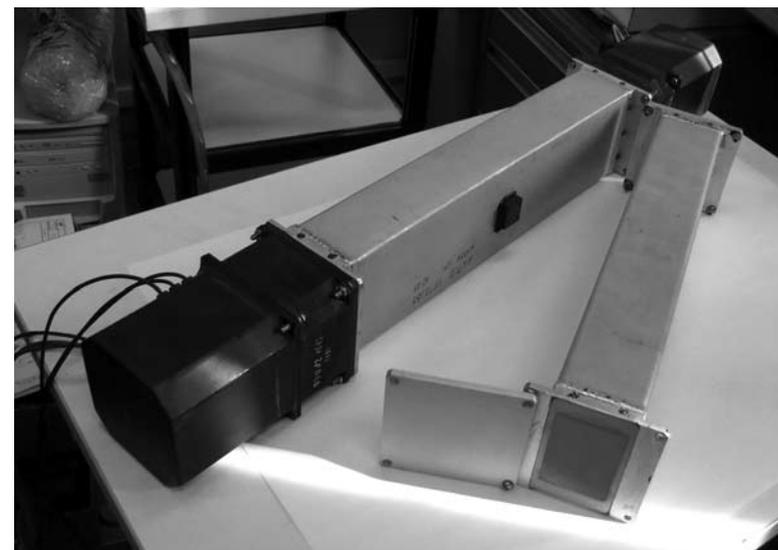
Система полетной калибровки предназначена для:

- калибровки низкоэнергичных каналов спектрометра во время проведения летного эксперимента;
- проведения настройки прибора (согласование энергетических шкал модулей);
- индикации долговременных эффектов старения в приборе (светодиоды, монокристаллы CsI(Tl));
- учета влияния температурной нестабильности.

Для калибровки энергетической шкалы в полете в состав спектрометра введен источник «меченых» гамма-квантов на основе пластмассового сцинтиллятора с растворенным в нем изотопом Co-60. Схема распада Co-60 такова, что 100 % гамма-квантов сопровождается β -частицами со средней энергией ≈ 96 кэВ. Пластмассовый сцинтиллятор «просматривается» ФЭУ-85, сигнал с которого, усиленный и сформированный



а



б

Рис. 2. Сцинтиляционный модуль спектрометра СЕ

амплитудным дискриминатором-формирователем по амплитуде и длительности, используется как сигнал «мечения». Для получения калибровочных спектров в состав регистрирующей аппаратуры прибора введен дополнительный АЦП, работающий с сигналами R(L)-диапазона в режиме совпадений с сигналом «мечения».

При штатной работе прибора, после окончания настроек, планировалось периодически включать калибровочный режим и, после обработки спектров на Земле, при необходимости проводить корректировку амплитуды импульса светодиода системы стабилизации.

Калибровка энергетических диапазонов

В ходе проведения летного эксперимента для настройки и калибровки спектрометра используются следующие средства:

1. Для настройки и калибровки в R- и L-диапазонах (низкие энергии):

- Спектр энерговыделений от естественного локального фона КА; интерпретация данных затруднена ввиду неоднозначности идентификации фоновых линий,
- Спектр от встроенного источника «меченых» фотонов Co-60 (рис. 3).

Анализ спектров от источника «меченых» фотонов Co-60, проводимый на участках орбиты с наименьшим фоном (в приэкваториальных областях), показал, что положения калибровочных пиков имели незначительное смещение относительно наземных значений, не превышающее 10%. На рис. 4 видно расхождение (порядка 10 каналов) в положении пиков от источника «меченых» фотонов Co-60 для энергетических каналов R1 и R3 спектрометра SE-1M. Положение пиков в канале R3 соответствует положению этих пиков при наземных испытаниях.

Кроме того, так как каждый из 16 детекторов спектрометров SE-1M и SE-2M «просматривается» одновременно двумя ФЭУ, то в некоторых детекторах было обнаружено расхождение в положении пиков от источника «меченых» фотонов Co-60 для ФЭУ № 1 и ФЭУ № 2 (рис. 5), что приводило к ухудшению энергетического разрешения детекторов.

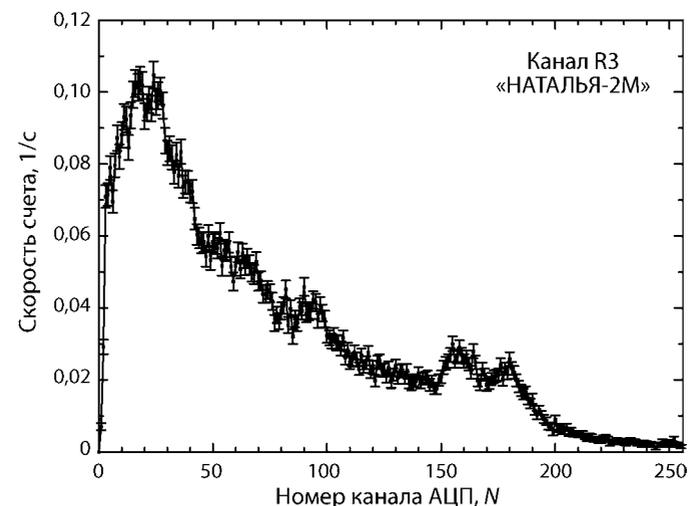


Рис. 3. Спектр совпадений с БСД (источник Co-60) в энергетическом канале R3 (0,2...2 МэВ) прибора «НАТАЛЬЯ-2М», набранный в экваториальной области 26.03.2009 за 25 мин

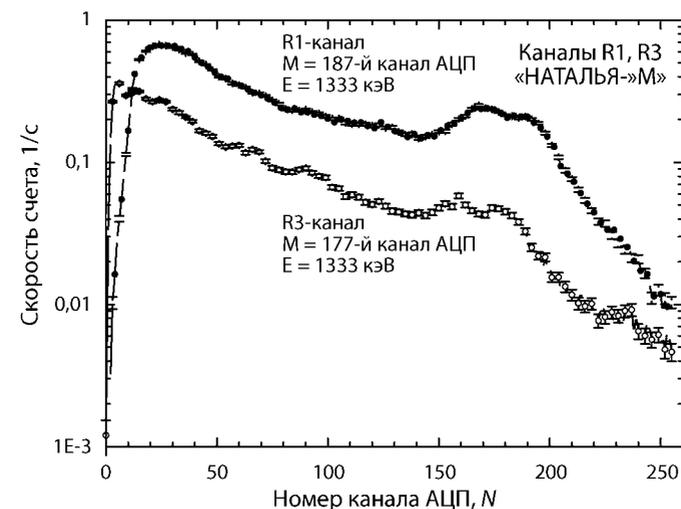


Рис. 4. Спектр совпадений с БСД (источник Co-60) в энергетических каналах R1, R3 (0,2...2 МэВ) прибора «НАТАЛЬЯ-2М», набранный 26.03.2009 за 3 ч

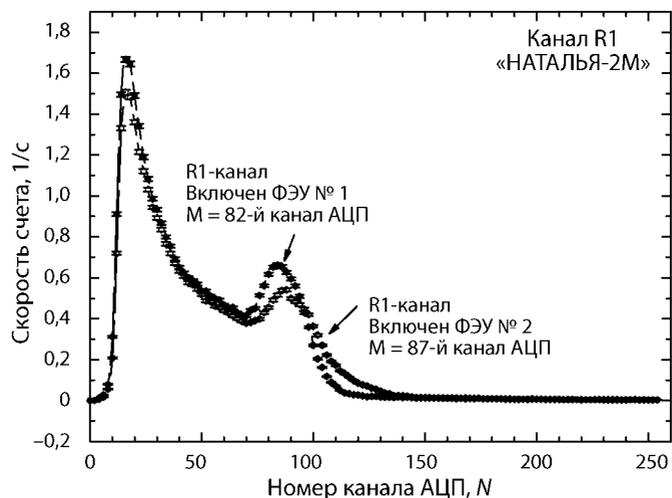


Рис. 5. Спектр совпадений с БСД (источник Co-60) в энергетическом канале R1 (0,2...2 МэВ) прибора «НАТАЛЬЯ-2М», при отдельном включении ФЭУ № 1 и ФЭУ № 2 детектора R1, набранный 26.03.2009 за 3 ч

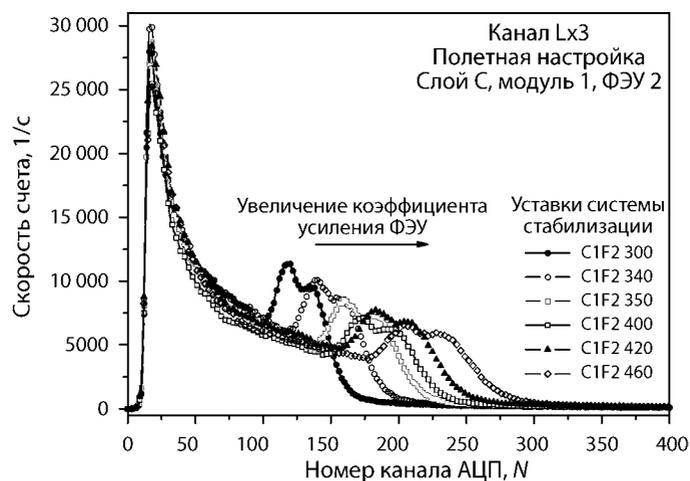


Рис. 6. Спектры совпадений с БСД (источник Co-60) для модуля № 1 слоя С прибора «НАТАЛЬЯ-2М», при отдельном включении ФЭУ № 2, набранные при различных значениях уставок системы стабилизации

Для устранения расхождений в положении пиков была проведена пошаговая тонкая подстройка усиления детекторов прибора «НАТАЛЬЯ-2М». Для каждого детектора и каждого из двух ФЭУ детекторов спектрометров СЕ-1М и СЕ-2М были сняты на орбите (для зон с низким фоном) спектры от источника «меченых» фотонов Co-60 . Полученные полетные спектры сравнивались с соответствующими наземными калибровочными спектрами, и определялось направление ухода калибровочного спектра для каждого детектора и для каждого из 32 ФЭУ прибора «НАТАЛЬЯ-2М». Затем формировался блок команд по изменению усиления детекторов в нужном направлении, путем подачи уставок на системы стабилизации ФЭУ детекторов спектрометров СЕ-1М и СЕ-2М (рис. 6). После выполнения команд процедура повторялась снова, до тех пор, пока положение калибровочных пиков для каждого ФЭУ детекторов не совпадало с положением пиков, полученных при наземных калибровках прибора «НАТАЛЬЯ-2М».

В результате проведенных работ полетная настройка прибора по отношению к наземным калибровочным значениям была осуществлена с точностью порядка 1–2 %.

2. Для калибровки M и H диапазонов (высокие энергии) используется спектр релятивистских протонов первичного космического излучения (режим телескопа) (рис. 7, 8).

В этом режиме спектры каналов M и H набираются в совпадениях с сигналом одновременного срабатывания четырех перекрещивающихся модулей, по одному в каждом слое (A_2 , B_2 , C_2 , D_2), и детекторов антисовпадательной защиты АК и АС, таким образом регистрируются заряженные частицы, проходящие насквозь через прибор под углами $\pm 10^\circ$ через область, близкую к оси спектрометра и имеющую площадь примерно 8×8 см. При соответствующем выборе порога можно отобрать события, отвечающие только релятивистским и ультрарелятивистским частицам, для которых может быть получен корректный расчетный спектр энерговыделений. Этот режим также позволит получить данные о потоках частиц высоких энергий.

На полученных спектрах виден пик энерговыделения релятивистских заряженных частиц (протонов). Энергетическое разрешение составило 26 ± 1 % для энергии 120 МэВ. При наземных калибровках прибора «НАТАЛЬЯ-2М» на атмосферных мюонах

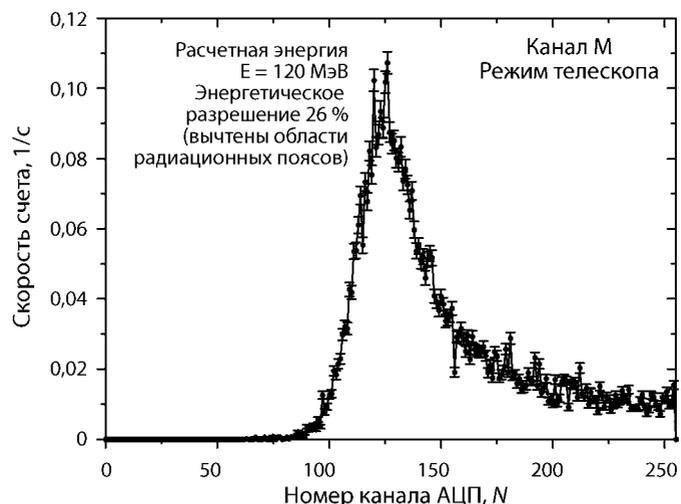


Рис. 7. Спектр энерговыделений заряженных частиц (протонов) в энергетическом канале М (7...250 МэВ) прибора «НАТАЛЬЯ-2М», набранный в режиме телескопа 20:45–22:15 10.03.2009 г. Положение пика с расчетной энергией 120 МэВ соответствует наземной калибровке

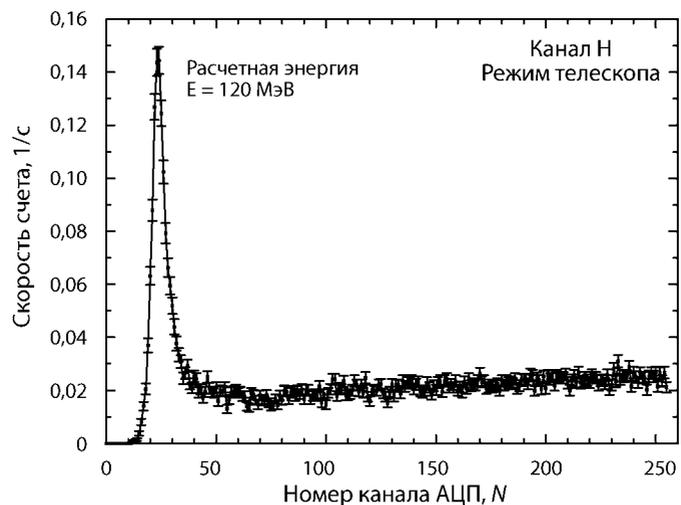


Рис. 8. Спектр энерговыделений заряженных частиц (протонов) в энергетическом канале Н (50...1600 МэВ) прибора «НАТАЛЬЯ-2М», набранный в режиме телескопа 20:45–22:15 10.03.2009 г. Положение пика с расчетной энергией 120 МэВ соответствует наземной калибровке

было получено энергетическое разрешение $28 \pm 1\%$ для энергии 130 МэВ.

Фоновые измерения

Прибор «НАТАЛЬЯ-2М» ориентирован главным образом на регистрацию событий, связанных с большими энерговыделениями. При относительно спокойном состоянии Солнца, когда, по данным GOES и других аппаратов, нет вспышек класса С и выше, имеется возможность проведения настройки и полетной калибровки прибора, одновременно с изучением фоновой обстановки.

Изучение временного поведения фоновых загрузок прибора «НАТАЛЬЯ-2М»

В течение полета проводились постоянные измерения фона. На рис. 9 показано типичное поведение потоков излучений, зарегистрированных прибором «НАТАЛЬЯ-2М» при орбитальном движении КА. Зоны с низкими значениями потоков излучения — в районе экватора, далее, по ходу перемещения спутника, видны прохождения зон полярных шапок, вход КА в радиационные пояса Земли (РПЗ) и область Южно-Атлантической Аномалии (ЮАА), где наблюдаются максимальные по величине загрузки.

В табл. 3 приведена расшифровка обозначений каналов интенсивметров второго цифрового источника прибора.

Таблица 3. Интенсиметры прибора

«НАТАЛЬЯ-2М» Второй цифровой источник БОСМ 8 интенсиметров	1	AK	Сигналы антисовпадений с блоков АК и АС
	2	AC	
	3	LC	Сигналы с выходов L-сумматоров отдельных слоев блока СЕ-2М
	4	LD	
	5	J1	Сигнал, выдаваемый при «большом» энерговыделении в верхнем слое блока СЕ-1М
	6	BSD	Служебный сигнал совпадений с β -синхронизатора (БСД)
	7	LA	Сигналы с выходов L-сумматоров отдельных слоев блока СЕ-1М
	8	LB	

Восстановление работы системы стабилизации детекторов прибора «НАТАЛЬЯ-2М» при прохождении КА Южно-Атлантической Аномалии

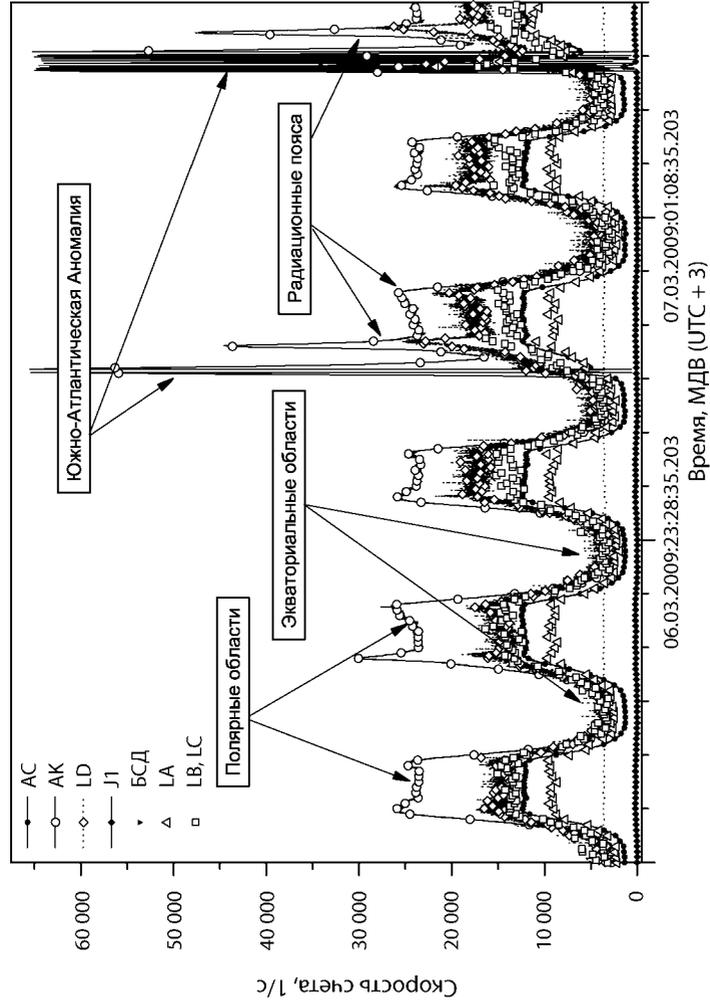


Рис. 9. Типичный временной профиль скорости счета интенсивметров прибора «НАТАЛЬЯ-2М»

На рис. 10 приведен суточный временной профиль загрузки каналов прибора «НАТАЛЬЯ-2М» на примере детекторов антисовпадательной защиты АК и АС. В течение суток (15 витков) КА «КОРОНАС-ФОТОН» 8 (9) раз проходит через область ЮАА, при этом скорость счета в детекторах прибора «НАТАЛЬЯ-2М» увеличивается от 10 до 200 раз, в зависимости от места прохождения КА ЮАА, по сравнению с темпом счета в районе экватора. При таких больших нагрузках в отдельных модулях спектрометров прибора «НАТАЛЬЯ-2М» наблюдалось нарушение работы системы стабилизации.

На рис. 11 видно, что при первом прохождении КА ЮАА (перегрузка примерно в 10 раз) все детекторы прибора «НАТАЛЬЯ-2М» восстановили исходную скорость счета после прохождения ЮАА. Однако, при втором прохождении КА ЮАА (перегрузка в 100 раз), детекторы слоя LC спектрометра СЕ-2М не восстановили свои параметры, скорость счета в канале LC (на рис. 10 показана темно-серой линией) осталась ненормально большой (порядка 18 000 имп./с вместо 10 000 имп./с в приполярных зонах). Детекторы остальных каналов — АК, АС, LA, LB, LD, J1 и БСД — восстановили прежнюю скорость счета.

Для прохождения ЮАА без нарушения характеристик детекторов прибора «НАТАЛЬЯ-2М» был разработан специальный алгоритм управления системой стабилизации спектрометров СЕ-1М и СЕ-2М, который заключается в следующем: за 5 мин до вхождения КА в ЮАА на ЦАП системы стабилизации всех детекторов прибора «НАТАЛЬЯ-2М» подается нулевая уставка. При этом на ФЭУ всех модулей спектрометров прибора «НАТАЛЬЯ-2М» устанавливается минимально высокое напряжение (для диапазона регулирования, обеспечиваемого системой стабилизации) и, следовательно, скорость счета фоновых частиц становится также минимальной. Через 5 мин после прохождения КА ЮАА на системы стабилизации всех детекторов прибора «НАТАЛЬЯ-2М» подаются сначала нулевая уставка, а затем рабочие значения уставок, которые восстанавливают рабочие характеристики детекторов спектрометров СЕ-1М и СЕ-2М (рис. 12).

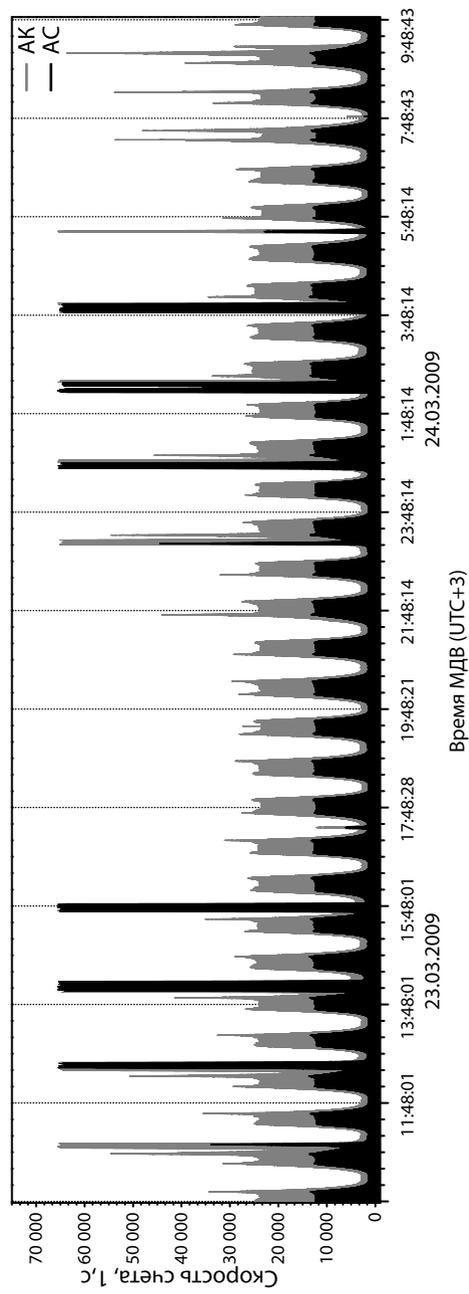


Рис. 10. Суточный временной профиль АК (серый фон) и АС (черный фон)

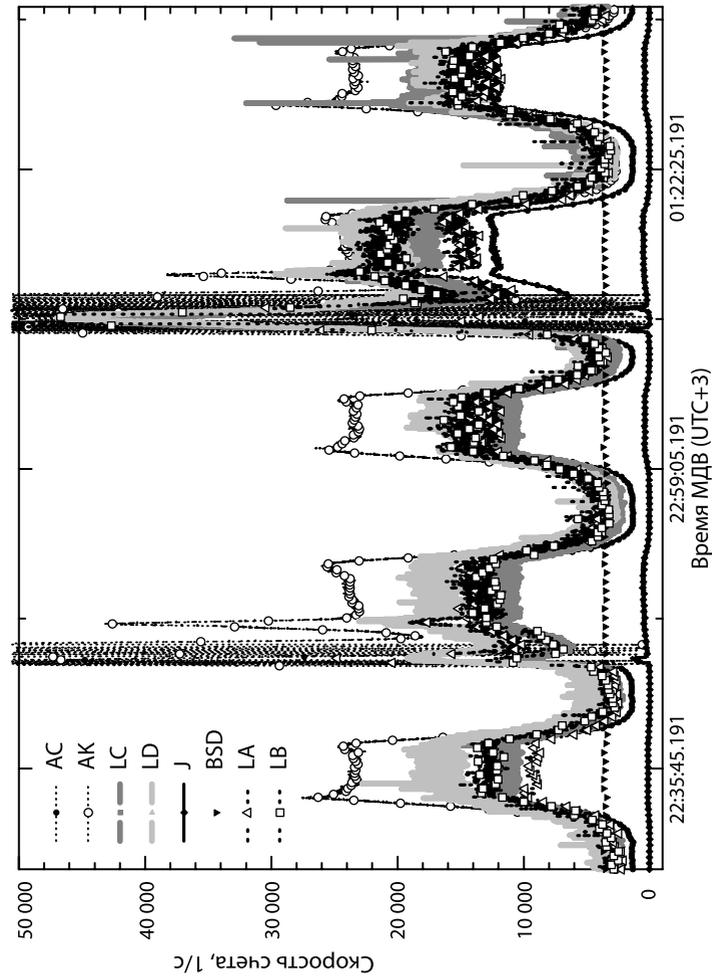


Рис. 11 Показания интенсиметров прибора «НАТАЛЬЯ-2М», снятые 25.03.2009 г. при прохождении КА Южно-Атлантической Аномалии

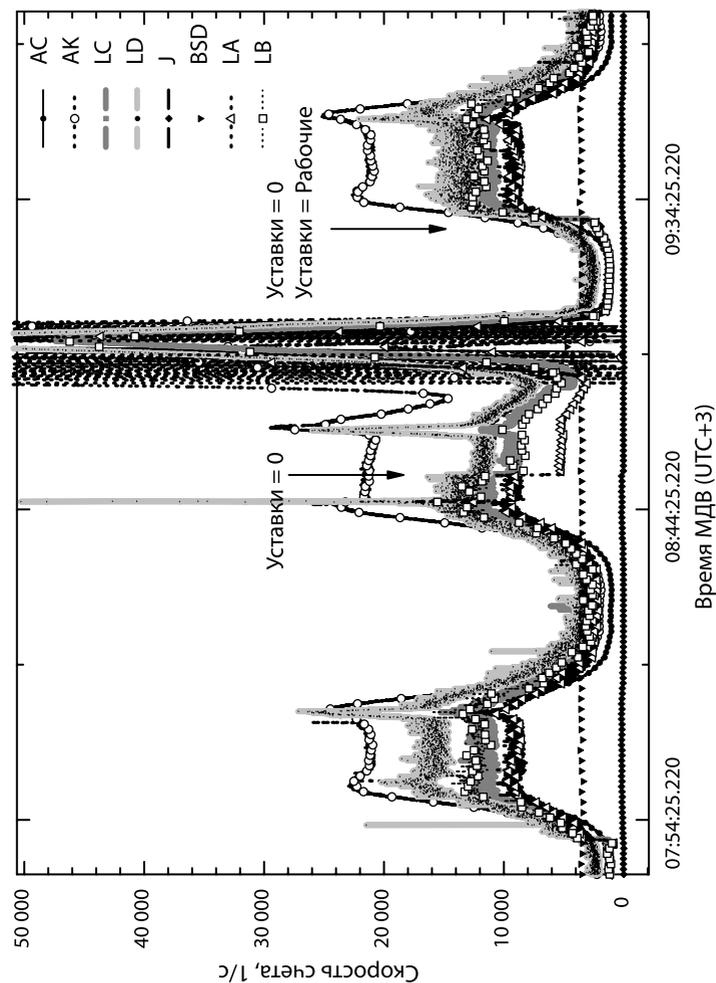


Рис. 12. Показания интениметров прибора «НАТАЛЬЯ-2М», снятые 18.04.2009 г., демонстрирующие восстановление работы системы стабилизации детекторов

Фоновые спектры, измеренные прибором «НАТАЛЬЯ-2М»

В течение всего полета прибором «НАТАЛЬЯ-2М» проводились постоянные измерения фоновых спектров во всех энергетических каналах.

На рис. 13 представлен типичный фоновый спектр, набранный в R3-канале, регистрирующем гамма-кванты с энергиями 0,2...2 МэВ. На спектре хорошо видны особенности в области энергий 410, 480 и 680 кэВ, которые являются результатом активации цезия и йода, входящих в состав кристаллов сцинтилляционных детекторов CsI(Tl) прибора «НАТАЛЬЯ-2М». Кроме того, на спектре слабо видна особенность в области 1,46 МэВ, вклад в которую вносят излучение изотопа К-40 и активационные линии элементов Al, Fe и Ni, входящих в состав конструкций КА.

На рис. 14 изображен фоновый спектр, зарегистрированный в энергетическом канале L (1...18 МэВ). Как и в канале R3, на спектре видна линия излучения изотопа К-40 с энергией 1,46 МэВ. Кроме того, на спектре хорошо видна особенность с энергией 6,1 МэВ, которая является результатом активации цезия и йода, и слабо проявляется линия с энергией 8,7 МэВ как результат активации Ni.

Зарегистрированные в энергетических каналах R и L фоновые линии с энергиями 680 кэВ, 1,46 и 6,1 МэВ могут использоваться для дальнейшей полетной калибровки и контроля деградации детекторов, формирующих эти энергетические каналы.

На рис. 15 и 16 представлены фоновые спектры, набранные в энергетических каналах M (7...250 МэВ) и H (50...1600 МэВ), регистрирующих гамма-кванты средних и высоких энергий. Спектры в M- и H-каналах демонстрируют спад фона по степенному закону без особенностей в виде гамма-линий.

Примеры событий, зарегистрированных прибором «НАТАЛЬЯ-2М»

С момента включения прибора 20.02.09 г. по 30.06.09 г. сильные солнечные вспышки отсутствовали. По показаниям прибора «Пингвин-М», входящего в состав КНА «ФОТОН», наблюдалось более двадцати вспышек в мягком рентгеновском диапазоне (2...20 кэВ). Порог регистрации гамма-излучения

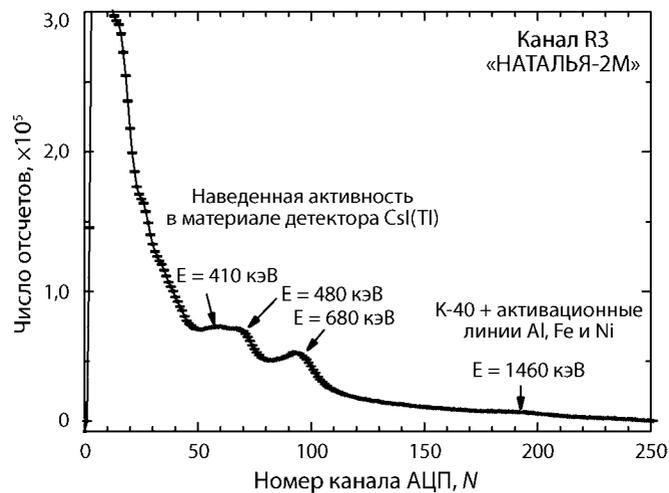


Рис. 13. Спектр в энергетическом канале R3 (0,2...2 МэВ) прибора «НАТАЛЬЯ-2М», набранный 23.06.2009 г. за 280 мин

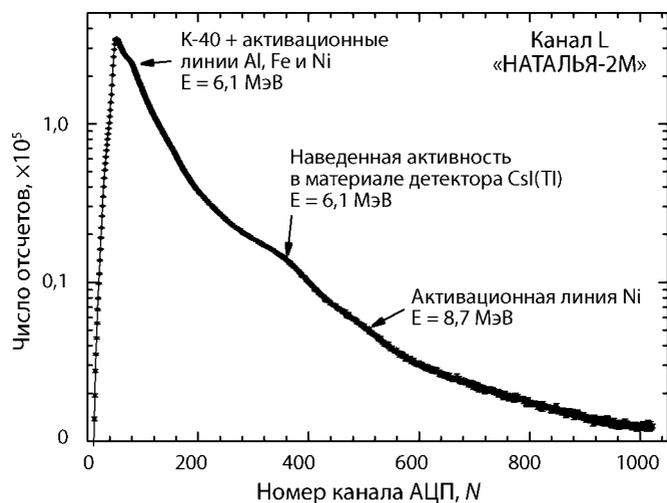


Рис. 14. Спектр в энергетическом канале L (1...18 МэВ) прибора «НАТАЛЬЯ-2М», набранный 23.06.2009 г. за 280 мин

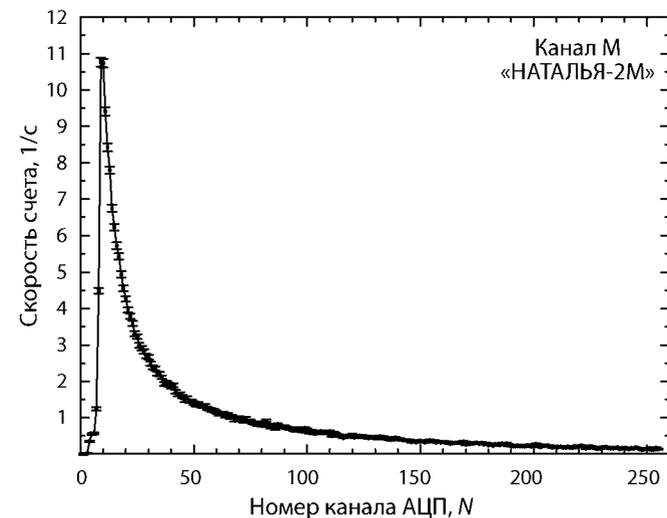


Рис. 15. Спектр в энергетическом канале M (7...250 МэВ) прибора «НАТАЛЬЯ-2М», набранный 23.06.2009 г. за 12 мин

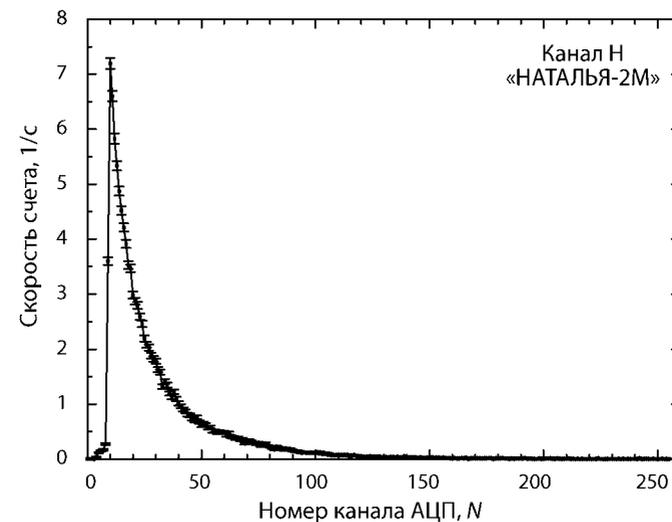


Рис. 16. Спектр в энергетическом канале H (50...1600 МэВ) прибора «НАТАЛЬЯ-2М», набранный 23.06.2009 г. за 12 мин

прибора «НАТАЛЬЯ-2М» составляет примерно 200 кэВ, поэтому такие солнечные события не могли быть зарегистрированы детекторами прибора «НАТАЛЬЯ-2М».

В процессе проведения наблюдений прибором «НАТАЛЬЯ-2М» были зарегистрированы несколько событий типа «гамма-всплеск». Для идентификации этих событий в качестве гамма-всплеска привлекались данные других приборов КНА «ФОТОН» и других космических аппаратов.

На рис. 17 и 18 приведены примеры регистрации гамма-всплесков GRB090408 и GRB090618 прибором «НАТАЛЬЯ-2М» (по показаниям интенсиметров).

8 апреля 2009 г. в 19 ч 46 мин 42 с УТ прибором «НАТАЛЬЯ-2М» был зарегистрирован гамма-всплеск GRB090408, временной профиль которого приведен на рис. 17. Виден рост темпа счета событий в энергетических каналах LA и LB спектрометра CE-1М и LC, LD спектрометра CE-2М, а также в детекторах антисовпадений АК, АС. Гамма-всплеск длился около 8 с, энергия гамма-излучения не превышала 2500 кэВ. Это событие также было зарегистрировано прибором «КОНУС-РФ», входящим в состав КНА «ФОТОН».

18 июня 2009 г. в 8 ч 28 мин 27 с УТ был зарегистрирован яркий и длительный гамма-всплеск GRB090618, временной профиль которого приведен на рис. 18, на котором виден рост темпа счета событий в энергетических каналах R и LA спектрометра CE-1М и в детекторах антисовпадений АК, АС. Гамма-всплеск длился более 100 с, энергия гамма-излучения не превышала нескольких мегаэлектронвольт. Это интересное событие подтверждено данными с КА AGILE, Fermi GBM, INTEGRAL, SWIFT и прибором «КОНУС-РФ» КА «КОРОНАС-ФОТОН».

Полученные данные свидетельствуют о том, что прибор находился в рабочем состоянии и готов к выполнению программы научного эксперимента. За истекший с момента запуска период были выполнены работы по точной настройке характеристик детекторов спектрометров CE-1М и CE-2М, полетная настройка прибора «НАТАЛЬЯ-2М» была осуществлена с точностью порядка 1...2 % по отношению к наземным калибровочным значениям.

В ходе проведения исследований жесткого электромагнитного излучения солнечных вспышек и космических гамма-всплесков в энергетическом диапазоне 0,2...18 МэВ (в R- и

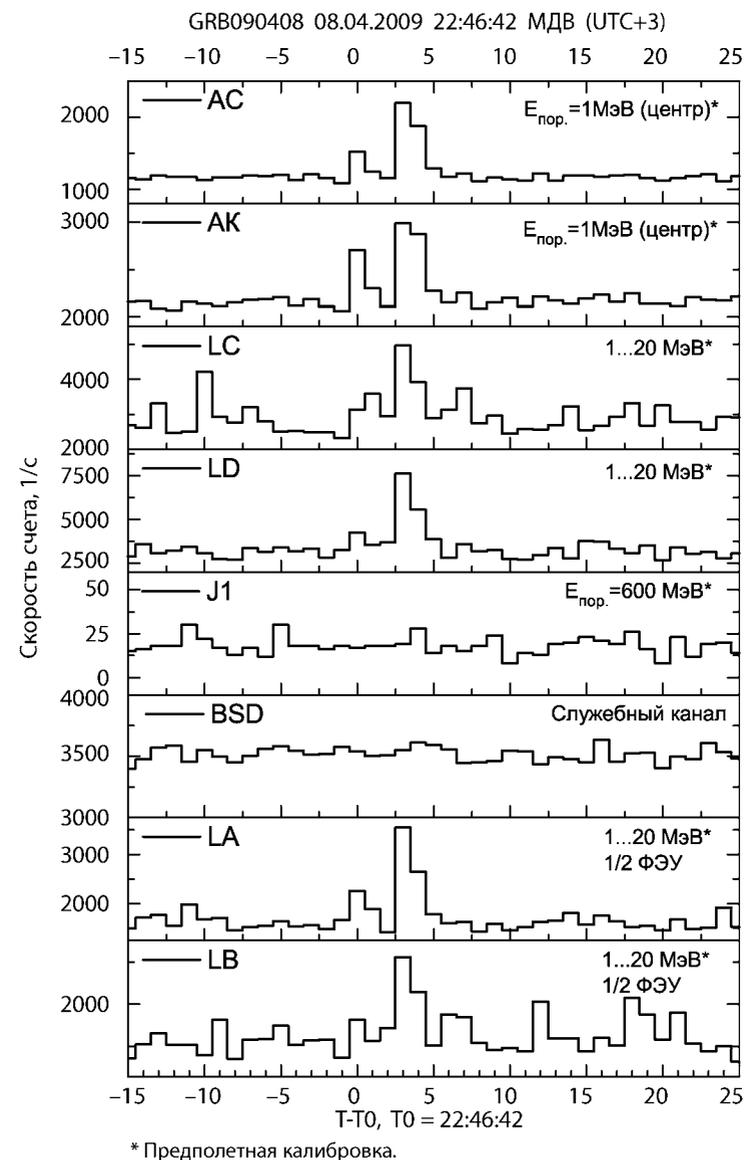


Рис. 17. Гамма-всплеск GRB090408, 08.04.2009 г.

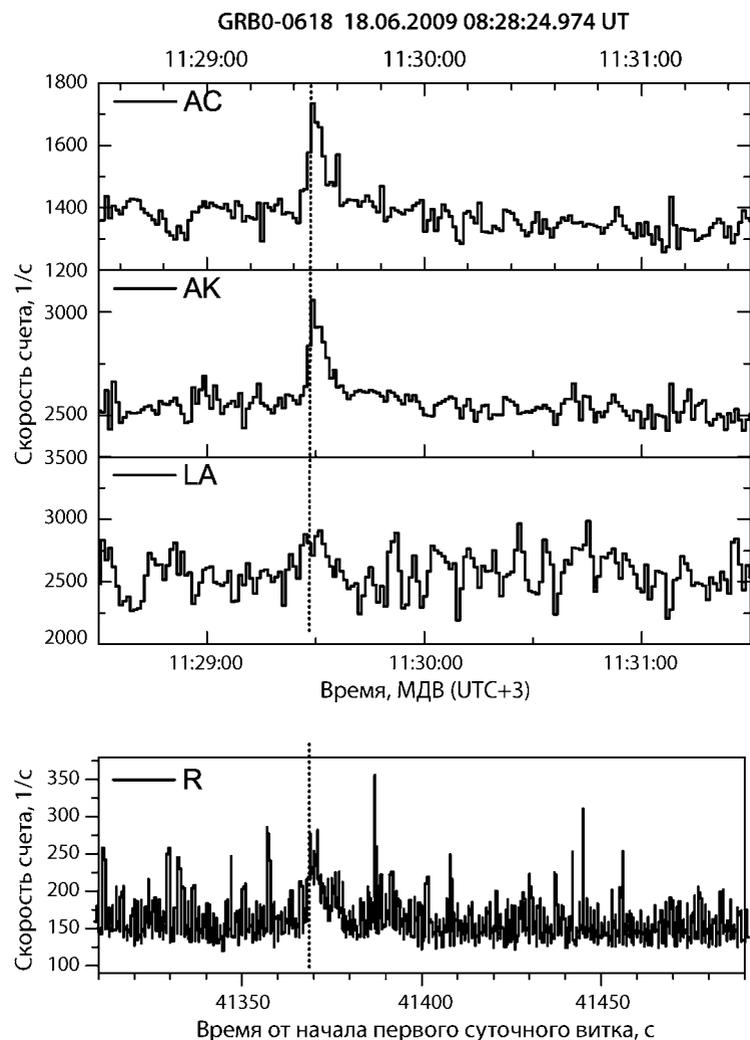


Рис. 18. Гамма-всплеск GRB090618, 18.06.2009 г.

L-каналах) прибором «НАТАЛЬЯ-2М» было зарегистрировано несколько событий типа гамма-всплеск.

Программа научных исследований прибором «НАТАЛЬЯ-2М» выполнялась успешно.

Литература

Космический комплекс «КОРОНАС-ФОТОН»: Справочные материалы. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008.

Kotov Yu. D., Samoilenko V. T., Arkhangelsky A. I., Yurov V. N., Rubtsov I. V., Shubin S. A. A γ -Ray Spectrometer in an Energy Range of 0,3–2000 MeV for the Satellite Experiment «Photon» // Instruments and Experimental Techniques. 1999. V. 42. N. 5. P. 608–613.

HIGH-ENERGY SPECTROMETER NATALYA-2M. IN-FLIGHT CALIBRATION AND ADJUSTMENT RESULTS. FIRST SCIENTIFIC DATA

A. I. Arkhangelsky, M. V. Bessonov, A. S. Buslov, K. F. Vlasik,
A. S. Glyanenko, V. V. Kadinin, Yu. D. Kotov, E. E. Lupar,
I. V. Rubtsov, V. T. Samoilenko, V. N. Yurov

Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 —
National Research Nuclear University “MEPhI” (NRNU MEPhI)),
Astrophysics Institute MEPhI, Moscow

In submitted paper the concise description of structure and observational capabilities of a high-energy radiation spectrometer NATALYA-2M is described. NATALYA-2M is a part of scientific instrumentation complex PHOTON of CORONAS-PHOTON satellite. Gamma-ray spectrometer have wide energy range of 0,3...2000 MeV and based on CsI(Tl) single crystals with total area of 32×38 cm and 18 cm thickness.

Instrument in-flight adjustment and calibration results, background temporal profiles and spectra for all energy bands of a spectrometer, examples of GRB registration are presented.

The space vehicle CORONAS-PHOTON with the scientific equipment, intended mainly for complex observation of the Sun, was launched from cosmodrome Plesetsk on 30 January 2009 into a low-Earth low-eccentricity, high-inclination orbit (altitude about 550 km, inclination 82,5 deg).

Keywords: CORONAS-PHOTON, Solar physics, NATALYA-2M, gamma-spectrometer, in-flight calibration, gamma-spectra, temporal profiles, gamma-ray bursts (GRB).

Arkhangelsky **Andrey Igorevich** — Scientist. E-mail: angel1966@list.ru.
Bessonov **Mikhail Vladimirovich** — Engineer. E-mail: mvbessonov@gmail.com.

Buslov **Anton Sergeevich** — Engineer. E-mail: ASBuslov@mephi.ru.
Vlasik **Konstantin Fedorovich** — Leading engineer. Ph. D. E-mail: KfV6490@mail.ru.

Glyanenko Alexander Stepanovich — Head of the group, Ph. D. E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Kadilin Vladimir Valerevich — Senior scientist, Ph. D.

Kotov Yury Dmitrievich — Director of the Astrophysics Institute MEPHI, Ph. D. E-mail: kotov@mephi.ru.

Lupar Evgeny Eduardovich — Engineer. E-mail: EELupar@mephi.ru.

Rubtsov Igor Vasilevich — Leading engineer. E-mail: IVRubtsov@mephi.ru.

Samoilenko Vladimir Timofeevich (Senior scientist.)

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy director of the Astrophysics Institute MEPHI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

**ПРИБОР «ПИНГВИН-М», ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЖЁСТКОГО
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА
В КОСМИЧЕСКОМ ПРОЕКТЕ «КОРОНАС-ФОТОН»**

**В. А. Дергачев¹, Г. А. Матвеев¹, Е. М. Круглов¹, В. П. Лазутков¹,
М. И. Савченко¹, Д. В. Скородумов¹, А. Г. Пятигорский¹,
Г. А. Пятигорский¹, Ю. А. Чичикалок¹, И. И. Шишов¹,
В. В. Хмылко¹, Г. И. Васильев¹, В. А. Драневич¹, С. Ю. Крутьков¹,
С. В. Степанов¹, Ю. Д. Котов², В. Н. Юров², А. С. Гляненок²,
А. И. Архангельский², Ю. А. Горелый², И. В. Рубцов²**

¹ Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А. Ф. Иоффе), Санкт-Петербург

² Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)), Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва

Приведены основные характеристики и описаны принципы работы научной аппаратуры «ПИНГВИН-М», предназначенной для измерения степени линейной поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек в энергетическом диапазоне 20...150 кэВ и энергетических спектров рентгеновского излучения солнечных вспышек в диапазоне энергий 2...500 кэВ.

Измерение степени поляризации основано на регистрации совпадения импульсов в активном рассеивателе и в детекторах рассеянного излучения.

Прибор имеет модульную структуру и состоит из двух блоков: блока детекторов «ПИНГВИН-МД» (ПМД) и блока электроники «ПИНГВИН-МЭ» (ПМЭ).

Ключевые слова: солнечные вспышки, рентгеновское излучение, поляризация, космический эксперимент, детектор-рассеиватель, сцинтиллятор, пропорциональный счетчик, «фосвич», спектр, паратерфенил, научная аппаратура, активная защита, активный рассеиватель, «ПИНГВИН-М», «КОРОНАС-ФОТОН».

Дергачев Валентин Андреевич — заместитель директора, д-р физ.-мат. наук. E-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru.

Матвеев Геннадий Александрович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: genadiy.matveev@mail.ioffe.ru.

Круглов Евгений Михайлович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук.

Лазутков Вадим Петрович — научный сотрудник. E-mail: vadim.lazutkov@mail.ioffe.ru.

Савченко Михаил Иванович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: mikhail.savchenko@mail.ioffe.ru.

Скородумов Дмитрий Всеволодович — научный сотрудник. E-mail: dmitri.skorodumov@mail.ioffe.ru.

Пятигорский Алексей Григорьевич — ведущий инженер. E-mail: alxp@bk.ru.

Пятигорский Григорий Александрович — ведущий электроник. E-mail: pga.crlab@mail.ioffe.ru.

Чичикалюк Юрий Анатольевич — ведущий электроник.

Шишов Игорь Игоревич — электроник 1-й категории.

Хмылко Владислав Викентьевич — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: vlad_fti@mail.ru.

Васильев Геннадий Иванович — старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук. E-mail: gennady.vasilyev@pop.ioffe.rssi.ru.

Драневич Вячеслав Адамович — ведущий электроник.

Крутьков Сергей Юрьевич — научный сотрудник. E-mail: gennady.vasilyev@pop.ioffe.rssi.ru.

Степанов Сергей Васильевич — научный сотрудник.

Котов Юрий Дмитриевич — директор ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: kotov@mephi.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Гляненько Александр Степанович — заведующий научно-исследовательским сектором, канд. физ.-мат. наук. E-mail: asgl2005@gambler.ru.

Архангельский Андрей Игоревич — научный сотрудник. E-mail: angel1966@list.ru.

Горельный Юрий А. — инженер.

Рубцов Игорь В. — инженер. E-mail: IVRubtsov@mephi.ru.

Исследование космического рентгеновского излучения в области энергий от 1 до 150 кэВ является весьма актуальным, поскольку данные об энергетических спектрах, поляризации и интенсивности космического рентгеновского излучения несут уникальную информацию о природе физических процессов в источниках излучения. Особое место в исследованиях занимает направление, связанное с измерением линейной поляризации рентгеновского космического излучения от астрофизических объектов (*Novick*, 1975) и солнечных вспышек.

Для измерения степени линейной поляризации можно использовать зависимость от направления электрического вектора первичного кванта преимущественного направления вылета фотоэлектронов при поглощении квантов или преимущественного направления вылета рассеянных квантов при их рассеянии.

Второй метод технически использовать гораздо проще (учитывая сильное рассеяние электронов), поэтому эксперименты

по измерению степени линейной поляризации рентгеновского излучения от космических объектов использовали этот эффект. Поляриметр, основанный на этом эффекте, состоит из рассеивателя и детекторов, измеряющих степень анизотропии поля рассеянных квантов.

При измерении степени линейной поляризации от стационарных источников достаточно, в принципе, рассеивателя и одного детектора рассеянного излучения. При этом если ось прибора направить на источник и закрутить его вокруг этой оси, то в детекторе рассеянного излучения будет наблюдаться модулированный сигнал, величина модуляции которого и фаза содержат информацию о степени и направлении поляризации падающего излучения. Наблюдая стационарный источник достаточно длительный период времени, можно получать модуляционную кривую с хорошей статистикой методом наложения эпох.

При измерении же степени линейной поляризации такого сильно нестационарного источника как солнечная вспышка подобная схема эксперимента впрямую не проходит. Поэтому солнечный поляриметр должен состоять из рассеивателя и ряда детекторов (минимум трех), измеряющих асимметрию поля рассеянных квантов в каждый момент времени. При этом возникают трудности, связанные, например, с возможностью дрейфа параметров различных измерительных каналов, что может привести к различию в скоростях счета в этих каналах и появлению ложной поляризации.

Измерения параметров линейной поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек проводилось в ряде экспериментов (*Tindo et al.*, 1970; *Богомолов* и др., 2003), но до сих пор существует явный дефицит достоверных результатов в этой области.

Работы по исследованию и разработке методов измерения линейной поляризации в жесткой области спектра были начаты в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН в конце 1970-х гг. Был предложен метод измерения линейной поляризации, основанный на комптоновском рассеянии падающего излучения в активном рассеивателе (органический скинтиллятор) с регистрацией совпадения импульсов от электронов отдачи и от рассеянных фотонов. Энергия электронов отдачи преобразуется в световые импульсы, регистрируемые фотоэлектронным умножителем (ФЭУ)

активного рассеивателя, а рассеянные фотоны собираются детекторами-фосвичами, расположенными вокруг рассеивателя. Это позволяет резко снизить фон, повысить чувствительность и надёжность измерений.

В 1986–1989 гг. на основе предложенного метода был создан комплекс научной аппаратуры для проведения экспериментов на высотных аэростатах. В 1989 и 1990 гг. состоялось два полёта, в ходе которых проведены измерения фона рентгеновского излучения и подтверждена принципиальная работоспособность созданной модели поляриметра. С 1993 г. началась подготовка совместного с МИФИ эксперимента по исследованию поляризации жёсткого рентгеновского излучения солнечных вспышек прибором «ПИНГВИН» (Kotov et al., 2001). Под названием «ПИНГВИН-М» прибор был включён в международный научный проект «КОРОНАС-ФОТОН», в котором МИФИ является головной организацией. В ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН был создан блок детекторов «ПИНГВИН-МД» (ПМД), в МИФИ — блок электроники «ПИНГВИН-МЭ» (ПМЭ).

Научные задачи эксперимента и устройство физической части прибора

Физическая схема, состав и характеристики прибора «ПИНГВИН-М» позволяют решать следующие научные задачи в области исследования характеристик рентгеновского излучения солнечных вспышек:

- измерять степень линейной поляризации жёсткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 20...150 кэВ;
- исследовать спектры жёсткого рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий 20...500 кэВ;
- исследовать спектры мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 2...20 кэВ, в том числе в слабых («тепловых») вспышках и на предвспышечной стадии.

Измерение степени линейной поляризации жёсткого рентгеновского излучения в научной аппаратуре (НА) «ПИНГВИН-М» основано на зависимости от поляризации преимущественного направления комптоновского рассеяния падающих на активный рассеиватель (детекторы на основе кристаллов паратерфенила) γ -квантов и регистрации двойных совпадений импульсов

от рассеивателя (электрон отдачи) и от детекторов рассеянного излучения (фотопоглощение рассеянного фотона).

Степень линейной поляризации жёсткого рентгеновского излучения солнечных вспышек даёт уникальную информацию об угловом распределении энергичных электронов, генерирующих это излучение. Данные об анизотропии энергичных электронов могут оказаться решающими для выбора механизма трансформации энергии магнитного поля в другие формы энергии, что составляет основную проблему теории солнечных вспышек. Исследование спектрального состава жёсткого рентгеновского излучения с учётом степени поляризации позволит конкретизировать механизм ускорения заряженных частиц. Изучение временных изменений параметров мягкого рентгеновского излучения методами спектрального анализа позволяет выявить особенности динамики процессов энерговыделения и их периодичность. Изучение процессов энерговыделения в слабых вспышках, происходящих достаточно часто в любой период солнечного цикла, позволит учесть их вклад в нагрев атмосферы Солнца.

В состав детекторной части НА «ПИНГВИН-М» (рис. 1) входят пять основных элементов:

1. *Верхний защитный детектор*, представляет собой диск из сцинтилляционного полистирола с площадкой, к которой снизу приклеен ФЭУ; площадка с ФЭУ выступают за сборку детекторов.

2. *Детектор-рассеиватель жёсткого рентгеновского излучения*, состоящий из четырех кристаллов паратерфенила (диски диаметром 50 мм и толщиной 30 мм) с приклеенными к ним снизу фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). На ФЭУ закреплены платы делителей напряжения (ДН), предусилителей (ПУ) и источников высоковольтного питания (ИВП). Эти элементы на схеме блока детекторов не показаны. Сборки ФЭУ идентичны для всех 13 сцинтилляционных детекторов блока, и поэтому далее будет указываться только ФЭУ.

3. *Шесть детекторов рассеянного и прямого жёсткого рентгеновского излучения*, собранных в правильный шестигранник, устанавливаемый вокруг рассеивателя. Каждый из детекторов содержит кристалл NaI(Tl) (диск диаметром 70 мм и толщиной 5 мм), защиту от фона заряженных частиц по схеме «фосвич» и сборку ФЭУ.

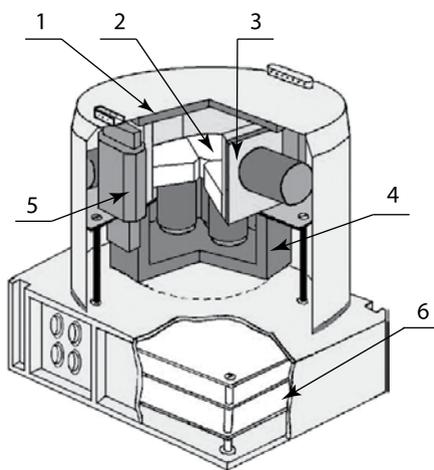


Рис. 1. Конструкция детекторного блока НА «ПИНГВИН-М»: 1 — верхний защитный детектор (полистирол + ФЭУ); 2 — детекторы-рассеиватели (паратерфенил + ФЭУ); 3 — детекторы рассеянного и прямого жесткого рентгеновского излучения («фосвичи» NaI + полистирол + ФЭУ); 4 — нижний защитный детектор (полистирол + ФЭУ); 5 — детекторы мягкого рентгеновского излучения (пропорциональные счетчики); 6 — платы цифровой электроники

Таблица 1

Детектор	Материал	Кол-во в приборе	Размеры	Полетная калибровка	Стабилизация
Детектор рассеянного излучения (детектор-«фосвич», ДФ)	Кристаллы NaI(Tl), полистирол	6	Диаметр 67 мм, толщина 5 мм	^{133}Ba 30, 80 кэВ	Светодиод
Детектор-рассеиватель (ДР)	Кристаллы паратерфенила	4	Диаметр 50мм, толщина 30мм	^{133}Ba 30 кэВ	Светодиод
Детектор мягкого рентгеновского излучения (РД)	Рабочий газ — ксенон 1атм.; входное окно — бериллий (0,1 мм)	2 (по 4 секции)	$S = 1,5 \text{ см}^2$	^{55}Fe 5,9 кэВ	Калибровочная секция

4. *Нижний защитный детектор в виде стакана из пластического сцинтиллятора*, охватывает сборку детекторов снизу и по боковой поверхности. Детектор «просматривается» двумя ФЭУ, приклеенными на диаметрально расположенных площадках цилиндрической поверхности стакана.

5. *Две сборки детекторов мягкого рентгеновского излучения*, имеют каждая в своем составе: пропорциональные счётчики, разработанные и изготовленные в Лаборатории космических лучей ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН; предусилители ПУ; источники высоковольтного питания ИВП и блоки аналого-цифровой обработки сигналов.

Характеристики физических детекторов НА «ПИНГВИН-М» приведены в табл. 1.

Пропорциональные счётчики обладают высокой чувствительностью, что позволяет исследовать мягкое рентгеновское излучение даже в слабых вспышках и в рентгеновских предвестниках вспышек.

Детекторная часть поляриметра состоит из четырех рассеивателей (ДР) и шести детекторов рассеянного излучения (ДФ). Сигналы с каждого из детекторов регистрируются отдельно. Таким образом, при регистрации двойных совпадений получается двадцать четыре отдельных канала (четыре рассеивателя на шесть «фосвичей»).

В каждом рассеивателе измеряется энергия комптоновских электронов в четырёх энергетических каналах, в «фосвичах» — энергия рассеянных квантов в пяти энергетических каналах. Поэтому события, состоящие в совпадении сигналов с этих пар детекторов, имеют два индекса: первый — энергия комптоновского электрона (четыре значения), второй — энергия рассеянного кванта (пять значений). Все эти события аккумулируются в двумерную матрицу размером 4×5 .

Таким образом, поляризационная информация состоит из 24 матриц (совпадения каждого ДР с каждым ДФ) размером 5×4 . Эта информация имеет значительную избыточность, что существенно повышает достоверность и надежность измерений поляризации. Физическую часть НА можно представить как четыре отдельных, различно ориентированных поляриметра (по числу рассеивателей), что позволяет, при совместном анализе информации, отделить приборные эффекты от физических.

Характеристика информации, снимаемой с детекторов НА «ПИНГВИН-М», приведена в табл. 2.

Таблица 2

Детектор	Поляризационные измерения		Прямое излучение		Временное разрешение, с	
	диапазон энергий, кэВ	кол-во каналов	диапазон энергий, кэВ	кол-во каналов	«Патруль»	«Всплеск»
ДФ	17,8...160	5	17,8...453	40	120	10
ДР	0,66...43	4	0,66...43	16	120	10
РД	—	—	2...20	13	10	10

Электронные узлы НА «ПИНГВИН-М»

Блок детекторов «ПИНГВИН-МД» обеспечивает выполнение следующих задач:

- сбор данных с тринадцати сцинтилляционных детекторов и двух пропорциональных счетчиков;
- организация системы автостабилизации энергетической шкалы прибора по реперным сигналам светодиодов и радиоактивным источникам (с возможностью коррекции параметров стабилизации по командам);
- активная защита от фона заряженных частиц и фона неполяризованного излучения (для поляриметра);
- полётная калибровка детекторов;
- сортировка, первичная обработка и хранение одного кадра данных;
- передача данных в блок ПМЭ по сигналам запроса в соответствии с протоколом обмена между ПМД и ПМЭ;
- прием и выполнение управляющих кодовых слов-команд управления от блока ПМЭ по шине SPI в соответствии с протоколом обмена по последовательному каналу;
- прием двух команд переключения комплектов электроники по разовым импульсным командам (РК), передаваемым по радиоканалу;
- выработка сигнала о выделении факта солнечной вспышки («Всплеск») по заданным критериям (с воз-

можностью изменения критериев по командам) и передача его в блок ПМЭ.

Электронные узлы блока ПМД можно разделить на три основные функциональные группы. Это узлы аналоговой электроники ФЭУ, платы цифровой электроники приборного отсека и узлы электроники рентгеновских детекторов.

Функциональная схема блока ПМД приведена на рис. 2.

Для повышения надежности системы используется резервирование комплектов цифровой электроники, размещенных в приборном отсеке блока ПМД (рис. 1, п. 6). Применяется также резервирование элементов аналоговой электроники: блоков предусилителей и регулируемых источников высокого напряжения для каждого из тринадцати ФЭУ в детекторном отсеке блока ПМД. Комплекты цифровой электроники переключаются разовыми импульсными командами с Земли. Переключение основных и резервных комплектов аналоговой электроники производится передачей команд через последовательный канал SPI. Причем, переключение любого узла в любом детекторе независимое.

Узлы аналоговой электроники каждого из тринадцати ФЭУ включают:

- плату делителей напряжения ФЭУ;
- плату регулируемых источников высоковольтного питания (ИВП);
- блок предусилителей.

Предусилители четырех ФЭУ детекторов-рассеивателей конструктивно объединены в две печатные платы. Для остальных ФЭУ каждый предусилитель размещен на собственной печатной плате.

К каждому ФЭУ через оптический световод подведен реперный сигнал от калибровочного светодиода. Исходя из конструктивных особенностей ПМД, для калибровки энергетической шкалы используются три светодиода на три разные группы детекторов: это сборка детекторов-фосwichей (ДФ) с верхним охранным детектором, сборка детекторов-рассеивателей (ДР) и нижний охранный детектор. Для каждого светодиода имеется свой генератор импульсов (ГИС), который обеспечивает стабильный световой выход во всем рабочем диапазоне изменения температур и питающих напряжений.

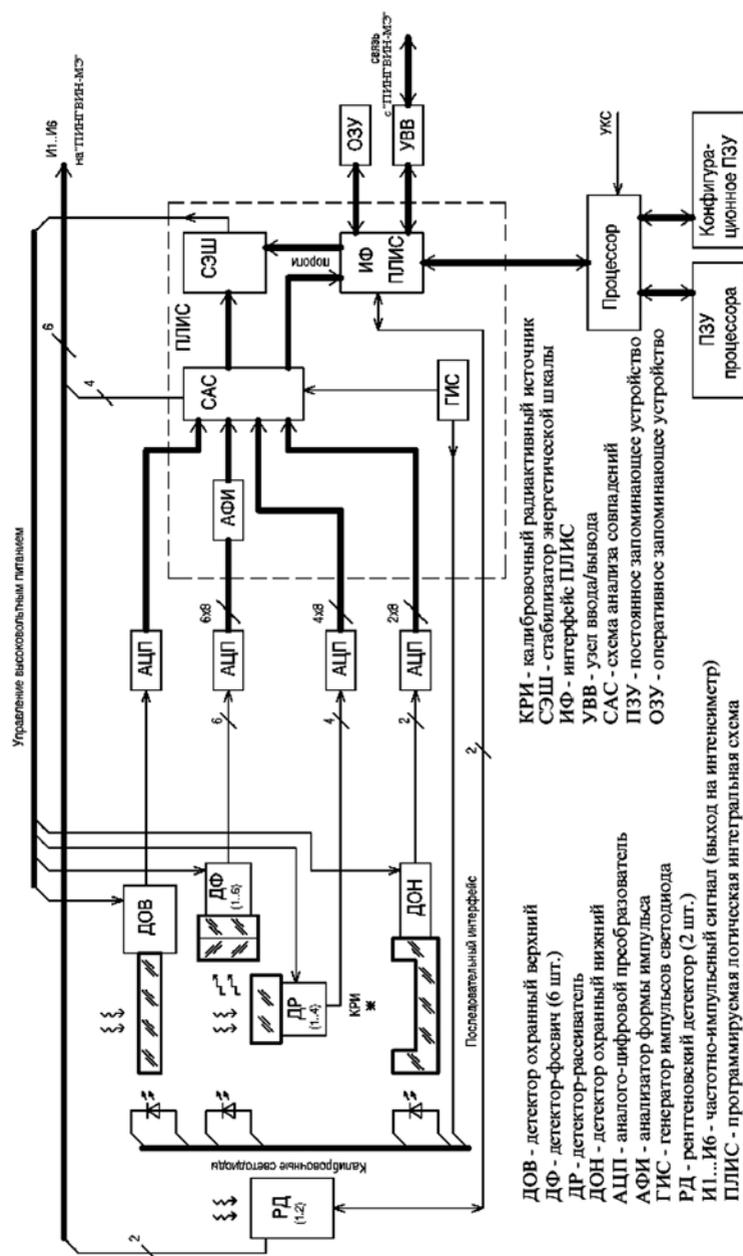


Рис. 2.

Все преусилители, ИВП и светодиоды с ГИС задублированы.

Переключение комплектов для каждого ФЭУ произвольное и независимое.

Плата электроники содержит следующие функциональные узлы:

- 13 АЦП сцинтилляционных каналов;
- 2 программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС);
- 13 импульсных регуляторов для управления напряжением источников высоковольтного питания ФЭУ;
- процессор (CPU);
- внешнее (по отношению к ПЛИС и процессору) ОЗУ;
- ПЗУ программ процессора;
- буферные элементы интерфейса с внешними устройствами;
- стабилизаторы напряжения.

На ПЛИС платы цифровой электроники переносятся задачи одновременного параллельного приема, сортировки и первичной обработки поступающих от тринадцати АЦП цифровых массивов информации.

Функции ПЛИС1 (PLD1):

- вырабатывает синхрочастоту 20 МГц для АЦП, осуществляет обнаружение импульсов в потоке данных с АЦП частотой 20 МГц, измерение их амплитуд;
- анализирует случаи совпадений импульсов с разных детекторов и вырабатывает необходимые сигналы для регистрации амплитудных спектров;
- осуществляет автоподстройку сцинтилляционных детекторов по сигналам светодиодов, вырабатывая широтно-модулированные сигналы для управления источниками высоковольтного питания (ИВП) и замыкая тем самым внутренние (с использованием светодиодов) контуры системы автостабилизации для каждого детектора;
- формирует тактовые сигналы («Меандр1» и «Меандр2») возбуждения ИВП и синхросигнал для генераторов импульсов светодиодов.

Данные об амплитудах импульсов, подлежащих регистрации, передаются в ПЛИС2 по шине межматричной связи.

Функции ПЛИС2 (PLD2):

- осуществляет обмен данными с процессором и внешним ОЗУ, обеспечивает накопление в ОЗУ амплитудных спектров и доступ к ним процессора;
- вырабатывает для процессора синхрочастоты 20 МГц и 1 Гц;
- обеспечивает выдачу телеметрических данных в блок «ПИНГВИН-МЭ», реализуя установленный протокол обмена информацией с блоком ПМЭ; передача информации осуществляется восьмиразрядным параллельным кодом;
- принимает сигналы управления из блока ПМЭ; прием последовательного управляющего 16-разрядного кода производится по магистрали SPI.

ПЛИС2 передает команды, принимает и хранит данные от рентгеновских детекторов РД.

В ПЛИС2 имеется аппаратный преобразователь («нормализатор»), выполняющий приведение исходных 3-байтовых данных к стандартному виду. Результат имеет длину 2 байта, из которых старшие 5 разрядов представляют порядок, а остальные 11 разрядов — мантиссу. Скрытый разряд из мантиссы удалён.

Прибор имеет несколько режимов работы: непрерывных наблюдений с низкой информативностью («Патруль») и режим с повышенной информативностью («Всплеск»). Переход в режим «Всплеск» осуществляется блоком ПМЭ после выработки сигнала «Всплеск».

Электронные узлы цифровой электроники размещаются в приборном отсеке блока ПМД и обеспечивают, по запросу блока ПМЭ, пакетную передачу накопленной информации в блок ПМЭ. Пакеты объёмом 101 байт передаются 1 раз в 10 с как в режиме «Патруль», так и в режиме «Всплеск». Эти пакеты содержат амплитудные спектры с трёх секций включённого рентгеновского детектора (РД), а также техническую информацию. Пакеты в 3064 байта накапливаются за период 120 с в режиме «Патруль» и за 10 с в режиме «Всплеск». Эти пакеты содержат всю поляризационную, спектральную и вспомогательную ин-

формацию со сцинтилляционных детекторов блока. Частота сигналов синхронизации обмена составляет 10...100 кГц, скважность импульсов синхронизации $2 \pm 0,2$.

Кроме того, из блока ПМД на шесть интенсиметров ПМЭ постоянно передаются суммарные скорости счёта с трех противоположных пар ДФ, интегральные скорости счёта импульсов в охранных детекторах и интегральные скорости счёта в двух секциях рентгеновского детектора РД.

Процессор платы цифровой электроники блока ПМД выполняет следующие основные функции:

- осуществляет первичное накопление данных для разных периодов считывания;
- формирует данные для вывода в телеметрию;
- анализирует поступающие команды и сигналы управления и производит необходимые управляющие воздействия;
- заносит и хранит необходимые параметры в энергонезависимом ПЗУ;
- производит анализ текущей информации с детекторов с целью обнаружения вспышек и вырабатывает сигнал «Всплеск».

С ПЛИС2 на процессор идут два сигнала прерывания:

- /INT0 — о приходе (с блока «ПИНГВИН-МЭ») сигналов N1 или N2;
- /INT1 — метки времени с периодом 1,005 с, отсчитываемые от начала последнего сигнала N1.

Внешнее ОЗУ используется для накопления амплитудных спектров и данных, подлежащих выводу в телеметрию. Логика отбора формирует амплитудные спектры трёх типов, для которых отводятся отдельные области памяти.

В качестве аналитической памяти ОЗУ предстаёт как набор 16-разрядных счётчиков. В результате регистрации одного события (под событием подразумевается появление импульсов в одном или нескольких детекторах) к содержимому одного или нескольких счётчиков добавляется единица.

Для накопления спектров ОЗУ разделяется на два банка. Пока в одном банке формируются спектры, данные из другого можно без помех считывать. Номером банка является старший разряд адреса, связанный с разрядом [0] регистра управления.

Процессор может обращаться к обоим банкам, для чего необходимо программное изменение номера доступного банка в соответствующем разряде регистра управления.

Формирование данных телеметрии происходит исключительно путём записи данных процессором в необходимые адреса ОЗУ. Выдача данных на шину телеметрии производится ПЛИС побайтно без участия процессора.

Для процессора ОЗУ разбито на 8 страниц по 32 Кбайтов, доступных для чтения и записи. В случае обращения к 16-рядным ячейкам (словам) анализаторной памяти младший байт слова имеет чётный адрес, а следующий за ним нечётный адрес указывает на старший байт.

Алгоритм управления ОЗУ, реализованный в ПЛИС2, обеспечивает полностью независимое обращение к ОЗУ как со стороны процессора, так и по запросу ПЛИС.

Все каналы анализаторной памяти имеют блокировку счёта по достижении числа 65 535.

Для адресации ОЗУ используется половина внешнего адресного пространства процессора. При нулевом старшем разряде адреса происходит обращение процессора к служебным регистрам, размещённым внутри ПЛИС, и к внутреннему ОЗУ ПЛИС.

Для каждого цифрового массива (т. е. данных, содержащих однородную информацию) в ОЗУ отводится определённая область; эти области одинаковые в обоих банках. Базовые адреса массивов хранятся в служебных регистрах ПЛИС и доступны процессору для чтения и изменения.

Массивы хранятся в ОЗУ, начиная с базового адреса и далее — по возрастающим адресам. Если элементы массива имеют длину более одного байта, младший байт записывается по меньшему адресу. Длина массива не подлежит изменению и фиксируется как в программе процессора, так и в конфигурации ПЛИС.

Содержание информации, выводимой в телеметрию, полностью определяет процессор. Он записывает массивы данных в ОЗУ. По получении очередного сигнала N1 или N2 ПЛИС передаёт эти данные в блок ПМЭ согласно протоколу обмена.

В приборном отсеке блока ПМД размещены две абсолютно идентичные платы цифровой электроники основного (А) и резервного (Б) комплектов.

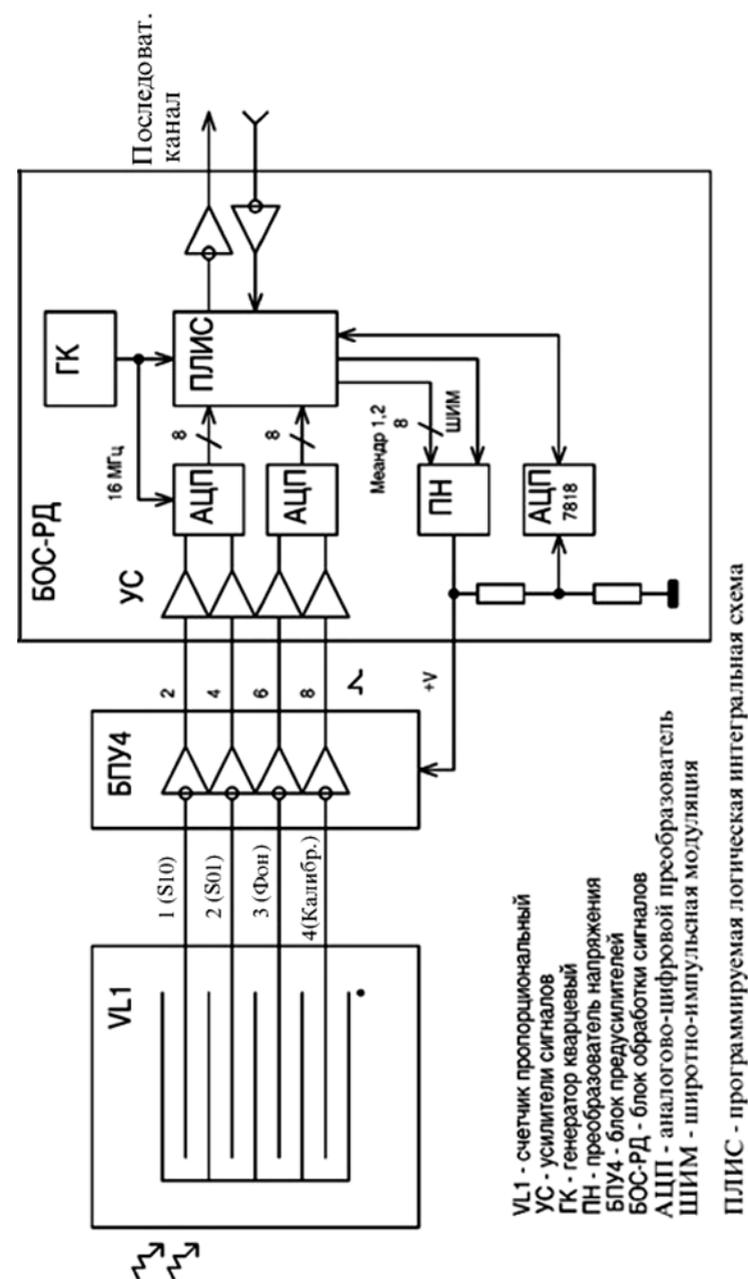


Рис. 3.

Узлы электроники детектора мягкого рентгеновского излучения

Структурная схема блока электроники одного рентгеновского детектора (РД) приведена на рис. 3.

Управляющим элементом блока является ПЛИС-РД, обеспечивающая:

- прием сигналов с предусилителей детектора РД;
- управление АЦП детектора РД;
- управление стабилизацией высоковольтного напряжения питания детектора методом ШИМ-модуляции;
- накопление четырёх 128-канальных спектров (по числу секций пропорционального счётчика) и передачу данных в ПЛИС2 платы цифровой электроники приборного отсека ПМД по запросу процессора платы электроники;
- прием команд управления детектором РД.

Передача данных и прием команд управления детектора РД производится по специальному внутреннему последовательному асинхронному двунаправленному каналу связи типа UART старт-стопным методом. Протокол обмена последовательного канала также организован на ПЛИС-РД и ПЛИС2 платы цифровой электроники. Скорость обмена по каналу составляет 115 200 бит/с.

Стабилизация параметров детекторов

Системы стабилизации энергетической шкалы и контроля симметрии детекторов поляриметра позволяют поддерживать стабильность на уровне $\sim 1,5\%$. Первый контур стабилизации обеспечивается за счет светодиодных реперных источников. Стабилизация же световых светодиодов, в свою очередь, осуществляется по встроенному радиоактивному источнику ^{133}Ba . Управление первым контуром системы стабилизации цинтилляционных детекторов возложено на ПЛИС платы цифровой электроники. Стабилизацию работы пропорциональных счетчиков осуществляет ПЛИС детектора РД. Параметры стабилизации можно изменять по командам с Земли. Управление вторым контуром системы стабилизации осуществляется путем периодической подачи корректирующих команд в блок ПМД.

Формирование сигнала «Всплеск»

Сигнал «Всплеск» формируется процессором ПМД по превышении заданного порога достоверности относительно среднего значения в выбранном энергетическом окне на интервале усреднения ~ 1 с. Величина порога достоверности может изменяться по командам блока ПМЭ, передаваемым по каналу SPI.

Источником сигнала «Всплеск» является прямое излучение в детекторах-рассеивателях (ДР1...ДР4) в диапазоне $\sim 10...40$ кэВ.

Для уменьшения числа ложных срабатываний в программу выработки сигнала «Всплеск» введены следующие ограничительные критерии:

- поток заряженных частиц за время усреднения не должен превышать заданного порога NP; это позволит уменьшить число ложных срабатываний по заряженным частицам в радиационных поясах;
- отношение суммарной скорости счета прямого солнечного излучения в ДР к суммарной скорости счета γ -квантов прямого излучения в ДФ должно превышать заданный уровень ΔK (отношение растет для прямого и падает для изотропного потока в радиационных поясах); это позволит уменьшить число ложных срабатываний от непрямых γ -квантов;
- отношение разности скоростей счета в любой из трех пар противоположных ДФ не должно превосходить заданного уровня ΔL ; в нормальных условиях ΔL близко к «0», но при вхождении в радиационные пояса может появляться анизотропия излучения как фон от корпуса спутника.

Параметры NP, ΔK и ΔL могут быть скорректированы по командам в процессе работы блока.

Величина ΔK вычисляется по следующей формуле

$$\text{ДР} \cdot \text{FactF} \geq \text{ДФ} \times \text{FactR}; \text{ или } \text{ДР}/\text{ДФ} = \Delta K \geq \text{FactR}/\text{FactF},$$

где FactF — множитель окна выделения «всплеска» в детекторах ДР; FactR — множитель окна гамма-фона в детекторах ДФ.

Допустимые пределы изменений значений FactR и FactF 1...255 (1 байт). По предварительным оценкам $\Delta K \approx 1$.

Электронные узлы блока ПМЭ

Блок «ПИНГВИН-МЭ» обеспечивает выполнение следующих задач:

- сбор данных с блока детекторов «ПИНГВИН-МД»;
- первичная обработка данных;
- упаковка полученных данных;
- привязка данных по времени;
- передача данных на телеметрическую систему сбора и регистрации научной информации (ССРНИ);
- прием управляющих кодовых слов и метки времени от телеметрической системы ССРНИ;
- обеспечение вторичного электропитания;
- преобразование информации, поступающей в виде потоков импульсов (интенсиметры), в цифровой код и передача данных на телеметрическую систему ССРНИ;
- передача управляющих воздействий на блок детекторов ПМД.

Функциональная схема блока «ПИНГВИН-МЭ» приведена на рис. 4. В состав системы входят модули: блок управления аппаратурой «ПИНГВИН» (БУА-П), блок управления аппаратурой — блок ввода питания (БУА-БВП) и модернизированный контроллер системы (КС-МПП), установленные в крейт на 17 позиций. Часть позиций в крейте не занята. Управление системой осуществляется модулем БУА-БВП, который принимает от блока управления и соединений комплекса научной аппаратуры «ФОТОН» (БУС-ФМ) импульсные команды, команды признаков состояния («свет/тьень»), а также нахождения КА на участках орбиты с неблагоприятными фоновыми условиями («Вшир/Сшир»), транслирует команды во вторичные источники питания (НВИ-М), формирует сигналы управления электроникой блока «ПИНГВИН-МЭ». Модуль КС-МПП осуществляет сбор, накопление, первичную обработку данных, прием кода бортового времени, управляющего последовательного кода (УКС) и вывод упакованной и привязанной ко времени информации на ССРНИ. Все циклограммы работы прибора задаются КС-МПП программным способом. Модуль БУА-П осуществляет под управлением контроллера КС-МПП программно-управляемый обмен данными с блоком «ПИНГВИН-МД». Прием информации от блока «ПИНГВИН-МД» осуществляется

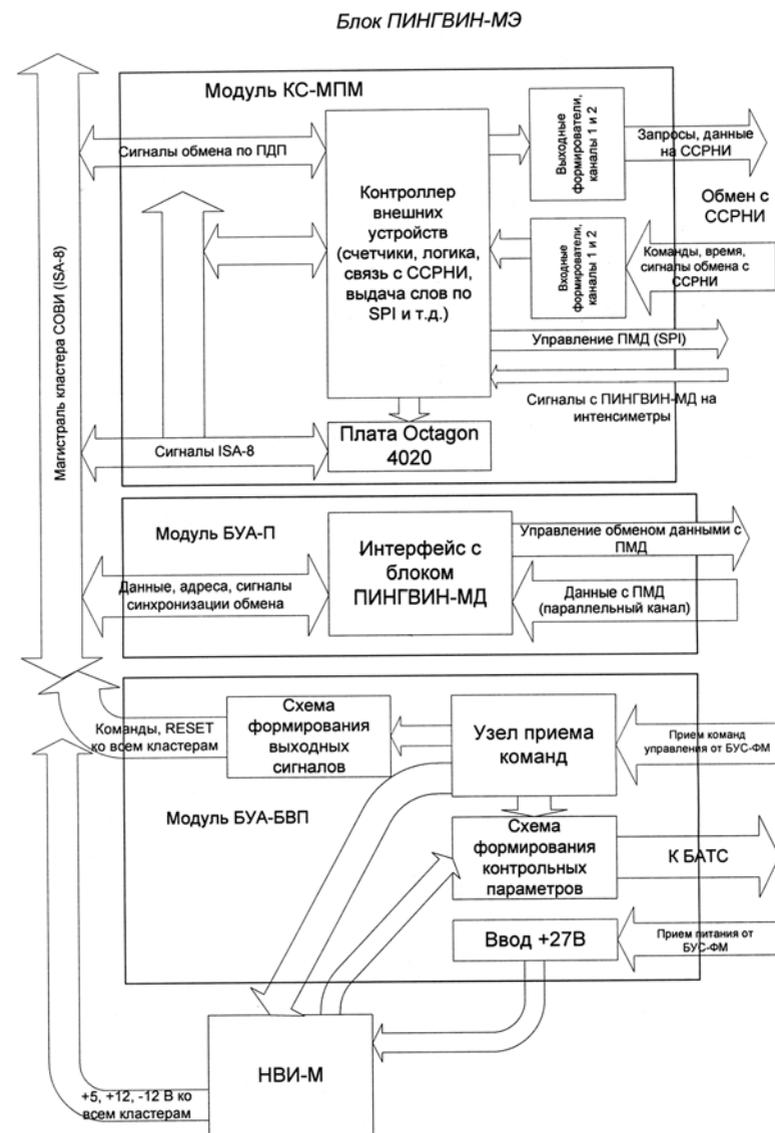


Рис. 4.

восьмиразрядным параллельным кодом, передача управляющего последовательного шестнадцатиразрядного кода на блок «ПИНГВИН-МД» производится по магистрали SPI. Кроме того, для независимого накопления информации в регулируемом по времени накопления режиме в КС-МПП используются шесть счетчиков для накопления и вывода информации в ССРНИ.

Модуль КС-МПП предназначен для работы в составе МСЭ и состоит из платы интерфейсов и микроконтроллера Octagon 4020, выполняющего роль вычислительного ядра системы. Плата микроконтроллера устанавливается над платой интерфейсов мезонинным способом. Комплект программного обеспечения прошивается в энергонезависимую память, находящуюся на плате Octagon 4020. Все основные функции интерфейсной платы реализуются в ПЛИС Actel APA600, находящихся на плате интерфейсов. Обмен с микроконтроллером осуществляется как по программному каналу, так и по каналу прямого доступа к памяти (ПДП), кроме того, плата интерфейсов вырабатывает запросы на прерывания, используемые для управления работой контроллера. Все интерфейсы с ССРНИ работают в соответствии с временными диаграммами обмена, согласованными для комплекса научной аппаратуры. Передача управляющих воздействий на блок «ПИНГВИН-МД» осуществляется по шине SPI последовательными шестнадцатиразрядными послылками, причем количество передаваемых слов не ограничено.

Прием информации от блока «ПИНГВИН-МД» осуществляется по восьмиразрядному синхронному параллельному интерфейсу через оконечное устройство, размещенное в модуле БУА-П. Обмен идет в сопровождении сигналов-признаков типа выводимой информации (N1 — «Данные типа 1» и N2 — «Данные типа 2»). «Данные типа 1» содержат 101 байт физической и технической информации, «Данные типа 2» — 3064 байта основной физической информации.

Всю информацию с прибора «ПИНГВИН-М», поступающую на ССРНИ, можно разделить на физическую информацию и служебную (отображающую состояние электроники блоков «ПИНГВИН-МД» и «ПИНГВИН-МЭ»).

Прибор «ПИНГВИН-М» имеет несколько режимов работы и несколько типов информационных массивов:

- *Начальная инициализация.* Сопровождается выводом тестового массива данных.
- *Патрульные наблюдения.* В этой моде «ПИНГВИН-М» осуществляет накопление и вывод «Данных типа 1» один раз в 10 с (1 кадр) и «Данных типа 2» — один раз в 120 с (27 кадров). Состав и структура данных приведены в табл. 3.
- *Регистрация вспышки.* В этой моде прибор осуществляет накопление и вывод «Данных типа 1» один раз в 10 с (1 кадр) и «Данных типа 2» — один раз в 10 с (27 кадров).
- *Вывод «большого» тестового массива.* В этой моде «ПИНГВИН-М» осуществляет вывод тестовых «Данных типа 1» и «Данных типа 2» (приблизительно 266 кбайт) в ускоренном режиме.
- *Вывод «короткого» тестового массива.* В этой моде прибор осуществляет вывод тестовых «Данных типа 1» (1 кадр) и «Данных типа 2» (27 кадров).
- *Вывод информации (квитанция) о пришедшем пакете УКС от ССРНИ.*

Необходимо отметить следующие особенности функционирования прибора:

- Последовательность функционирования по модам «ПИНГВИН-М» следующая: мода начальной инициализации, поиск солнечных событий (по факту появления сигнала «Вспышка») и накопление информации в моде патрульных наблюдений; при выявлении события — переход в моду регистрации вспышки, после чего — вновь переход в моду патрульных наблюдений.
- При переходе из моды регистрации всплеска в моду патрульных наблюдений, а также 1 раз в 3600 с производится вывод тестового массива, вслед за которым выводится кадр (кадры) параметров настроек прибора.
- При приеме блока УКС осуществляется вывод тестового массива, следом за ним — кадра (кадров) параметров настроек прибора и, затем, кадра (кадров), содержащего число принятых УКС, а далее — принятых УКС.
- Вывод информации с интенсиметров производится непрерывно. Данные передаются на ССРНИ по мере заполнения соответствующих телеметрических кадров.

- Период опроса интенсиметров, продолжительность набора «Данных типа 1 и 2» в модах патрульных наблюдений и регистрации всплеска, мастер перехода в моду регистрации всплеска, а также продолжительность моды регистрации всплеска могут изменяться путем выдачи соответствующих УКС.

При выводе информации на ССРНИ, в случае срабатывания вспышечной ячейки блока «ПИНГВИН-МД», применяются следующие принципы:

1. Состояние флага срабатывания вспышечной ячейки проверяется:

- перед выдачей сигнала «ВЫВОД1» (N1);
- после выдачи сигнала «ВЫВОД1» (N1);
- перед выдачей сигнала «ВЫВОД2» (N2);
- после выдачи сигнала «ВЫВОД2» (N2).

2. При обнаружении активного состояния флага срабатывания вспышечной ячейки, в зависимости от текущих настроек параметров прибора, выполняется переход во вспышечную моду работы. При этом завершается очередной 10-секундный цикл набора «Данных типа 1» и одновременно с ним завершается текущий цикл набора «Данных типа 2», независимо от того, закончился очередной 120-секундный интервал набора или нет. Далее набор информации проводится во вспышечной моде, с периодом опроса 10 с. Завершение вспышечной моды определяется заложенным в контроллер блока «ПИНГВИН-МЭ» алгоритмом, параметры которого можно менять выдачей соответствующих УКС.

На начальном этапе работы прибора суммарная информационная квота прибора «ПИНГВИН-М» составляет 6 337 553 байт/сут или 0,47% от суммарных ресурсов ССРНИ.

Литература

Богомолов А. В., Денисов Ю. И., Логачев Ю. И., Морозов О. В., Свертилов С. И., Житник И. А., Игнатъев А. П., Опарин С. Н., Перцов А. А., Тиндо И. П. (2003) Временные, спектральные и поляризационные характеристики жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек, наблюдавшихся в эксперименте СПР-Н на борту орбитальной обсерватории «КОРОНАС-Ф» // Изв. РАН. Сер. Физика. 2003. Т. 67. № 10. С. 1422–1426.

Дергачев В. А., Скородумов Д. В., Лазутков В. П., Матвеев Г. А., Савченко М. И., Круглов Е. М., Шишов И. И., Пятигорский Г. А., Чичикалюк Ю. А., Хмылко В. В., Васильев Г. И., Драневич В. А., Крутков С. Ю., Котов Ю. Д., Гляненько А. С., Архангельский А. И., Горелый Ю. А., Самойленко В. Т., Юров В. Н. Поляриметрия жесткого рентгеновского излучения прибором «ПИНГВИН-М», основанном на эффекте комптоновского рассеяния, в космическом эксперименте «КОРОНАС-ФОТОН» // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 2. С. 250–251.

Dergachev V. A., Kruglov E. M., Savchnko M. I., Skorodumov D. V., Lazutkov V. P., Matveev G. A., Shishov I. I., Pyatigorsky G. A., Chichikaluk Yu. A., Khmylko V. V., Vasiliev G. I., Dranevich V. A., Krut'kov S. Yu., Kotov Yu. D., Glyanenko A. S., Arkangelsky A. I., Gorelyi Yu. A., Samoilenko V. T., Yurov V. N. Hard X-ray polarimeter PENGUIN-M in CORONAS-PHOTON mission // Intern. Helio-physical Year: New Insights into Solar-Terrestrial Physics (IH2007-NISTP), Nov. 5–11, 2007. Zvenigorod, Moscow Region, Russia: Abstr. 2007. P. 26.

Novick R. (1975) Stellar and solar X-ray polarimetry // Space Science Rev. 1975. V. 18. P. 389–408.

Kotov Yu., Dergachev V., Kruglov E., Khmylko V., Chichikaluk Yu. (2001) Compton scattering polarimeter PENGUIN for solar flares polarimetry // Proc. ICRC 2001: 2822. Copernicus Gesellschaft, 2001.

Tindo I. P., Ivanov V. D., Mandel'stam S. L., Shurygin A. I. (1970) Polarization of the emission of X-ray solar flares // Solar Phys. 1970. V. 14. P. 204–207.

THE SOLAR'S HARD X-RAY POLARIMETER ONBOARD SATELLITE KORONAS-PHOTON

V. A. Dergachev¹, G. A. Matveev¹, E. M. Kruglov¹, V. P. Lazutkov¹, M. I. Savchenko¹, D. V. Skorodumov¹, A. G. Pyatigorsky¹, G. A. Pyatigorsky¹, Yu. A. Chichikaluk¹, I. I. Shishov¹, V. V. Khmylko¹, G. I. Vasilyev¹, V. A. Dranevich¹, S. Yu. Krutkov¹, S. V. Stepanov¹, Yu. D. Kotov², V. N. Yurov², A. S. Glyanenko², A. I. Arkhangelsky², Yu. A. Gorelyi², I. V. Rubtsov²

¹ Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, St. Petersburg

² Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 — National Research Nuclear University “MEPhI” (NRNU MEPhI)), Astrophysics Institute MEPhI, Moscow

The principle of operation and basic performances of the scientific instrument PENGUIN-M are presented. The device is intended for measuring the degree of polarization of X-ray emission

from solar flares in the energy range 20 to 150 keV as well as X-ray energy spectra from 2 to 500 keV.

The Compton scattering effect is used. The degree of polarization is determined by registration of coincident pulses from both the active scatterer and surrounding detectors.

The device has a modular structure and consists of two units, the detector block PENGUIN-MD and the electronic block PENGUIN-ME.

Keywords: solar flare, X-ray, polarimetry, space experiment, detector-diffuser, scintillator, proportional counter, «phoswich», spectra, p-terphenyl, polarization, scientific equipment, active protection, active diffuser, PENGUIN-M, CORONAS-PHOTON.

Dergachev Valentin Andreevich — Deputy director, doctor of sciences. E-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru.

Matveev Gennady Aleksandrovich — Senior Scientist, Ph. D. E-mail: genadiy.matveev@mail.ioffe.ru.

Kruglov Evgeny Mikhailovich — Senior Scientist, Ph. D.

Lazutkov Vadim Petrovich — Scientist. E-mail: vadim.lazutkov@mail.ioffe.ru)

Savchenko Mikhail Ivanovich — Senior Scientist, Ph. D. E-mail: mikhail.savchenko@mail.ioffe.ru.

Skorodumov Dmitry Vsevolodovich — Scientist. E-mail: dmitri.skorodumov@mail.ioffe.ru.

Pyatigorsky Aleksei Gregorovich — Leading Engineer. E-mail: alxp@bk.ru.

Pyatigorsky Gregory Aleksandrovich — Leading Engineer. E-mail: pga.crlab@mail.ioffe.ru.

Chichikaljuk Yuri Anatolievich — Leading Engineer.

Shishov Igor Igorevich — Engineer.

Khmylko Vladislav Vikentevich — Senior Scientist, Ph. D.

Vasilyev Gennady Ivanovich — Senior Scientist, Ph. D. E-mail: gennady.vasilyev@pop.ioffe.rssi.ru.

Dranevich Vyacheslav Adamovich — Leading Engineer.

Krutkov Sergei Yurievich — Scientist. E-mail: gennady.vasilyev@pop.ioffe.rssi.ru.

Stepanov Sergei Vasilievich — Scientist.

Kotov Yury Dmitrievich — Director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: kotov@mephi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy Director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Glyanenko Alexander Stepanovich — Head of the Scientific Group, Ph. D. E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Arkhangelsky Andrey Igorevich — Scientist. E-mail: angel1966@list.ru.

Gorelyi Yuri A. — Engineer.

Rubtsov Igor V. — Engineer. E-mail: IVRubtsov@mephi.ru.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСА ИНСТРУМЕНТОВ ТЕСИС /«КОРОНАС-ФОТОН» ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СОЛНЦА В УСЛОВИЯХ МИНИМУМА И МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

**С. В. Кузин¹, С. А. Богачев¹, С. В. Шестов², О. И. Бугаенко³,
И. А. Житник¹, Ю. С. Иванов¹, А. П. Игнатьев¹,
А. В. Митрофанов¹, С. Н. Опарин¹, А. А. Перцов¹, В. А. Слемзин¹,
Н. К. Суходрев¹, М. С. Зыков¹, А. А. Рева², А. С. Ульянов²**

¹ Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва

² Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)), Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва

³ Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова (ГАИШ), Москва

В состав инструмента ТЕСИС (Телескопы EUV-диапазона для Спектральных Исследований Солнца) на борту спутника «КОРОНАС-ФОТОН» входят несколько изображающих телескопов и спектрогелиографов. Их нормальная работоспособность требует соответствующей информационной и технической поддержки. С точки зрения информационного обеспечения проводящегося эксперимента необходимо не только передавать с борта спутника на Землю максимальные объемы информации, но и своевременно ее получать, а также иметь достаточный объем команд управления прибором с Земли. Для регистрации изображений с высоким пространственным разрешением необходимо выдерживать расчетный тепловой режим аппаратуры и высокую точность направления оси аппаратуры на центр Солнца и степень стабилизации космического аппарата. Эти аспекты проведения эксперимента представлены в настоящей работе.

Ключевые слова: Солнце, корона, переходный слой, вспышки, солнечная активность, космические исследования Солнца.

Кузин Сергей Вадимович — заведующий лабораторией, канд. физ.-мат. наук. E-mail: kuzin@sci.lebedev.ru.

Богачев Сергей Александрович — ведущий научный сотрудник, д-р физ.-мат. наук. E-mail: bogachev@sci.lebedev.ru.

Шестов Сергей Викторович — младший научный сотрудник. E-mail: sshestov@dgap.mipt.ru.

Бугаенко Олег Илларионович — ведущий конструктор. E-mail: bugaenko@sci.lebedev.ru.

Житник Игорь Александрович — главный научный сотрудник, д-р физ.-мат. наук. E-mail: zhitnik@sci.lebedev.ru.

Иванов Юрий Сергеевич — ведущий конструктор. E-mail: yivanov@sci.lebedev.ru.

Игнатьев Александр Петрович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: ignatyev@sci.lebedev.ru.

Митрофанов Александр Викторович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: mitrofa@sci.lebedev.ru.

Опарин Сергей Николаевич — научный сотрудник. E-mail: oparin@sci.lebedev.ru.

Перцов Андрей Александрович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: perzov@sci.lebedev.ru.

Слемзин Владимир Алексеевич — главный научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: slm@sci.lebedev.ru.

Суходрев Нина Кузьминична — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: suhodrev@sci.lebedev.ru.

Зыков Михаил Сергеевич — аспирант. E-mail: zmsmihail@gmail.com.

Рева Антон Александрович — студент. E-mail: antonreva@gmail.com.

Ульянов Артем Сергеевич — студент. E-mail: ikiru@inbox.ru.

Введение

Изучение Солнца в мягкой рентгеновской и вакуумной ультрафиолетовой области спектра (ВУФ) — в настоящее время одно из лидирующих направлений научных астрофизических исследований в космосе. Это связано с тем, что, во-первых, Солнце является уникальным объектом — единственной звездой, которую можно изучать с высоким пространственным и временным разрешением. Таким образом, можно получать физические данные об общих процессах, происходящих в глубине и на поверхности звезд. Во-вторых, процессы, происходящие на Солнце, определяют состояние межпланетной и, в частности, околоземной среды. Они дают основной вклад в радиационные нагрузки на космические аппараты, влияют на ионосферу Земли, вызывая помехи радиосвязи, влияют на другие проявления техногенной деятельности.

Именно поэтому в последние 10 лет было запущено шесть солнечных обсерваторий, направленных на изучение активности в короне, и на всех стояла аппаратура, предназначенная для получения изображений Солнца в ВУФ-диапазоне. Наличие такой аппаратуры позволяет не только регистрировать мощность и спектральный состав активных явлений в короне, но и показывать место их возникновения и динамику распространения, что необходимо для предсказания их геоэффективности.

Кроме того, данные, полученные с помощью рентгеновских и ВУФ-телескопов и спектрогелиографов, позволяют исследовать энергетику сложных процессов, таких как вспышки или корональные выбросы масс (КВМ), определять физические параметры плазмы в различных областях.

При этом при проведении экспериментов с космическими изображающими инструментами предъявляются довольно серьезные требования по ряду параметров как к самой аппаратуре, так и к космическому аппарату (КА).

В первую очередь это касается обеспечения стабилизации изображения во время его экспозиции, точности наведения оптической оси аппаратуры на выбранный участок Солнца, сохранения юстировки инструмента во время запуска и полета, информационного обеспечения эксперимента.

В данной статье описываются подходы к решению этих проблем и их практическая реализация применительно к аппаратуре ТЕСИС, установленной на спутнике «КОРОНАС-ФОТОН», выведенном на орбиту 30 января 2009 г.

Аппаратура ТЕСИС

ТЕСИС является комплексом изображающих инструментов, состоящим из двух ВУФ-телескопов, ВУФ- и МР-спектрогелиографов, ВУФ-коронографа, МР-спектрофотометра «Сфинкс», а также двух оптических датчиков. Основные характеристики аппаратуры приведены в статье настоящего сборника: *Кузин С. В.* и др. Первые результаты эксперимента ТЕСИС по исследованию атмосферы Солнца на спутнике «КОРОНАС-ФОТОН» (с. 155).

Особенность комплекса ТЕСИС заключается в одновременной реализации нескольких ключевых параметров: высокого пространственного (до 1,7 угл. мин), спектрального (до 0,1 А) и временного разрешения (до 1 с) — при регистрации изображений Солнца и солнечной короны на расстояниях до четырех солнечных радиусов над лимбом. При этом диапазон экспозиций в различных каналах составляет от 0,1 (для регистрации вспышечных процессов) до 600 с (для регистрации дальней солнечной короны). Одной из основных уникальных возможностей аппаратуры является способность одновременной регистрации изображений в четырех спектральных каналах. Это крайне

важно для получения информации о спектральном и, следовательно, температурном распределении плазмы во время быстроепротекающих процессов в солнечной короне. Необходимо отметить, что регистрация таких явлений — исключительно информационно емкая.

Как отмечалось выше, эксперимент ТЕСИС направлен на исследование различных процессов и явлений в солнечной короне. Так как возникновение этих явлений, например, вспышек или КВМ, и их основные характеристики предсказать довольно сложно, то необходима сложная и гибкая система управления комплексом, в основе которой лежит информационный обмен между инструментом и группой управления.

Обеспечение температурного режима прибора ТЕСИС

ВУФ-телескопы и МР-спектрогелиограф прибора ТЕСИС имеют однозеркальную схему. Ее преимущество заключается в использовании только одного отражающего оптического элемента и больших габаритах. Это значительно повышает светопропускание, упрощает фокусировку и фильтрацию паразитного рассеянного излучения. Сложность практической реализации этой схемы связана с необходимостью обеспечить жесткость конструкции, чтобы избежать разъюстировки при запуске и минимизировать термодформации во время эксплуатации.

Для уменьшения общей массы ВУФ-телескопы и МР-спектрогелиограф не имеют собственной несущей и светоизолирующей конструкции. Их основные оптические элементы: затворы, фильтры, зеркала и детекторы — размещены на общей раме прибора, обладающей высокой жесткостью. Такая компоновка прибора позволила решить общим способом проблему рассеянного оптического света путем применения единого светоизоляционного кожуха.

Так как рама была изготовлена из дюралюминия с высоким коэффициентом термического расширения, основная задача заключалась в решении проблемы температурного режима прибора. Для обеспечения минимальных расфокусировок каналов при проведении эксперимента на различных орбитах (с максимальной длительностью тени и полностью бестеневых) диапазон температур несущей конструкции, на которой размещены

основные оптические элементы указанных выше каналов, должен составлять $+10...+30$ °С. Для предотвращения ухода центра изображения из заданной области на ПЗС-матрицы градиент температуры по раме не должен превышать 3 °С/м. Температура радиаторов ПЗС-матриц должна быть $-25...-50$ °С.

В соответствии с указанными требованиями в Лаборатории теплового моделирования филиала ФГУП НПП «Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики имени А. Г. Иосифьяна» (ФГУП «НПП ВНИИЭМ», г. Истра, Московская обл.) был проведен тепловой расчет прибора и выданы рекомендации по его доработке. Для обеспечения указанного теплового режима прибор был размещен в чехле из экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), изолирующем прибор от излучения в открытое космическое пространство. Сторона прибора, обращенная к спутнику, не была изолирована. Дополнительная термостабилизация осуществлялась за счет теплопроводности крепежных элементов между прибором ТЕСИС и КА. Радиаторы ПЗС-матриц были изолированы от корпуса прибора с помощью ЭВТИ. Такое решение позволило добиться заданной рабочей температуры конструкции и радиаторов на различных участках орбиты. Первые результаты работы прибора ТЕСИС показали, что температура несущей конструкции ТЕСИС (рамы, а также передней и задней плиты) стабилизирована в диапазоне $+10...+20$ °С и меняется в пределах одной орбиты не более чем на $1...2$ °С. Температура радиаторов составила $-25...-50$ °С, что позволило не использовать заложенные в конструкцию детекторов термоохлаждающие элементы Пелтье и существенно снизить энергопотребление прибора (рис. 1).

Отметим, что, поскольку юстировка прибора ТЕСИС осуществлялась в лабораторных условиях при температуре примерно $+25$ °С, после начала работы были проведены специальные сеансы по уточнению положения наилучшей фокусировки. В качестве тестовых использовались изображения тонкой структуры короны Солнца в канале FeIX.

Для обеспечения изотермичности конструкции была использована система тепловых труб, закрепленных на раме прибора, а лучшего теплоконтакта — самоклеющаяся теплопроводящая пленка. Это позволило обеспечить градиенты температуры 1 °С/м.

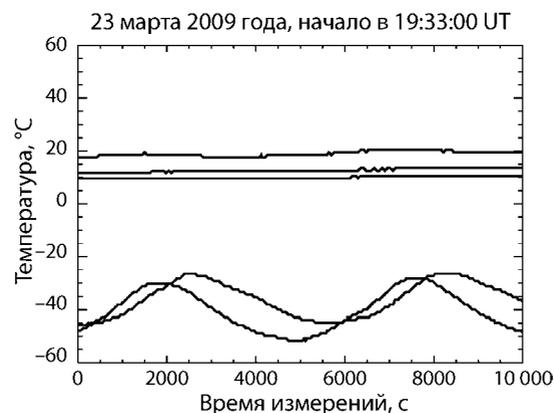


Рис. 1. Показания термодатчиков ТЕСИС, измеренные в течение 10 тыс. с: 1, 2 и 3 — данные элементов несущей конструкции ТЕСИС (рама, передняя плита, задняя плита); 4, 5 — данные радиаторов ТЕСИС (верхний и боковой)

Ориентация и стабилизация КА

Как отмечалось выше, точность ориентации направленной на центр Солнца оси КА (ось $-Z$) и ее стабилизация являются одним из ключевых вопросов при проведении экспериментов, связанных с регистрацией изображений.

Для обеспечения работоспособности коронографа и спектрогелиографов точность ориентации должна составлять не хуже 3 угл. мин. С учетом того, оптическая ось прибора ТЕСИС может несколько не совпадать с осью $-Z$, необходима возможность небольшого смещения относительно ее начального положения (так называемые «уставки»). Такая система была реализована на КА «КОРОНАС-ФОТОН». Ее проверка была проведена в ходе совместного эксперимента специалистами ФГУП «Научно-исследовательский институт электромеханики» (НИИЭМ), Московского Инженерно-физического института (государственного университета) (МИФИ) и Учреждения Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН). На первом этапе на систему ориентации были поданы калиброванные «уставки» для определения перемещения изображения Солнца в картинной плоскости. После определения направления и величины необходимого смещения были поданы рабочие значения.

Поскольку КА оснащен одноосной системой стабилизации, а для интерпретации полученных данных необходимо знать положение оси вращения Солнца в картинной плоскости, в состав прибора ТЕСИС были введены оптические датчики (ОД) для определения ориентации оси X , перпендикулярной $-Z$, по звездам. Оптические датчики представляют собой высокочувствительные широкопольные телескопы с полем зрения около 10° и разрешением 20 угл. с. Они позволяют регистрировать звезды до 12-й величины. Привязка получаемого изображения к экваториальной системе координат производится автоматически с использованием каталога Hipparcos. В состав телескопа входят два ОД, установленных перпендикулярно оси $-Z$. Для обеспечения непрерывной работы их оптические оси направлены в противоположных направлениях. ОД работают с интервалом около 10 мин. Данные по ориентации КА выкладываются на сайт эксперимента ТЕСИС по адресу <http://www.thesis.lebedev.ru/orientation.html>.

На рис. 2 представлен график вращения КА вокруг оси $-Z$ за период около 2,5 месяцев. Из данных видно, что у КА есть довольно устойчивые положения, в которых он сохраняет свою

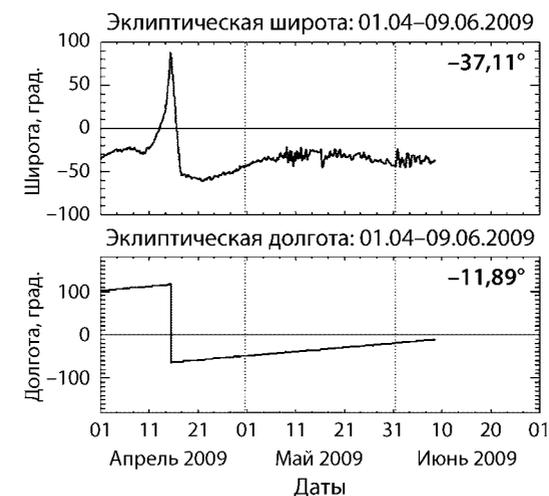


Рис. 2. Эклиптическая широта и долгота оси X спутника «КОРОНАС-ФОТОН», измеренная в течение 2,5 месяцев по показаниям оптических датчиков ТЕСИС

ориентацию в течение длительного времени. Если КА по каким-либо причинам выходит из этого режима, скорость вращения может достигать 30...60 град/сут.

При заходе КА в тень Земли и выходе из нее происходят довольно сильные отклонения оси $-Z$ от направления на центр Солнца, что связано с особенностями работы системы ориентации. Длительность переходного процесса в настоящее время составляет около 1 мин.

Для проведения наблюдений, связанных с длительными экспозициями, необходимо обеспечить стабилизацию КА до такой степени, чтобы смещение изображения за время экспозиции не превышало элемент разрешения.

Как показали первые калибровочные включения аппаратуры ТЕСИС, для регистрации изображения диска необходима экспозиция в каналах с наибольшим разрешением (FeIX и HeII) от 1 до 3 с. Так как разрешение в этих каналах составляет около 2 угл. с, то стабилизация оси $-Z$ должна быть ~ 1 угл. с/с. По техническим характеристикам спутник должен был обеспечивать стабилизацию не хуже 0,005 град/с, что составляет 18 угл. с/с. Уточнить эту величину нужно было практически сразу после начала работы, так как она во многом определяет условия проведения эксперимента. При этом стабилизация складывается из двух основных компонент: вращение вокруг оси $-Z$ и колебания вокруг этой оси.

Стабилизация, связанная с вращением, менее критична, поскольку она пропорциональна косинусу радиуса Солнца. Даже для самых больших зарегистрированных скоростей вращения КА вокруг оси $-Z$ время экспозиции может составлять около 20 с без ухудшения изображения.

Более критичными являются колебания вокруг этой оси, так как в этом случае величина смаза изображения прямо пропорциональна смещению оси $-Z$. Как показывают данные ОД, амплитуда этих колебаний, как правило, не превышает 1 угл. мин.

Информационные потоки эксперимента

Изображающие каналы прибора ТЕСИС оборудованы детекторами на основе ПЗС-матриц формата 2048×2048 ячеек и 14-битным АЦП. Размер одного несжатого изображения состав-

ляет около 8 Мбайт. Частота передачи изображений по внутреннему каналу от детектора в бортовой компьютер (БК) составляет 1 МГц, а максимальная частота получения полноразмерных изображений в одном канале — около 8 с.

Суточный объем информации, передаваемый с прибора на Землю, составляет до 800 Мбайт. Ограничение по передаче больших объемов связано с пропускной способностью канала связи между бортовым компьютером ТЕСИС и системой сбора и регистрации научной информации комплекса научной аппаратуры (ССРНИ). Таким образом, без обработки информации на борту можно передать в сутки только 100 изображений или спектрогелиограмм Солнца, в то время как на бестеневых орбитах аппаратура ТЕСИС позволяет регистрировать более 2000 изображений.

Для увеличения информативности эксперимента в ТЕСИС используются три основных метода уменьшения объема первичной информации: считывание только значимой части изображения (окна), бинирование (объединение соседних ячеек) и сжатие зарегистрированного изображения различными алгоритмами: без потери качества (арифметическое кодирование, сжатие до трех раз) и с потерей качества (JPEG). Используется также комбинация этих методов. Первые два из них организованы аппаратно в детекторах, что позволяет уменьшить время передачи изображения в БК, а сжатие по JPEG — программно в БК.

Выбор того или иного метода обработки осуществляется в зависимости от научной программы наблюдений. Практически всегда применяется сжатие без потери качества, а в случаях, когда не требуется точная фотометрия, — JPEG с разной степенью сжатия. Режим «окна», который позволяет также существенно увеличить частоту получения изображений, используется, например, при регистрации быстропотекающих процессов. А при фотографировании дальней короны, где высокое разрешение не требуется, — бинирование изображений. Использование указанных алгоритмов позволяет регистрировать до нескольких тысяч кадров в сутки.

Информационное обеспечение эксперимента

Режим регистрации прибора ТЕСИС зависит от поставленной научной задачи и активности Солнца, с одной стороны,

и текущего состояния различных систем КА и прибора — с другой. Для обеспечения выбранного режима используются рабочие программы управления (циклограммы, ЦГ), которые определяют последовательность работы отдельных каналов, их параметры, режимы работы механических узлов, бортовую обработку и пр.

В ТЕСИС используется два основных типа ЦГ: уникальные и стандартные. Уникальные ЦГ создаются и используются для проведения редких нестандартных наблюдений (таких как, например, солнечного затмения), отладки режимов управления, тестирования отдельных узлов аппаратуры. Стандартные ЦГ используются для основных уже отлаженных режимов наблюдения, которые применяются сравнительно часто. При этом некоторые параметры стандартных ЦГ, такие как режим обработки, выбор окна, время экспозиции, могут изменяться с помощью коротких уникальных ЦГ, подаваемых в каждом сеансе управления.

Как правило, стандартные ЦГ хранятся и вызываются из памяти БК, а уникальные поступают по внешним командам управления — с помощью управляющих кодовых слов (УКС). УКС поступают на ТЕСИС или в режиме непосредственной передачи (НП) в сеансе связи или в режиме выдачи с привязкой по времени. Первый режим используется для вызова стандартной ЦГ из памяти БК или для перепрограммирования. Перепрограммироваться могут как хранящиеся в памяти БК стандартные ЦГ, так и программное обеспечение БК. Во втором режиме на прибор, как правило, передаются уникальные ЦГ.

Размер ЦГ зависит от конкретной программы наблюдений и ее длительности. Во избежание перерывов в работе прибора ЦГ передаются на ТЕСИС с «перекрытием». Если следующая закладка по каким-либо причинам не проходит, прибор нормально функционирует до следующей за ней.

Выводы и благодарности

Предложенные специалистами ВНИИЭМ решения по обеспечению терморезима прибора ТЕСИС и их реализация позволили предотвратить заметные термодформации конструкции на различных участках орбиты, что дало возможность избежать регулярных перефокусировок, необходимости удержания

оптической оси за счет ресурсов прибора, снизить его энергопотребление.

Ориентация и стабилизация КА соответствуют практически всем наблюдательным задачам эксперимента ТЕСИС. Данные по текущей ориентации оперативно выкладывались на сайт эксперимента ТЕСИС.

ТЕСИС позволяет регистрировать до нескольких тысяч изображений в сутки с использованием различных методов обработки изображений на борту и тем самым реализовать все планировавшиеся научные программы наблюдений.

Коллектив выражает благодарность научному руководителю проекта Ю. Д. Котову, главному конструктору комплекса научной аппаратуры В. Н. Юрову, главному конструктору космического аппарата Р. С. Салихову, сотрудникам института астрофизики МИФИ, ВНИИЭМ, НИИЭМ, а также других организаций, внесших большой вклад в подготовку и осуществление проекта. Авторы крайне признательны Н. Н. Салашенко, В. И. Лучину, Н. И. Чкало и другим сотрудникам Института физики микроструктур РАН за огромный вклад в создание новых элементов рентгеновской оптики, без которых было бы невозможно создание инструмента ТЕСИС.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проекты № 08-02-13633-офи_ц и 08-02-01301-а, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Программа 16, часть 3», а также Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Плазменные процессы в солнечной системе».

INFORMATION AND TECHNICAL CAPACITIES OF TESIS / CORONAS-PHOTON FOR INVESTIGATION OF THE SUN DURING PERIODS OF MINIMAL AND MAXIMAL SOLAR ACTIVITY

S. V. Kuzin¹, S. A. Bogachev¹, S. V. Shestov², O. I. Bugaenko³, I. A. Zhitnik¹, Yu. S. Ivanov¹, A. P. Ignatiev¹, A. V. Mitrofanov¹, S. N. Oparin¹, A. A. Perzov¹, V. A. Slemzin¹, N. K. Suhodrev¹, M. S. Zykov¹, A. A. Reva², A. S. Ulianov²

¹ Establishment of Russian Academy of Sciences P. N. Lebedev Physical Institute of RAS (FIAN), Moscow

² Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 — National Research Nuclear University “MEPhI” (NRNU MEPhI)), Astrophysics Institute MEPhI, Moscow

³ P. K. Sternberg State Astronomical Institute MSU, Moscow

TESIS onboard CORONAS-PHOTON includes several imaging telescopes and spectroheliometers. Their normal performance requires appropriate informational and technical support.

From the viewpoint of information, it is necessary to ensure not only the maximum amount of telemetry from the satellite, but also the timeliness of data receipt, as well as an adequate amount of commands transmitted to device from the ground. For registration of images with high spatial resolution, it is necessary to provide appropriate thermal conditions and achieve high precision of satellite pointing to the Sun's center and high degree of spacecraft stabilization. These aspects of the experiment are presented in this paper.

Keywords: Sun, corona, transition region, flare, solar activity, solar space research.

Kuzin Sergey Vadimovich — Head of Laboratory, Ph. D. E-mail: kuzin@sci.lebedev.ru.

Bogachev Sergey Alexandrovich — Senior Researcher, Ph. D. E-mail: bogachev@sci.lebedev.ru.

Shestov Sergey Viktorovich — Associate researcher. E-mail: sshestov@dgap.mipt.ru.

Bugaenko Oleg Illarionovich — Senior Designer. E-mail: bugaenko@sci.lebedev.ru.

Zhitnik Igor Alexandrovich — Chief Researcher, Ph. D. E-mail: zhitnik@sci.lebedev.ru.

Ivanov Yuri Sergeevich — Senior Designer. E-mail: yivanov@sci.lebedev.ru.

Ignatiev Alexander Petrovich — Senior Researcher, Ph. D. E-mail: ignatyev@sci.lebedev.ru.

Mitrofanov Alexander Viktorovich — Senior Researcher, Ph. D. E-mail: mitrofa@sci.lebedev.ru.

Oparin Sergey Nikolaevich — Researcher. E-mail: oparin@sci.lebedev.ru.

Perzov Andrey Alexandrovich — Senior Researcher, Ph. D. E-mail: perzov@sci.lebedev.ru.

Slemzin Vladimir Alexeevich — Chief Researcher, Ph. D. E-mail: slem@sci.lebedev.ru.

Suhodrev Nina Kuzminichna — Senior Researcher, Ph. D. E-mail: suhodrev@sci.lebedev.ru.

Zykov Mihail Sergeevich — Postgraduate Student. E-mail: zmsmihail@gmail.com.

Reva Anton Alexandrovich — Student. E-mail: antonreva@gmail.com.

Ulianov Artem Sergeevich — Student. E-mail: ikiru@inbox.ru.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ФОКА ПО РЕГИСТРАЦИИ СОЛНЕЧНОГО ЖЕСТКОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Ю. Д. Котов, А. В. Кочемасов, А. С. Глянченко,
В. Н. Юров, А. И. Архангельский**

*Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)),
Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва*

На спутнике «КОРОНАС-ФОТОН», запущенном 30 января 2009 г., установлен прибор ФОКА (фотокатодный эксперимент), предназначенный для измерения потока солнечного электромагнитного излучения в очень интересном и информативном EUV/XUV-диапазоне. Прибор имеет три основных канала с диапазонами чувствительности 0,5...11; 0,5...7 и 27...37 нм, а также 116...125 нм для измерения яркой линии Лайман-альфа (L_{α}) водорода (121,6 нм). Перед запуском была проведена абсолютная калибровка каналов. Прибор ФОКА был включен 19 февраля 2009 г. На первом этапе реализации эксперимента получены важные сведения о работоспособности прибора, его параметрах, поведении сигналов каналов, уровнях фоновых засветок. Были проведены измерения излучения спокойного Солнца в минимуме активности, зарегистрированы первые солнечные вспышки, а также получены оккультационные профили поглощения излучения атмосферой Земли.

Ключевые слова: КОРОНАС-ФОТОН, солнечное EUV/XUV-излучение, солнечное L_{α} излучение, оккультационные измерения атмосферы Земли.

Диапазон жесткого ультрафиолетового (EUV) и мягкого рентгеновского излучения (XUV) Солнца является очень интересным и одновременно чрезвычайно сложным для изучения. В 90-х гг. прошлого века произошел технологический прорыв

Котов Юрий Дмитриевич — директор ИАФ НИЯУ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: kotov@mephi.ru

Кочемасов Алексей Викторович — инженер. E-mail: kochemasov@rambler.ru.

Глянченко Александр Степанович — заведующий научно-исследовательским сектором, канд. физ.-мат. наук. E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ НИЯУ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Архангельский Андрей Игоревич — научный сотрудник. E-mail: angel1966@list.ru.

в области создания аппаратуры, предназначенной для работы с излучением в данной области.

Новые высокочувствительные радиационностойкие детекторы и рентгеновская оптика нашли применение во множестве спутниковых экспериментов, направленных на изучение Солнца. Наряду со сложными солнечными спектрометрами и телескопами в этих экспериментах достаточно широко используются сравнительно простые приборы — фильтровые радиометры (Bailey et al., 2000; Woods et al., 2005a, b; Viereck, Hanser, 2000; Hochedez et al., 2006; Nusinov et al., 2005). Хотя радиометры не способны строить ни детальные спектры, ни изображения Солнца, ряд особенностей позволяет им оставаться востребованными. Помимо относительной простоты аппаратуры эти особенности заключаются в высоком временном разрешении (< 1 с), возможности работы в сложном для спектрометров диапазоне $\sim 1...10$ нм, абсолютной предполетной калибровке детекторов. Кроме того, для задач физики верхней атмосферы Земли, на которую сильно воздействует EUV/XUV-излучение, построение изображения Солнца не требуется, необходимо знать только плотность потока излучения.

Аппаратура

Прибор ФОКА (рис. 1) представляет собой типичный фильтровый радиометр EUV/XUV-диапазона. ФОКА имеет семь каналов регистрации, которые разбиты на две группы. Каналы основной группы постоянно открыты, в то время как идентичные им калибровочные каналы открываются приблизительно один раз в две недели для проведения полетной калибровки. Список каналов и соответствующих им диапазонов чувствительности приведен в таблице. Оптический канал № 1 является вспомогательным, он не калиброван и у него отсутствует дублер в калибровочной группе. Канал № 6 (и соответственно идентичный ему № 5) имеет две области чувствительности: 0,5...7 и 27...37 нм, которые дают приблизительно равный вклад в сигнал.

В качестве детекторов в приборе ФОКА (см. рис. 1) используются кремниевые фотодиоды серии AXUV, специально созданные для работы в EUV/XUV-диапазоне (Gullikson et al., 1996; IRD...). Они имеют высокую чувствительность в рабочем диапазоне и достаточно высокую радиационную стойкость,



Рис. 1. Прибор ФОКА (блок детекторов)

Каналы прибора ФОКА

Номер канала (краткое обозначение)	Фильтр — номинальная толщина, нм	Подавление видимого света — вклад фона в полный сигнал для минимума солнечной активности	Диапазон, нм	Комментарий
<i>Основные каналы</i>				
1 (Optic)	Нет	—	155...1100	Технологический оптический канал
3 (L_{α})	Интерференционные фильтры	$3 \cdot 10^8$ — 21 %	116...125	Канал L_{α}
6 (Cr/Al)	Cr/Al — 100/200	10^8 — 35 %	0,5...7 и 27...37	Напыленный фильтр на диод
7 (Ti/Pd)	Ti/Pd — 200/100	$5 \cdot 10^7$ — 52 %	0,5...11	То же
<i>Калибровочные каналы</i>				
2 (L_{α} кал.)	Интерференционные фильтры	$3 \cdot 10^8$ — 25 %	116...125	Канал L_{α}
5 (Cr/Al кал.)	Cr/Al — 100/200	$3 \cdot 10^7$ — 65 %	0,5...7 и 27...37	Напыленный фильтр на диод
4 (Ti/Pd кал.)	Ti/Pd — 200/100	10^7 — 86 %	0,5...11	То же

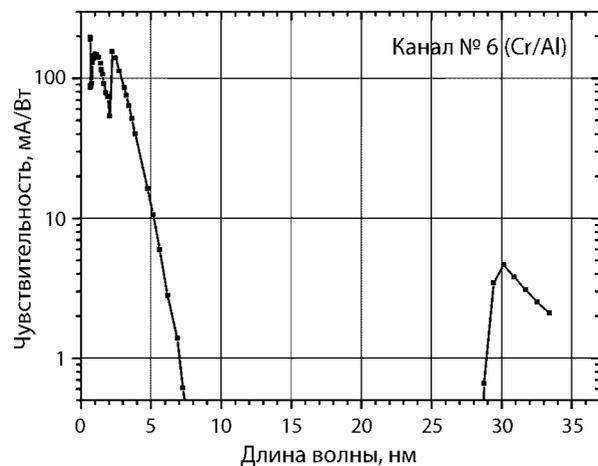


Рис. 2. Спектральная чувствительность канала № 6 Cr/Al

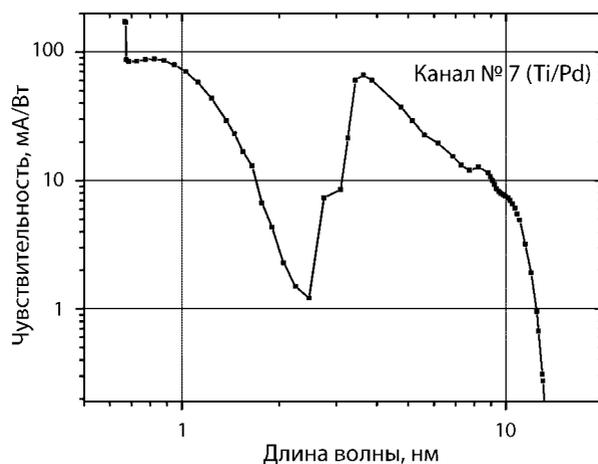


Рис. 3. Спектральная чувствительность канала № 7 Ti/Pd

благодаря чему нашли широкое применение на синхротронах и в космических экспериментах. Фотодиоды работают в паре с фильтрами, которые формируют спектральную чувствительность и обеспечивают подавление интенсивного видимого света на 7...8 порядков. Для каналов № 6, 7, 5, 4 фильтры представляют собой напыленные на поверхность фотодиодов тонкие

металлические слои толщиной ~ 300 нм (см. таблицу на с. 121). В каналах L_{α} перед фотодиодами последовательно установлены два интерференционных фильтра.

Фотодиоды прибора перед запуском были откалиброваны на синхротронных источниках в рабочих диапазонах длин волн. Их абсолютные спектральные характеристики приведены на рис. 2, 3. Калибровка фотодиодов для каналов L_{α} в сборе с фильтрами была проведена во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), остальных — в национальном метрологическом институте Германии (PTB). Погрешность проведенной калибровки не хуже 10 % для всех длин волн.

Интенсивное длинноволновое излучение Солнца (прежде всего — видимый свет, а также ближний УФ и ближний ИК) создает фоновую засветку каналов, вклад которой сопоставим по величине с полезным сигналом. Для учета уровня фоновой засветки прибор оснащен вращающимся колесом с фильтрами из плавленого кварцевого стекла, пропускающего порядка 93 % длинноволнового излучения и полностью поглощающего излучение EUV/XUV-диапазона. В положении колеса с надвинутыми стеклами прибор измеряет уровень фоновой засветки. Учитывая высокую стабильность потока солнечного излучения в длинноволновой области спектра, фоновый сигнал не зависит от активности Солнца и остается практически неизменным. Колесо позволяет также открывать и закрывать основные и калибровочные каналы по командам с Земли для определения стабильности основных детекторов прибора.

Результаты первого этапа работы

28 февраля 2009 г. после четырехнедельной дегазации спутника прибор был включен и приступил к измерениям.

Основное внимание на самом первом этапе работы прибора ФОКА было обращено на работоспособность аппаратуры и ее основные характеристики. Ниже сформулированы основные результаты первого этапа работы.

- Прибор успешно преодолел этап выведения спутника на орбиту. Разовая защитная крышка блока детекторов открылась. Все системы прибора (электроника и механизм поворота колеса кварцевых фильтров) работают штатно.

- Температура внутри прибора находится в пределах нормы.
- Фоновый сигнал в каналах от длинноволнового излучения (ближнего УФ, видимого света и ближнего ИК) сопоставим даже со слабым полезным сигналом при очень спокойном Солнце, и его учет не составляет большого труда и не вносит большой погрешности в измерения полезного сигнала (фактические коэффициенты подавления длинноволнового излучения для каналов прибора, а также вклад видимого света в полный сигнал каналов приведены в таблице на с. 121). Приведенный вклад видимого света в сигнал получен для излучения Солнца, находящегося в глубоком минимуме активности. По мере повышения активности этот вклад будет уменьшаться.
- Значения измеряемых сигналов в каналах находятся в рабочих диапазонах прибора и близки к ожидаемым величинам. Каналы Ti/Pd и Cr/Al прибора имеют запас динамического диапазона ~ 200 раз по отношению к излучению спокойного Солнца в минимуме активности. По оценкам, подобного запаса должно хватить для регистрации самых больших вспышек X-класса без входа детекторов в режим насыщения.
- Солнце находится в поле зрения во всех каналах.
- Фоновый сигнал от воздействия магнитосферных заряженных частиц локализован в относительно небольших временных интервалах при пролете спутника через приполярные области и Южно-Атлантическую Аномалию.
- Шумы сигналов незначительны и находятся в пределах единиц младшего разряда АЦП.
- Подтверждена способность прибора проводить оккультационные измерения атмосферы Земли. В оккультационных профилях каналов Ti/Pd и Cr/Al присутствуют участки, позволяющие напрямую определять вклад фонового сигнала от видимого света и темного тока в общий сигнал канала. Значения фоновых сигналов, полученные из оккультационных профилей, хорошо согласуются со значениями, измеренными с использованием кварцевых фильтров.
- Для каналов № 6 и 5 (Cr/Al), имеющих две области чувствительности, установлена возможность отделять вклад

в сигнал излучения диапазона 0,5...7 нм от вклада диапазона 27...37 нм по оккультационным наблюдениям для спокойного Солнца.

- Проведены измерения излучения Солнца в фазе глубокого минимума активности. Поток солнечного излучения в линии L_{α} (приведенный к 1 а. е.), измеренный прибором ФОКА 28.02.2009 г., составил $0,0057 \text{ Вт/м}^2$ с оцениваемой точностью не хуже 15 %. Данное значение хорошо согласуется со значением $0,00577 \text{ Вт/м}^2$, измеренным прибором SOLSTICE, установленным на американском спутнике SORCE для той же даты (Интерактивный...).
- 26 марта 2009 г. на Солнце произошли друг за другом три вспышки. Прибор ФОКА отчетливо зарегистрировал повышение потоков в каналах № 6 и 7 (рис. 4). В канале L_{α} повышение потока не отмечено.

В целом прибор ФОКА полностью работоспособен и с него получены научные данные хорошего качества. Дополнительную информацию о приборе можно найти на сайте проекта «КОРОНАС-ФОТОН» по адресу <http://www.coronas-photon.ru>.

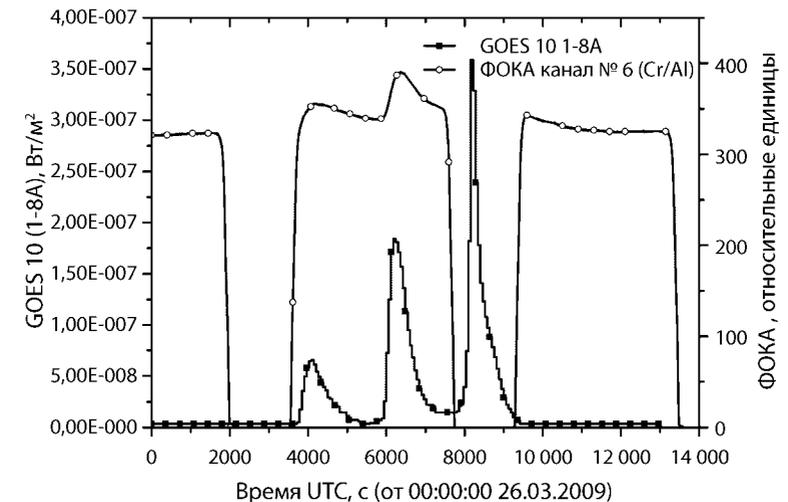


Рис. 4. Солнечная активность 26.03.2009, зарегистрированная прибором ФОКА

Литература

Интерактивный центр данных по солнечному излучению лаборатории LASP, [Электрон. и текстовые данные]. Режим доступа: <http://lasp.colorado.edu/lisird>.

Bailey S. M., Woods T. N., Barth C. A., Solomon S. C., Canfield L. R., Korde R. (2000) Measurements of the Solar Soft X-ray Irradiance from the Student Nitric Oxide Explorer: First Analysis and Underflight Calibrations // *J. Geophysical Research*. 2000. V. 105. P. 27179.

Gullikson E. M., Korde R., Canfield L. R. et al. (1996) Stable Silicon Photodiodes for Absolute Intensity Measurements in the VUV and Soft X-Ray Regions // *J. Elec. Spec. Rel. Phen.* 1996. V. 80. P. 313–316.

Hochedez J.-F. et al. (2006) LYRA, a Solar UV Radiometer on Proba2 // *Advances in Space Research*. 2006. V. 37. P. 303–312.

IRD, IRD [Электрон. и текстовые данные]. Режим доступа: <http://www.ird-inc.com>.

Nusinov A. A., Kazachevskaya T. V. et al. (2005) Measurement of Extreme Ultraviolet Solar Radiation in Different Wavelength Intervals Onboard the CORONAS Satellites: Instruments and Main Results // *Solar System Research*. 2005. V. 39. N. 6. P. 470–478.

Viereck R. A., Hanser F. (2000) EUVS: An Instrument to be Flown on the GOES Spacecraft // *Phys. Chem. Earth*. 2000. V. 25. P. 379–381.

Woods T. N., Eparvier F. G., Bailey S. M., Chamberlin P. C., Lean J., Rottman G. J., Solomon S. C., Tobiska W. K., Woodraska D. L. (2005a) The Solar EUV Experiment (SEE): Mission Overview and First Results // *J. Geophysical Research*. 2005. V. 110. P. A01312.

Woods T. N., Rottman G., Vest R. (2005b) XUV Photometer System (XPS): Overview and Calibrations // *Solar Physics*. 2005. V. 230. P. 345–374.

bands 0.5...11 nm, (0.5...7)&(27...37) nm and bright Ly- α hydrogen line 121,6 nm. Absolute calibration of the channels was carried out before launch. Instrument PHOKA was switched on February 19, 2009. During the first stage of the experiment important information about functionality and parameters of the instrument, behavior of signals in channels and levels of background illuminations were obtained. Radiation of quiet Sun in solar minimum was measured and first small solar flares were registered.

Also we have obtained occultation profiles of radiation absorption by Earth's atmosphere.

Keywords: CORONAS-PHOTON, Solar EUV/XUV irradiation, Solar Ly- α radiation, Occultation measurements of Earth's atmosphere.

Kotov Yury Dmitrievich — Director of the Astrophysics Institute NRNU MPhI, Ph. D. E-mail: kotov@mephi.ru.

Kochemasov Alexey Viktorovich — Engineer. E-mail: kochemasov@rambler.ru.

Glyanenko Alexander Stepanovich — Head of the group, Ph. D. E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy director of the Astrophysics Institute MPhI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Arkhangelsky Andrey Igorevich — Scientist. E-mail: angel1966@list.ru.

FIRST RESULTS OF PHOKA EXPERIMENT ON SOLAR EUV/XUV IRRADIANCE REGISTRATION

Yu. D. Kotov, A. V. Kochemasov, A. S. Glyanenko, V. N. Yurov

*Moscow Engineering Physics Institute (MPhI), Moscow (from 07.2009 —
National Research Nuclear University "MEPhI" (NRNU MPhI),
Astrophysics Institute MPhI, Moscow*

Instrument PHOKA intended for measuring interesting and important solar EUV/XUV radiation is placed onboard CORONAS-PHOTON satellite launched January 31, 2009. Instrument has three primary channels with sensitivity spectral

ЭКСПЕРИМЕНТ «КОНУС-РФ» ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ: ПЕРВЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**М. В. Уланов¹, Р. Л. Аптекарь¹, С. В. Голенецкий¹,
Е. П. Мазец¹, Ф. П. Олейник¹, В. Д. Пальшин¹, Д. С. Свинкин¹,
Д. Д. Фредерикс¹, Ю. Д. Котов², В. Н. Юров²**

¹ *Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А. Ф. Иоффе), Санкт-Петербург*

² *Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)),
Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва*

Научная аппаратура «КОНУС-РФ» — сцинтилляционный гамма-спектрометр, предназначенный для исследования с высоким временным разрешением кривых блеска, энергетических спектров и спектральной переменности вспышек жесткого рентгеновского и гамма-излучения Солнца и космических гамма-всплесков в широкой области энергий — 10 кэВ...10 МэВ.

Научная программа эксперимента «КОНУС-РФ» успешно выполнялась с момента включения аппаратуры в феврале 2009 г. За период февраль — июнь 2009 г. были зарегистрированы и исследованы 40 космических гамма-всплесков и 6 всплесков от мягких гамма-репитеров. Проявлений солнечной активности в диапазоне 10 кэВ...10 МэВ за этот период не отмечалось.

Одновременные наблюдения аппаратурой «КОНУС-РФ» и «КОНУС-ВИНД» на двух космических аппаратах позволили получить более подробную информацию о регистрируемых всплесках.

Ключевые слова: гамма-спектрометр, космические гамма-всплески, солнечные вспышки, мягкие гамма-репитеры.

Уланов Михаил Владимирович — младший научный сотрудник. E-mail: ulanov@mail.ioffe.ru.

Аптекарь Рафаил Львович — ведущий научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: aptekar@mail.ioffe.ru.

Голенецкий Сергей Владимирович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: golen@mail.ioffe.ru.

Мазец Евгений Павлович — заведующий лабораторией, д-р физ.-мат. наук, член-кор. РАН. E-mail: mazets@mail.ioffe.ru.

Олейник Филипп Петрович — младший научный сотрудник. E-mail: oleynik.phil@mail.ioffe.ru.

Пальшин Валентин Дмитриевич — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: val@mail.ioffe.ru.

Свинкин Дмитрий Сергеевич — аспирант. E-mail: svinkin@mail.ioffe.ru.
Фредерикс Дмитрий Дмитриевич — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: fred@mail.ioffe.ru.
Котов Юрий Дмитриевич — директор ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: kotov@mephi.ru.
Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Введение

В комплексном исследовании солнечной активности в рамках проекта «КОРОНАС-ФОТОН» детальные измерения с высоким временным разрешением кривых блеска, энергетических спектров и спектральной переменности вспышек жесткого рентгеновского излучения Солнца играют важную роль, поскольку связаны с основными, существенными процессами трансформации электромагнитной энергии в ходе вспышек. Лаборатория экспериментальной астрофизики Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) имеет многолетний опыт успешного исследования космического гамма-излучения в широкой области энергий — 10 кэВ...10 МэВ, в том числе и гамма-излучения солнечных вспышек.

Большой объем наблюдательных данных о вспышках жесткого рентгеновского излучения как космического, так и солнечного происхождения был накоплен в 1978–1982 гг. в исследованиях с аппаратурой «КОНУС» на межпланетных станциях «Венера-11–14». В последующие годы аппаратура ФТИ устанавливалась на космических аппаратах «Космос-2326, -2367 и -2421». Усовершенствованная аппаратура «ГЕЛИКОН» на солнечной обсерватории «КОРОНАС-Ф» в 2001–2005 гг. зарегистрировала свыше 100 интенсивных солнечных вспышек (Ораевский, Собельман, 2002; Kuznetsov et al., 2004). В настоящее время вот уже 15 лет продолжается российско-американский эксперимент «КОНУС-ВИНД» (Aptekar et al., 1995). В оптимальных условиях межпланетного пространства при отсутствии помех от радиационных поясов и затенения Землей было зарегистрировано свыше 3000 гамма-всплесков и большое количество солнечных вспышек как в условиях спокойного Солнца, так и во время его повышенной активности.

Исследования космических гамма-всплесков являются одним из самых актуальных и активно развивающихся направ-

лений астрофизики и космической астрономии. В 1997 г. с помощью европейского спутника Верро-SAX было установлено, что источники всплесков находятся на космологических расстояниях, это привело к оценкам энергии всплесков на уровне $10^{52} \dots 10^{54}$ эрг. Механизм генерации таких экстремальных потоков электромагнитного излучения в источниках гамма-всплесков остается одной из наиболее острых нерешенных проблем астрофизики. Основное направление — комплексные всеволновые исследования источников гамма-всплесков с космических аппаратов и с помощью широкой сети космических и наземных радио- и оптических телескопов.

В настоящее время на орбите работает целый ряд приборов для исследования гамма-всплесков, установленных на американских обсерваториях Swift и Fermi и на европейских обсерваториях INTEGRAL и AGILE. Основным инструментом, обеспечивающим быструю и точную локализацию гамма-всплесков и передачу этой информации на Землю для проведения многоволновых наблюдений, является гамма-телескоп BAT обсерватории Swift. Однако его рабочий диапазон ограничен областью низких энергий (15...150 кэВ). Аппаратура ФТИ «КОНУС-ВИНД» на космическом аппарате Wind в настоящее время работает в диапазоне 20 кэВ...15 МэВ, а «КОНУС-РФ» на аппарате «КОРОНАС-ФОТОН» функционировал в диапазоне 10 кэВ...10 МэВ.

Необходимость совместных наблюдений космических гамма-всплесков приборами, работающими в разных диапазонах энергии, стала весьма актуальной. Такие всеволновые наблюдения от радио- до жесткого рентгеновского излучения позволяют оценить масштаб выделения энергии в источниках, находящихся на космологических расстояниях. Примером эффективности таких всеволновых комплексных исследований явились результаты наблюдений гамма-всплесков 20 августа 2005 г. (Vestrand et al., 2005) и 19 марта 2008 г. (Racusin et al., 2008), которые в гамма-излучении опираются на данные, полученные в эксперименте «КОНУС-ВИНД».

Другим примером эффективности таких синхронных наблюдений являются данные о гигантской вспышке гамма-репитера SGR1806–20, полученные в экспериментах «КОНУС-ВИНД» и «ГЕЛИКОН» (Фредерикс и др., 2007). Огромный поток рентгеновского и гамма-излучения в узком начальном импульсе

вспышки приводит к практически мгновенному глубокому насыщению гамма-детекторов, что исключает возможность непосредственного измерения интенсивности, временного хода и энергетического спектра начального импульса. При этом исключительно благоприятной оказалась регистрация гамма-спектрометром «ГЕЛИКОН» на спутнике «КОРОНАС-Ф» ослабленного сигнала обратного комптоновского рассеяния начального импульса вспышки Луной. От прямого облучения начальным импульсом детекторы «ГЕЛИКОН» были экранированы Землей. Обработка этого сигнала позволила впервые получить надежные временные, энергетические и спектральные характеристики начального импульса гигантского всплеска. Эти данные представляют собой первый в мировой практике пример наблюдения природной импульсной локации небесного тела посредством гамма-лучей.

1. Методика регистрации солнечных вспышек и космических гамма-всплесков в эксперименте «КОНУС-РФ»

Научная аппаратура эксперимента «КОНУС-РФ» представляет собой сцинтилляционный гамма-спектрометр, состоящий из двух идентичных детекторов гамма-квантов и блоков электроники. В каждом детекторе (рис. 1) спектрометрический сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) диаметром 130 мм и высотой 75 мм помещен в тонкостенный алюминиевый контейнер с бериллиевым входным окном и выходным окном из свинцового стекла высокой прозрачности для защиты от фона космического аппарата в мягкой области спектра. Такой детектор обеспечивает низкий энергетический порог регистрации излучения — от 10 кэВ, диапазон регистрации гамма-квантов до 10 МэВ с энергетическим разрешением 8,5...9,0 % на линии 660 кэВ ^{137}Cs и чувствительность обнаружения всплесков на уровне $\sim 10^{-7}$ эрг/см². Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) детекторов защищены специальными экранами, устраняющими влияние магнитного поля Земли при движении космического аппарата по орбите. В аппаратуре имеется также система подавления вспышек, вызванных прохождением через детектор многозарядных ядер космических лучей, и всплесков, связанных с прохождением радиационных поясов. Такая система позволяет эффективно предотвращать переполнение емкости

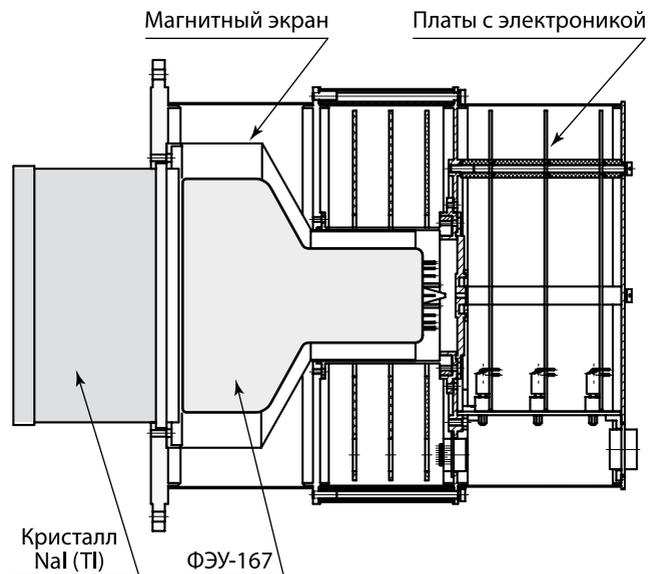


Рис. 1. Конструкция детектора «КОНУС-РФ-Д»

запоминающего устройства бесполезной информацией и обеспечивает оптимальное использование его квот в ходе выполнения летной программы эксперимента.

Эксперимент «КОНУС-РФ» проводился на новой солнечной космической обсерватории «КОРОНАС*-ФОТОН», запущенной 30 января 2009 г. на околоземную орбиту с наклоном $82,5^\circ$ и удалением от Земли 547...592 км. Космический аппарат стабилизирован относительно оси, направленной на Солнце, с точностью несколько угловых мин. Детекторы «КОНУС-РФ» размещены на космическом аппарате таким образом, что ось поля зрения одного из них ориентирована на Солнце, а второго — в противоположном направлении. Тем самым обеспечивался обзор всей области небесной сферы, не затененной Землей.

Измерительные тракты солнечного и антисолнечного детекторов аппаратуры «КОНУС-РФ» функционировали полностью независимо. Информация от двух детекторов выводилась в

* КОРОНАС — Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца.

два разных цифровых источника системы сбора и регистрации научной информации (ССРНИ).

Организация измерений характеристик гамма-всплесков в эксперименте «КОНУС-РФ» является развитием подходов и методов, использованных в эксперименте «КОНУС-ВИНД». Она характеризуется значительно большей информативностью благодаря использованию в аппаратуре современной элементной базы на основе сигнальных цифровых процессоров, прецизионных аналого-цифровых преобразователей с малым «мертвым» временем и микросхем оперативной памяти большой емкости.

Аппаратура «КОНУС-РФ» постоянно измеряла фон космического гамма-излучения в режиме «Фон». При резком увеличении интенсивности регистрируемого излучения включался режим «Всплеск» для более детального измерения спектров и временных историй.

В режиме «Фон» в каждом детекторе измерялась интенсивность космического гамма-излучения в двенадцати энергетических интервалах в диапазоне энергий 10 кэВ...1 МэВ с временем накопления 1 с и в десяти энергетических интервалах в диапазоне энергий 280 кэВ...10 МэВ с временем накопления 4 с. Одновременно измерялись спектры излучения в двух энергетических диапазонах — 10 кэВ...1 МэВ и 280 кэВ...10 МэВ, которые были разбиты на 112 и 154 квазилогарифмических канала соответственно. Время накопления спектров в режиме «Фон» — 1 мин.

В режиме «Всплеск» интенсивность излучения определялась в тех же энергетических интервалах с временным разрешением от 2 до 64 мс. Многоканальные спектры в режиме «Всплеск» измерялись в тех же энергетических диапазонах, что и в режиме «Фон», но с временным разрешением от 100 мс до 2 с. Общее время программы «Всплеск» — 115 с, первые две секунды — предыстория.

2. Методика восстановления энергетических спектров солнечных вспышек и гамма-всплесков

Для восстановления фотонных спектров падающего излучения по измеренным спектрам потерь энергии используется пакет программ XSPEC v.12.5.0. Регистрируемое спектральное

тром энерговыделение (отклик детектора) зависит только от угла падения фотона на детектор и его энергии. Матрица отклика детектора была рассчитана с помощью пакета GEANT4 (Agostinelli et al., 2003) для 225 энергий падающих гамма-квантов на квазилогарифмической шкале от 5 кэВ до 16 МэВ, при углах падения от 0 до 90° с шагом 5°. Для заданного угла падения матрица отклика получается линейной интерполяцией матриц для ближайших углов. Спектры калибруются по линии ^{40}K 1460 кэВ и аннигиляционной линии 511 кэВ. Фоновые спектры формируются путем полиномиальной интерполяции спектров, измеренных до и после всплеска.

Константа мертвого времени равна 6 мкс, что соответствует предельной скорости счета $1,7 \cdot 10^5$ отсчетов/с. Поправка на мертвое время вводится стандартным образом путем вычисления так называемого «живого времени» измерения спектра, равного разности времени накопления спектра и мертвого времени, рассчитываемого как произведение константы мертвого времени на полное число накопленных отсчетов.

3. Первые научные результаты эксперимента «КОНУС-РФ»

Первое всплесковое событие было зарегистрировано аппаратурой «КОНУС-РФ» 27 февраля 2009 г. от аномального рентгеновского пульсара SGR/AXP1E1547.0–5408 (Golenetskii et al., 2009a). Его временной профиль приведен на рис. 2. Такой же интенсивный всплеск от этого источника наблюдался 22 марта 2009 г.

8 апреля 2009 г. был зарегистрирован исключительно интенсивный гамма-всплеск (Golenetskii et al., 2009b). Результаты его синхронных наблюдений в экспериментах «КОНУС-РФ» и «КОНУС-ВИНД» приведены на рис. 3. Данные наглядно демонстрируют высокую информативность эксперимента «КОНУС-РФ» по сравнению с экспериментом «КОНУС-ВИНД». Локализация всплеска была произведена методом триангуляции (рис. 4) с использованием прибора «КОНУС-РФ» (Golenetskii et al., 2009c).

Для проанализированных всплесков определены спектральные параметры, согласующиеся с данными, полученными в других экспериментах.

5 июня 2009 г. в синхронных наблюдениях гамма-спектрометра «КОНУС-РФ» и американских обсерваторий Swift и Fermi открыт новый источник мягких повторных всплесков — гамма-репитер SGR 0418+5729 (Van der Horst et al., 2009; Golenetskii et al., 2009d). Исследование гамма-репитеров позволяет изучать поведение вещества в экстремальном состоянии, не достижимом в лабораторных условиях: при сверхвысокой плотности и в сверхсильных магнитных полях. К началу июня 2009 г. достоверно было известно 6 гамма-репитеров, причем первые два из них были открыты 30 лет назад (в марте 1979 г.) в экспериментах «КОНУС» на межпланетных станциях «Венера-11, -12».

Первый всплеск от нового репитера был зарегистрирован синхронно аппаратурой «КОНУС-РФ», спектрометром GBM (Fermi) и телескопом BAT (Swift). Всплеск был исключительно коротким, длительностью около двадцати миллисекунд, и с мягким энергетическим спектром (рис. 5). Спустя 20 мин был зарегистрирован еще один всплеск со схожими характеристиками. Сопоставление локализации источников всплесков по данным триангуляционных измерений на трех космических аппаратах с результатами наземной обработки данных телескопа BAT и спектрометра GBM позволило установить, что они принадлежат одному и тому же ранее не известному галактическому источнику, получившему обозначение SGR 0418+5729. Важную роль в идентификации всплесков сыграла высокая чувствительность детекторов эксперимента «КОНУС-РФ» в мягкой области спектра. Следует отметить также оптимальную программу измерений временных характеристик гамма-всплесков, благодаря которой начальная стадия событий регистрируется спектрометром «КОНУС-РФ» с миллисекундным временным разрешением. 10 июня 2009 г. открытие нового репитера было подтверждено наблюдениями рентгеновского телескопа американской космической обсерватории RXTE.

Всего за время работы аппаратуры «КОНУС-РФ» с февраля по июнь 2009 г. были зарегистрированы и исследованы 40 космических гамма-всплесков и 6 всплесков от мягких гамма-репитеров. Результаты экспресс-обработки данных о гамма-всплесках оперативно публиковались в международных электронных бюллетенях GCN (Gamma-Ray Burst Coordinate Network) и выставлялись на сайте Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН.

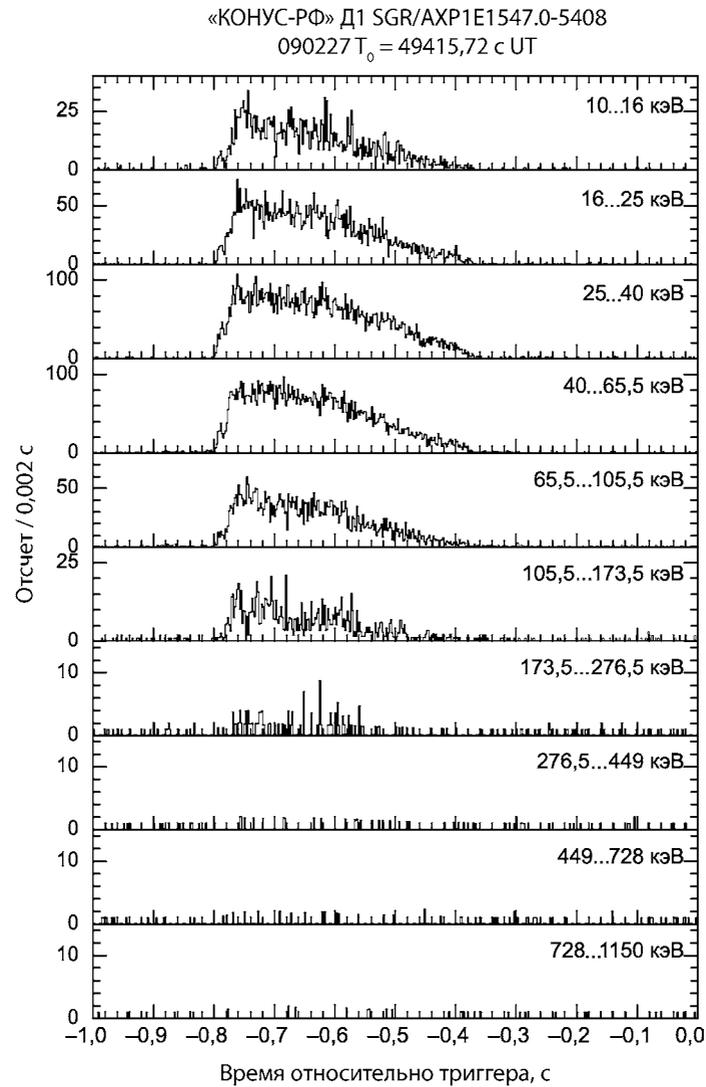


Рис. 2а. Регистрация аппаратурой «КОНУС-РФ» всплесков от аномального рентгеновского пульсара SGR/AXP1E1547.0-5408 27 февраля 2009 г. (первое всплесковое событие)

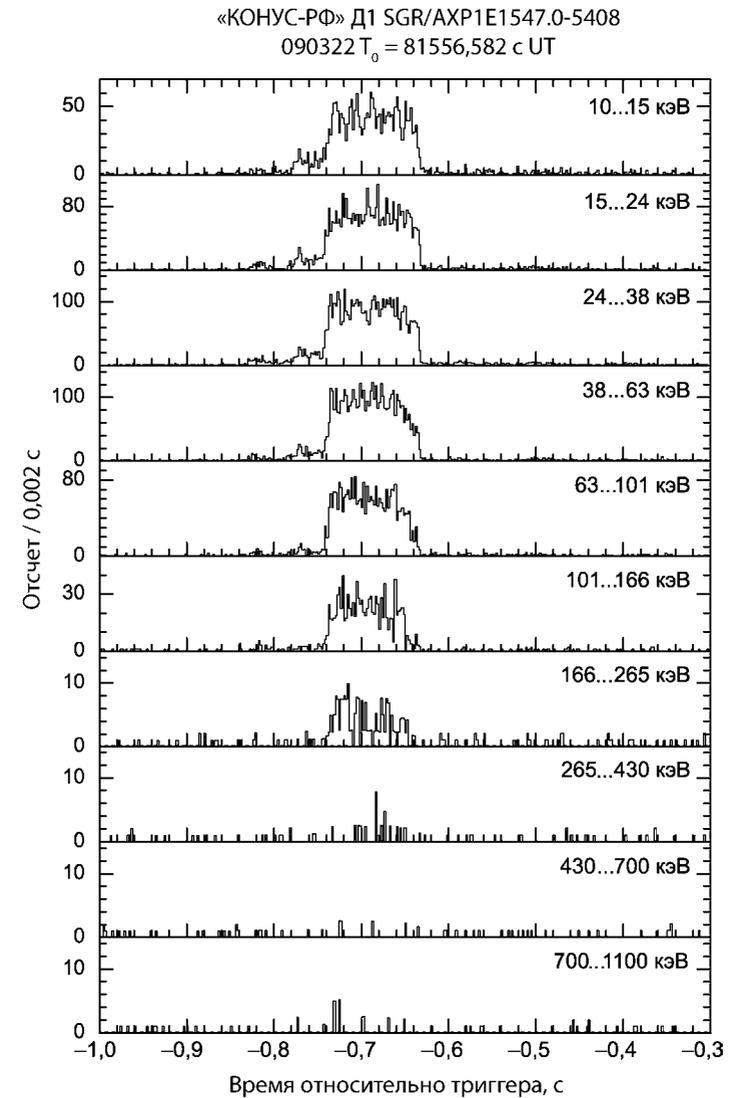


Рис. 2б. Регистрация аппаратурой «КОНУС-РФ» всплесков от аномального рентгеновского пульсара SGR/AXP1E1547.0-5408 22 марта 2009 г.

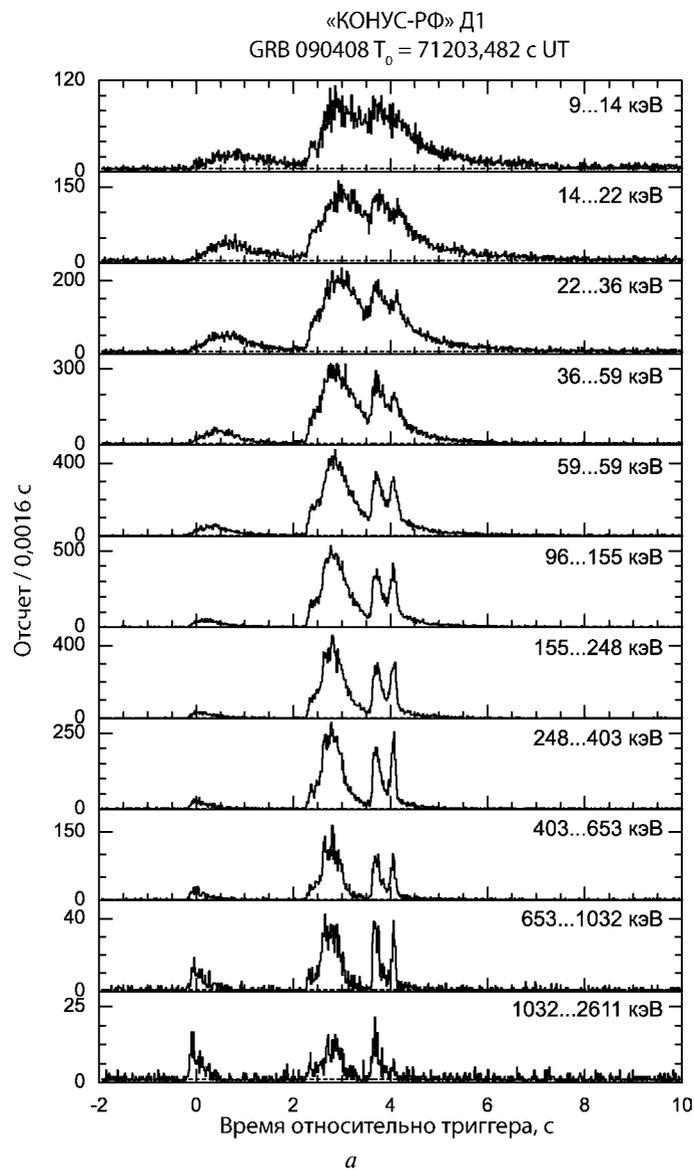


Рис. 3. Синхронные наблюдения в экспериментах «КОНУС-РФ» (а) и «КОНУС-ВИНД» (б) (на с. 138) исключительно интенсивного гамма-всплеска 8 апреля 2009 г.

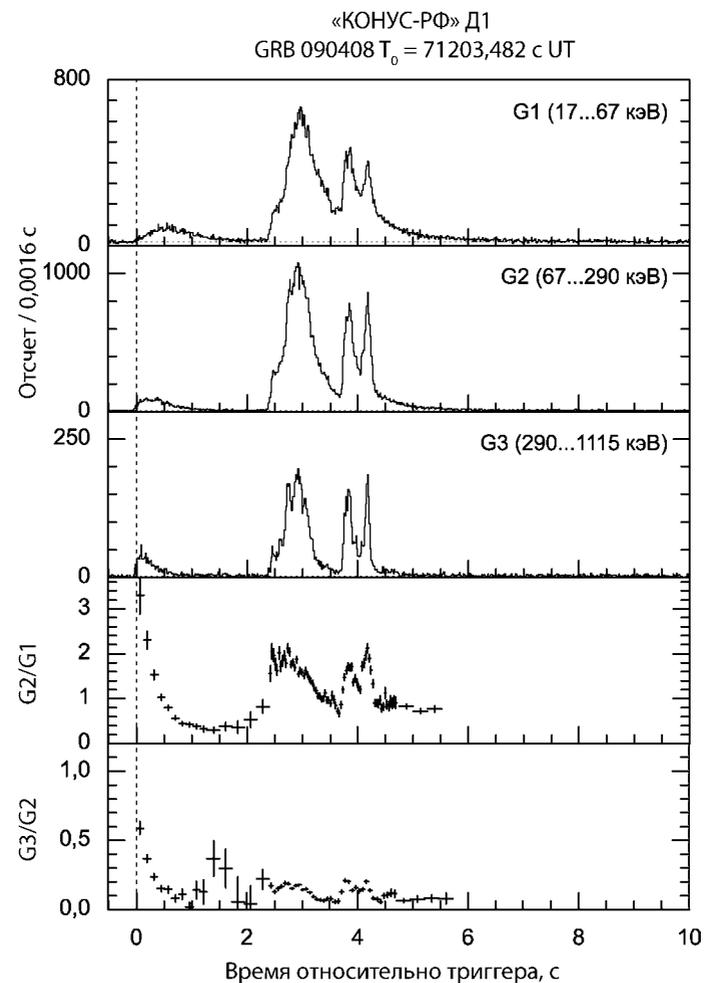


Рис. 3б

Литература

- Ораевский В. Н., Собельман И. И. (2002) Комплексные исследования активности Солнца на спутнике «КОРОНАС-Ф» // Письма в АЖ. 2002. Т. 28. № 6. С. 457–467.
- Фредерикс Д. Д., Голенецкий С. В., Пальшин В. Д., Антекарь Р. Л., Ильинский В. Н., Олейник Ф. П., Мазец Е. П., Клайн Т. Л. (2007)

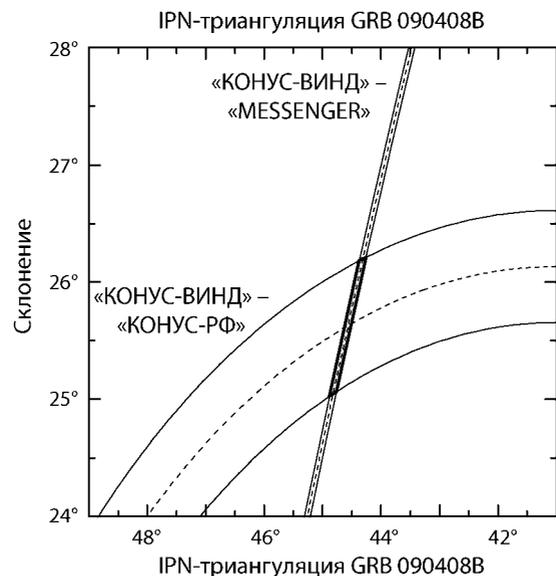


Рис. 4. Локализация источника гамма-всплеска GRB 090408B с использованием прибора «КОНУС-РФ». Пунктиром обозначены центральные линии триангуляционных колец, сплошными линиями — уровень ошибки 1

Гигантская вспышка в SGR 1806-20 и ее комптоновское отражение от Луны // Письма в АЖ. 2007. Т. 33. № 1. С. 3–21.

- Agostinelli S. et al. (2003) // NIM A. 2003. V. 506. P. 250–303.
 Aptekar R. L. et al. (1995) // Space Science Rev. 1995. V. 71. P. 265–272.
 Golenetskii S. et al. (2009a) // GCN, circular 8928. 2009.
 Golenetskii S. et al. (2009b) // GCN, circular 9121. 2009.
 Golenetskii S. et al. (2009c) // GCN, circular 9124. 2009.
 Golenetskii S. et al. (2009d) // GCN, circular 9500. 2009.
 Kuznetsov V. D., Charikov Yu. E., Kotov Yu. D., Kuznetsov S. N., Mazets E. P., Nusinov A. A., Pankov V. M., Sobelman I. I., Sylwester J. (2004) A Review of the Solar Results from CORONAS-F Satellite. Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity // Proc. IAU Symp. / Eds. A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev. 2004. N. 223. P. 357–366.
 Racusin J. L. et al. (2008) // Nature. 2008. V. 455. P. 183–188.
 Van der Horst A. J. et al. (2009) // GCN, circular 9499. 2009.
 Vestrand W. T. et al. (2005) // Nature. 2005. V. 435. P. 178–180.

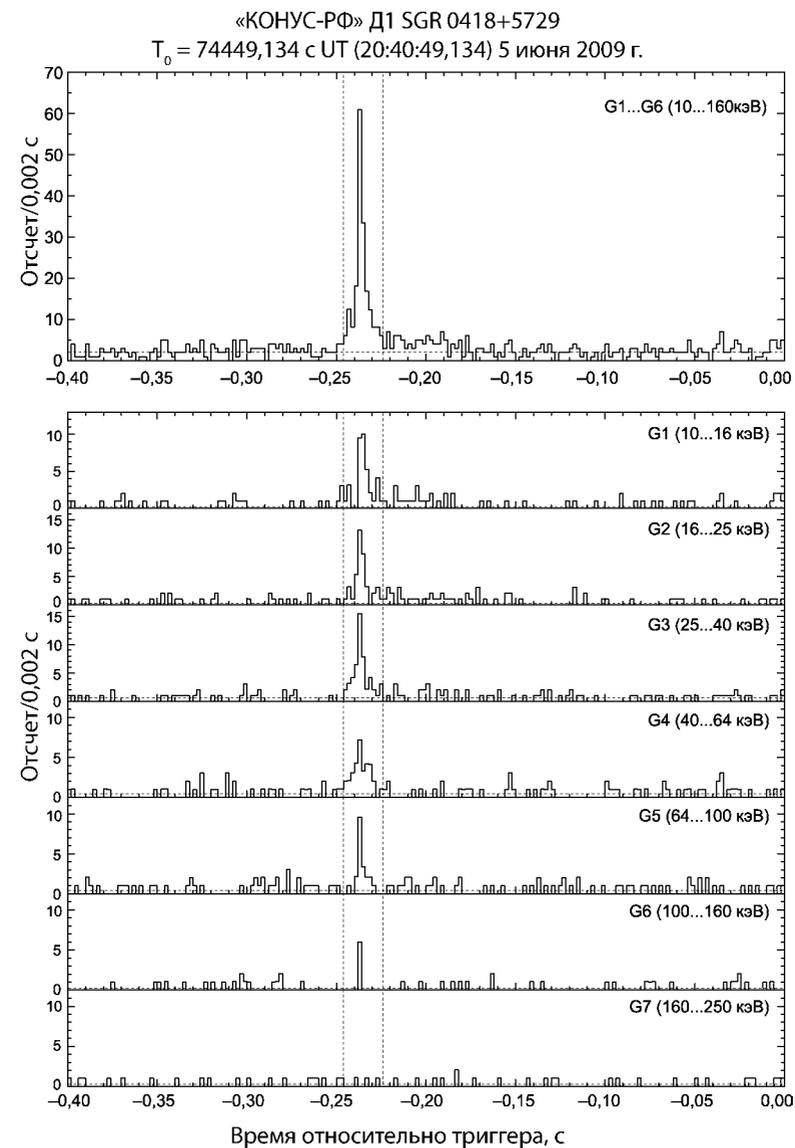


Рис. 5. Временные профили вспышки 5 июня 2009 г. нового гамма-репитера SGR 0418+5729

**KONUS-RF EXPERIMENT FOR STUDYING HARD X-RAY
AND GAMMA-RAY RADIATION OF SOLAR FLARES
AND GAMMA-RAY BURSTS: FIRST RESULTS**

**M. V. Ulanov¹, R. L. Aptekar¹, S. V. Golenetskii¹, E. P. Mazets¹, P. P. Oleynik¹,
V. D. Pal'shin¹, D. S. Svinkin¹, D. D. Frederiks¹, Yu. D. Kotov², V. N. Yurov²**

¹ *Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg*

² *Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 —
National Research Nuclear University "MEPhI" (NRNU MEPhI)),
Astrophysics Institute MEPhI, Moscow*

KONUS-RF instrument is a scintillation gamma-spectrometer designed for studying the light curves, energy spectra and spectral variability of hard X-ray and gamma-ray emission of solar flares as well as cosmic gamma-ray bursts with a high-resolution in a wide energy range — 10 keV...10 MeV.

The scientific program of the KONUS-RF experiment has been successfully carried out since the instrument was switched on in February, 2009. For the past period February — June, 2009 there were registered and investigated 40 gamma-ray bursts and 6 bursts from soft gamma-repeaters. A solar activity has not been noticed in the energy range — 10 keV...10 MeV during the period.

Simultaneous observations by the KONUS-RF and KONUS-WIND instruments onboard two spacecraft give the opportunity to obtain more detailed information on the events registered.

Keywords: gamma-spectrometer, gamma-ray bursts, solar flares, soft gamma repeaters.

Ulanov Mikhail Vladimirovich — Scientist. E-mail: ulanov@mail.ioffe.ru.
Aptekar Rafail Lvovich — Leading Scientist, Ph. D. E-mail: aptekar@mail.ioffe.ru.

Golenetskii Sergey Vladimirovich — Senior Scientist, Ph. D. E-mail: golen@mail.ioffe.ru.

Mazets Evgeny Pavlovich — Head of Laboratory, Doctor of Sciences. E-mail: mazets@mail.ioffe.ru.

Oleynik Philipp Petrovich — Scientist. E-mail: oleynik.phil@mail.ioffe.ru.

Pal'shin Valentin Dmitrievich — Senior Scientist, Ph. D. E-mail: val@mail.ioffe.ru.

Svinkin Dmitry Sergeevich — Postgraduate Student. E-mail: svinkin@mail.ioffe.ru.

Frederiks Dmitry Dmitrievich — Senior Scientist, Ph. D. E-mail: fred@mail.ioffe.ru.

Kotov Yury Dmitrievich — Director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: kotov@mephi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy Director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

**БЫСТРЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ МОНИТОР (БРМ),
РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО ЭТАПА ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

**Ю. А. Трофимов, Ю. Д. Котов, В. Н. Юров, А. С. Глянченко,
Е. В. Федоровых, М. В. Бессонов**

*Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)),
Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва*

Приведены описание конструкции и характеристики прибора «Быстрый рентгеновский монитор» (БРМ), измеряющего поток рентгеновского излучения солнечных вспышек в диапазоне 20...600 кэВ с временным разрешением до 1 мс (в приборе используется $\text{YAlO}_3(\text{Ce})$ -сцинтиллятор, максимальная нагрузка до 10^6 событий в секунду, при 100 % мертвого времени, эффективная площадь детектора до 27 см^2). Описаны фоновые условия на орбите: потоки заряженных частиц радиационных поясов Земли (сопоставлены с данными прибора «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА»), резкие кратковременные изменения скорости счета. Приведены первые зарегистрированные события — гамма-всплески.

Ключевые слова: быстрый рентгеновский монитор, сцинтиллятор $\text{YAlO}_3(\text{Ce})$, потоки рентгеновского излучения солнечных вспышек, гамма-всплески.

Введение

Прибор БРМ («Быстрый рентгеновский монитор») входит в состав комплекса научной аппаратуры КА (космического аппарата) «КОРОНАС-ФОТОН».

Научными задачами эксперимента являются:

- измерение потока рентгеновских и гамма-квантов солнечных вспышек с энергией 20...600 кэВ;

Трофимов Юрий Алексеевич — инженер. E-mail: YuTrofimov@gmail.ru.

Котов Юрий Дмитриевич — директор ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: kotov@mephi.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Глянченко Александр Степанович — заведующий научно-исследовательским сектором, канд. физ.-мат. наук. E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Федоровых Евгений Владимирович — инженер.

Бессонов Михаил Владимирович — инженер. E-mail: mvbessonov@gmail.com.

- определение временного профиля солнечных вспышек и гамма-всплесков в диапазоне энергий 20...600 кэВ, разбитом на шесть каналов с временным разрешением до 1 мс.

1. Конструкция прибора

Прибор БРМ состоит из трех блоков: блока детектора БРМ-Д (устанавливается на внешней платформе КА), блока электроники БРМ-ЭМ (устанавливается внутри гермоотсека КА) и высоковольтного источника питания ВВИ-5М (устанавливается на внешней платформе КА) (рис. 1).

Блок БРМ-Д состоит из сцинтилляционного кристалла (алюмоиттриевый перовскит, активированный церием, $YAlO_3(Ce)$ или $YAP:Ce$), имеющего форму цилиндра диаметром 70 мм и высотой 10 мм, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), медного коллиматора и фронтальной электроники.



Рис. 1. Блоки прибора БРМ: а — БРМ-Д; б — ВВИ-5М

Сцинтиллятор $YAlO_3(Ce)$ обладает рядом преимуществ:

- малое время высвечивания, обеспечивающее высокую скорость счета детектора;
- достаточно большая плотность, позволяющая увеличить эффективность регистрации (для кристалла толщиной 1 см эффективность регистрации рентгеновского излучения энергией до 100 кэВ близка к 100 %, для энергии 600 кэВ эффективность снижается до 40 %);
- высокие механические характеристики, облегчающие работу с прибором.

Сравнение характеристик кристалла $YAlO_3(Ce)$ и кристалла $NaI(Tl)$ приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение характеристик сцинтилляторов $YAlO_3(Ce)$ и $NaI(Tl)$

Характеристики	$YAlO_3(Ce)$	$NaI(Tl)$
Время высвечивания, нс	27	250
Плотность, г/см ³	5,55	3,67
Гигроскопичность	Нет	Да
Относительный световыход, %	40	100
Максимум интенсивности в испускаемом спектре, нм	350	415

Сцинтиллятор «просматривается» с нижнего торца фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Оптический контакт между ними обеспечивается оптической смазкой ВС-630. Сцинтиллятор и ФЭУ детектора заключены в светонепроницаемый кожух из дюралюминия. Толщина алюминиевого экрана над детектором прибора $\sim 0,27$ г/см².

Над сцинтиллятором размещается коллиматор (рис. 2), собранный из медных пластин толщиной 1 мм. Размер ячейки 6×6 мм, высота — 85 мм. Коллиматор необходим для обеспечения надлежащего угла зрения прибора 6° .

Электроника блока БРМ-Д (рис. 3) включает предусилитель, блок дискриминаторов и систему стабилизации. Сигналы с ФЭУ, усиливаясь в предусилителе, поступают в блок дискриминаторов, где разделяются по амплитуде на шесть дифференциальных и два интегральных энергетических канала (табл. 2).

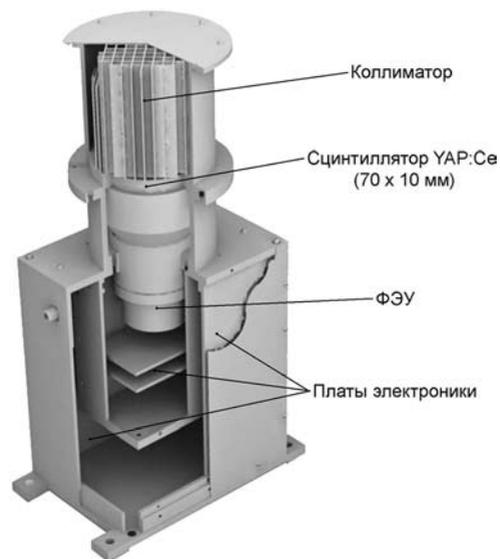


Рис. 2. Конструкция блока БРМ-Д

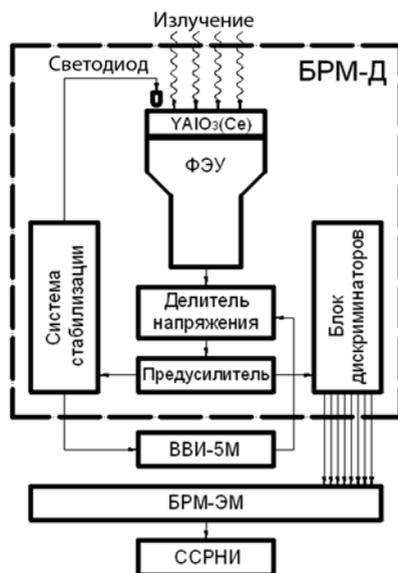


Рис. 3. Блок-схема прибора БРМ

С блока дискриминаторов по восьми отдельным линиям сформированные сигналы поступают в блок электроники БРМ-ЭМ. В данном блоке происходит пересчет сигналов в каждом канале за заданное время (время набора можно менять командой с Земли) и формирование информационных кадров для системы сбора и регистрации научной информации (ССРНИ); через БРМ-ЭМ осуществляется также питание и управление прибором БРМ. Система стабилизации основана на эталонном источнике светового сигнала. Она меняет напряжение питания ФЭУ (т. е. коэффициент его усиления), сохраняя постоянной амплитуду сигнала от светодиода.

Таблица 2. Энергетические диапазоны прибора БРМ

Номер канала	Диапазон, кэВ	Эффективная площадь, см ²
E1	20...30	16,7
E2	30...40	23,9
E3	40...50	26,3
E4	50...70	27,7
E5	70...130	27,0
E6	130...600	14,5
И7	20...600	—
И8	> 600	—

2. Характеристики прибора

Максимально возможная нагрузка прибора определяется: длительностью импульса после предусилителя, быстродействием блока дискриминаторов и длительностью импульса, сформированного блоком для пересчета интенсивностями. Время, необходимое для формирования одного импульса, составляет не более 1 мкс. Максимально возможная нагрузка прибора достигает 10^6 имп./с при 100 % мертвого времени или 10^5 имп./с при 10 % мертвого времени (что можно считать весьма «комфортной» нагрузкой). В полете максимальная нагрузка достигается в Южно-Атлантической Аномалии (ЮАА) и составляет примерно $6 \cdot 10^5$ имп./с, фоновый счет вне ЮАА и радиационных поясов достигает порядка 10^3 имп./с (рис. 4).

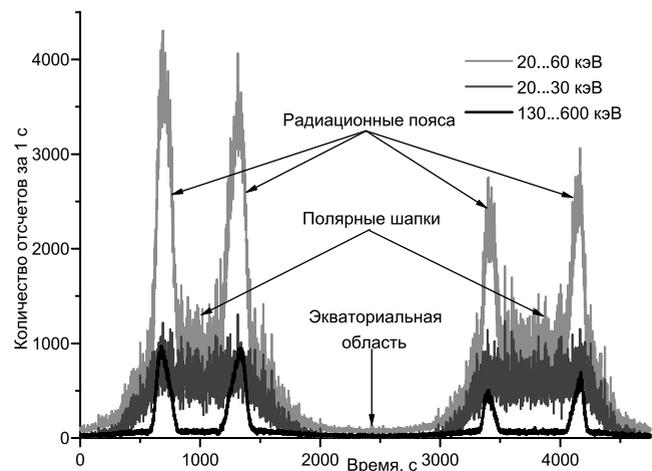


Рис. 4. Временной профиль фонового счета прибора БРМ за один виток

Интенсиметры прибора имеют два задаваемых параметра: «время набора интенсиметров» и «период опроса интенсиметров» (обычно оба параметра имеют одинаковые значения). Временное разрешение прибора определяется «периодом опроса интенсиметров» и может меняться командами с Земли в диапазоне 1...65 535 мс. В режиме с временным разрешением 1 мс прибор может работать не более 30 с, это время определяется скоростью информационного обмена с ССРНИ (не менее 3 мс для непрерывного измерения) и объемом памяти контроллера в блоке БРМ-ЭМ. Но и с временным разрешением 3 мс прибор не может работать непрерывно в силу ограниченности информационной квоты. БРМ работал в режиме непрерывных измерений с временным разрешением 10 мс.

В табл. 2 приведены энергетические диапазоны прибора и средняя эффективная площадь в каждом диапазоне. Эффективные площади получены с помощью моделирования потоков рентгеновских квантов с учетом влияния медного коллиматора.

3. Фоновые условия на орбите

В представленном на рис. 4 временном профиле фонового счета прибора за один виток время набора увеличено с 10 мс

до 1 с путем суммирования ста последовательных отсчетов. На рисунке отмечены различные участки орбиты: экваториальная область, области пересечения радиационных поясов и приполярные области. Для демонстрации характерных различий показаны три канала (20...600; 20...30 и 130...600 кэВ). В канале 130...600 кэВ резко возрастает скорость счета при пересечении радиационных поясов, тогда как в нижнем канале радиационные пояса слабо выражены, но отмечается повышенная скорость счета в полярных шапках, а также в канале 130...600 кэВ, но менее — заметна на фоне поясов (табл. 3). Сумма средних значений скорости счета всех каналов не совпадает со средним значением скорости счета канала 20...600 кэВ по двум причинам: во-первых, это средние значения, а во-вторых, для канала 20...600 кэВ используется отдельный интенсиметр.

Таблица 3. Средний счет в каналах прибора в различных областях орбиты

Е, кэВ	Экваториальная область, отсчетов/с	Полярная область, отсчетов/с
20...30	15	593
30...40	6	117
40...50	5	29
50...70	8	20
70...130	17	35
130...600	24	63
20...600	79	913
> 600	12	75

Для объяснения природы столь сложной структуры фона проводилось сравнение временных профилей счета приборов БРМ и анализатора заряженных частиц «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА», входящего в состав научной аппаратуры КА «КОРОНАС-ФОТОН» (рис. 5). Из рисунка можно заключить, что резкий рост скорости счета в канале 130...600 кэВ вызван электронами радиационных поясов с энергиями >1 МэВ, тогда как повышенный счет в полярных областях, скорее всего, связан с потоками протонов >4 МэВ. Резкий рост скорости счета в правой части графиков — начало ЮАА.

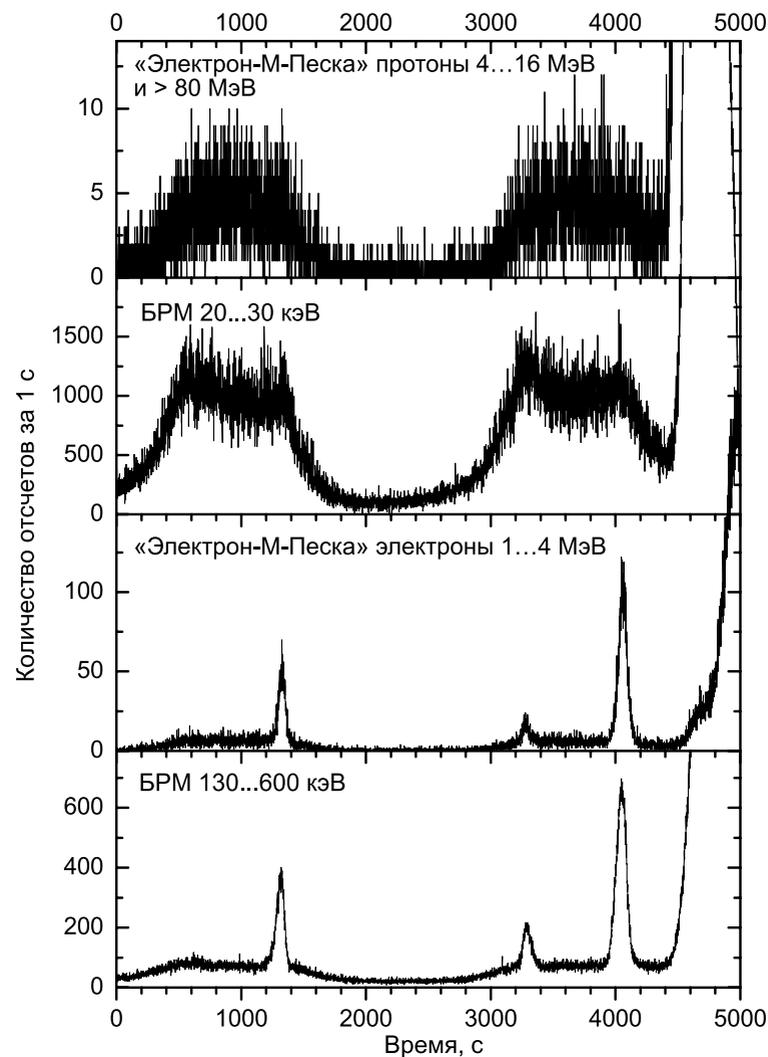


Рис. 5. Временной профиль счета приборов БРМ и «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА»

После переключения прибора в режим с временным разрешением 10 мс в данных, получаемых с прибора БРМ, стали наблюдаться выбросы (резкое увеличение скорости счета прибора в течение 1–2 наборов, см. серую линию, рис. 6) с частотой

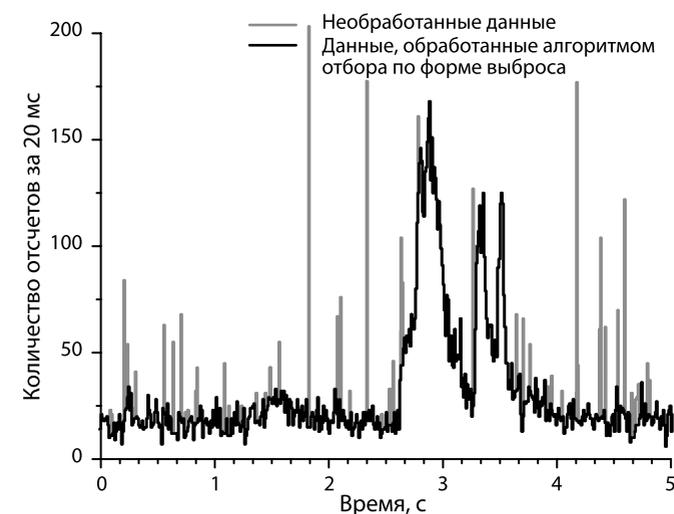


Рис. 6. Пример корректировки данных алгоритмом отбора по форме выбросов

в районе экватора примерно 6 выбросов в секунду. Выбросы могут быть связаны с прохождением через сцинтиллятор детектора высокоэнергичных протонов галактических космических лучей (на экваторе $E_p > 15$ ГэВ). Частоту появления выбросов подтверждает расчет потоков энергичных космических протонов в экваториальной области (расчет дает порядка пяти протонов в секунду через сцинтилляционный кристалл прибора).

Для корректировки данных прибора БРМ, с целью уменьшения влияния описанных выше выбросов на флуктуации счета в каналах и корректного отображения зарегистрированных событий, был внедрен ряд корректирующих алгоритмов. Целью алгоритмов является автоматизированное «удаление» нежелательных кратковременных выбросов без искажения данных, относящихся к регистрируемым событиям. При проведенном анализе было выбрано два наиболее удачных алгоритма, получивших названия «Алгоритм со скользящим средним» и «Алгоритм отбора по форме выброса». Результат обработки данных вторым алгоритмом представлен на рис. 6 на примере гамма-всплеска GRB090408, зарегистрированного прибором БРМ 8 апреля 2009 г.

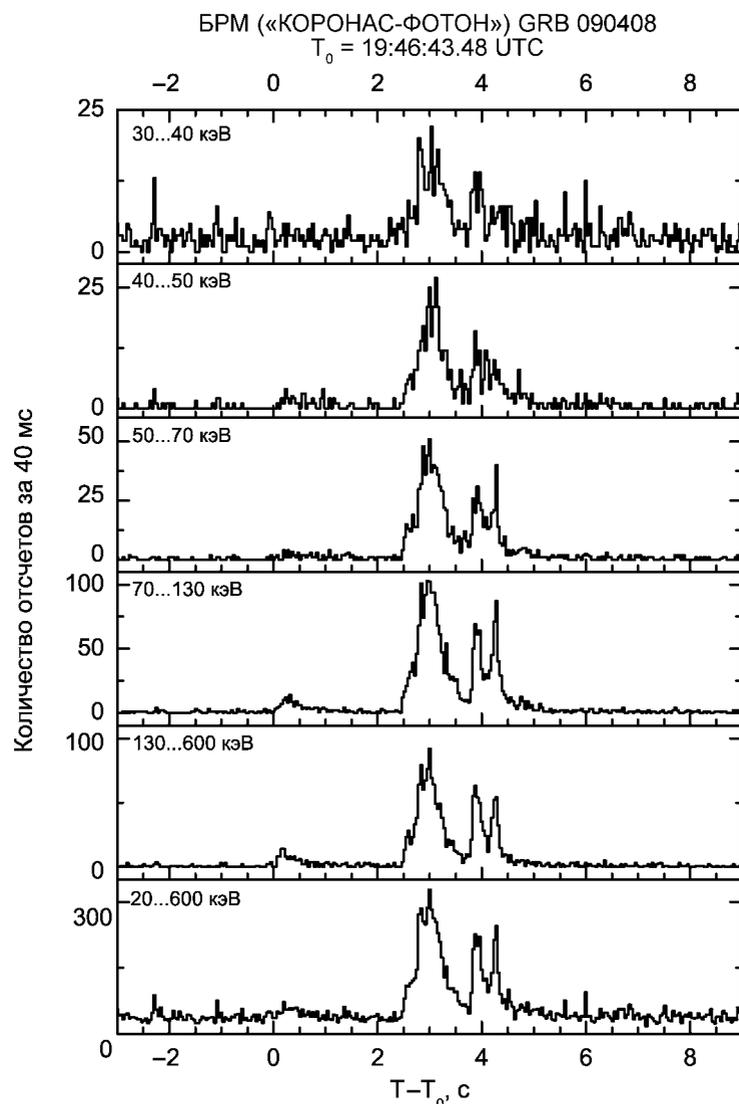


Рис. 7. Гамма-всплеск 8 апреля 2009 г.

4. Первые результаты измерений

Во время полета прибор БРМ проводил непрерывное измерение потока рентгеновского излучения в диапазоне энергий 20...600 кэВ с временным разрешением 10 мс. В качестве фона прибор также регистрировал потоки заряженных частиц радиационных поясов Земли (см. рис. 5).

В период с февраля по июнь 2009 г. прибор не зарегистрировал событий, связанных непосредственно с солнечными вспышками, из-за низкого уровня солнечной активности в измеряемом диапазоне энергий. События необходимой энергетики ожидалось по мере приближения Солнца к максимуму своей активности.

Несмотря на то, что прибор не предназначен для регистрации гамма-всплесков (малая эффективная площадь кристалла, ограниченный медным коллиматором угол зрения прибора, Земля и КА закрывают значительную часть небесной сферы), БРМ зарегистрировал четыре гамма-всплеска в высокоэнергичных каналах: GRB090406, GRB090408, GRB090618, GRB090709. Регистрация всплесков была подтверждена как другими приборами КА «КОРОНАС-ФОТОН» («Конус-РФ», «Пингвин-М»), так и другими космическими аппаратами (Wind, Swift, Fermi). На рис. 7 представлен гамма-всплеск GRB090408 по данным прибора БРМ.

INSTRUMENT BRM (FXM). THE FIRST RESULTS OF MEASUREMENT

Yu. A. Trofimov, Yu. D. Kotov, V. N. Yurov,
A. S. Glyanenko, E. V. Fedorovych, M. V. Bessonov

*Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 —
National Research Nuclear University "MEPhI" (NRNU MEPhI)),
Astrophysics Institute MEPhI, Moscow*

A description of design and characteristics of the Fast X-ray Monitor (BRM) instrument is presented. This instrument is intended for measurements of Solar X-ray radiation timing characteristics in the energy band of 20...600 keV with time resolution up to 1 ms. (Aluminum-yttrium perovskite (YAP:Ce) is used for the detecting block, maximum count rate is about 10^6 counts per second (with 100 % dead time), maximum effective area is 27 cm^2).

Observed background conditions at orbit and compared with data of the instrument Electron-M-Pesca. The first registered events are presented.

Keywords: Fast X-Ray Monitor, YAP:Ce, fluxes of X-ray radiation of solar flares, gamma-ray bursts.

Trofimov Yury Alekseevich — Engineer. E-mail: YuTrofimov@gmail.ru.

Kotov Yury Dmitrievich — Director of the Astrophysics Institute MPhI, Ph. D. E-mail: kotov@mephi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy director of the Astrophysics Institute MPhI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Glyanenko Alexander Stepanovich — Head of the scientific group, Ph. D. E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Fedorovych Evgeny Vladimirovich — Engineer.

Bessonov Mikhail Vladimirovich — Engineer. E-mail: mvbessonov@gmail.com.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ТЕСИС ПО ИССЛЕДОВАНИЮ АТМОСФЕРЫ СОЛНЦА НА СПУТНИКЕ «КОРОНАС-ФОТОН»

С. В. Кузин, С. А. Богачев, А. А. Перцов

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

На борту российского спутника «КОРОНАС-ФОТОН» с 26 февраля 2009 г. проводился эксперимент ТЕСИС (Телескопы EUV-диапазона для Спектральных Исследований Солнца) ФИАН по исследованию солнечной атмосферы. Эксперимент основан на методе изображающей спектроскопии, в соответствии с которым излучение Солнца регистрируется в монохроматических линиях и узких спектральных областях вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазона спектра, не доступных для исследования с поверхности Земли. В работе представлены первые результаты эксперимента, полученные в условиях необычно глубокого минимума активности Солнца, наблюдающегося в первой половине 2009 г. Представлены наблюдения переходного слоя и короны Солнца на высотах расстоянием до двух солнечных радиусов в линии ионизованного гелия HeII 304 Å ($T \sim 80\,000$ К), ионах железа FeIX 171 Å ($T \sim 0,8$ млн К) и FeXXII 132 Å ($T \sim 15$ млн К) и линии магния MgXII 8,42 Å ($T \sim 8$ млн К).

Ключевые слова: Солнце, корона, переходный слой, вспышки, солнечная активность, космические исследования Солнца.

Введение

Корона является наиболее динамичной и горячей внешней оболочкой Солнца. Несмотря на то, что выделяющаяся в ней энергия невелика по сравнению с общим потоком, излучаемым Солнцем, происходящие здесь процессы оказывают наибольшее влияние как на состояние межпланетной среды и околоземного пространства, так и на гелиосферу в целом. Систематические

Кузин Сергей Вадимович — заведующий лабораторией, канд. физ.-мат. наук. E-mail: kuzin@sci.lebedev.ru.

Богачев Сергей Александрович — ведущий научный сотрудник, д-р физ.-мат. наук. E-mail: bogachev@sci.lebedev.ru.

Перцов Андрей Александрович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: perzov@sci.lebedev.ru.

исследования солнечной короны начались около 50 лет назад с наступлением космической эры. Это связано с тем, что максимум излучения солнечной короны, средняя температура которой превышает миллион градусов, лежит в дальнем ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах спектра (ВУФ — вакуумный УФ-диапазон). Так как ВУФ-диапазон полностью поглощается атмосферой Земли, наблюдения в нем невозможны с поверхности Земли. По этой причине до начала космической эры основным способом изучения короны были ее наблюдения в оптическом диапазоне во время полных затмений Солнца.

Несмотря на значительный прогресс, который внесли космические исследования в физику Солнца, многие ее фундаментальные проблемы до сих пор остаются нерешенными. Это и вопросы механизмов нагрева солнечной короны, и проблема накопления и выделения энергии солнечных вспышек, и механизмы генерации и ускорения солнечного ветра. Другой класс задач связан с влиянием процессов, происходящих в короне, на состояние межпланетной и околоземной среды. Это направление исследований выделилось в наше время в отдельную область прикладной физики, называемую «физикой космической погоды».

Одним из наиболее эффективных способов исследования как фундаментальных, так и прикладных задач физики Солнца является применение изображающей и спектроскопической техники. Первая позволяет локализовать области выделения и накопления энергии, исследовать их пространственную структуру, определять направления движения и объемы перемещаемой плазмы, а вторая — проводить диагностику состояния вещества, то есть определять такие параметры плазмы как ее электронная и ионная плотность, температура и дифференциальная мера эмиссии. Наибольшие результаты дает, конечно, сочетание этих методов, особенно если они реализованы в рамках одного комплекса аппаратуры. Именно по такому принципу сочетания спектроскопических и изображающих инструментов построен комплекс аппаратуры ТЕСИС.

Спутниковые комплексные исследования Солнца в России в настоящее время проводятся в рамках фундаментальной программы космических исследований КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца).

Концепция этой программы была сформулирована еще в середине 70-х гг. прошлого века выдающимся советским физиком С.Л. Мандельштамом, однако активная стадия реализации началась только в конце 1980-х — начале 1990-х гг. В соответствии с утвержденной тогда программой было принято решение о последовательном запуске трех спутников для исследования Солнца. Первый из этих аппаратов — «КОРОНАС-И», в итоге, был запущен в 1994 г., второй аппарат — «КОРОНАС-Ф» — в 2001 г., и, наконец, в 2009 г. на околоземную орбиту был выведен третий аппарат программы — «КОРОНАС-ФОТОН». Для всех трех спутников в ФИАН были разработаны и созданы комплексы аппаратуры, включающие набор телескопов и спектрогелиометров ВУФ-диапазона. Комплекс инструментов, изготовленный для спутника «КОРОНАС-ФОТОН», получил название ТЕСИС.

Состав и задачи аппаратуры ТЕСИС

Основной задачей комплекса инструментов ТЕСИС является исследование динамичных процессов в солнечной короне — вспышек, выбросов корональной массы и эруптивных протуберанцев, а также определение физического состояния плазмы в этих процессах: ее температуры, электронной и ионной плотности, а также дифференциальной меры эмиссии. Измерения физического состояния плазмы позволяют затем рассчитать энергобаланс активных корональных процессов (Урнов и др., 2007).

В задачи эксперимента входит также исследование динамики долгоживущих плазменных структур в солнечной короне, например активных областей и корональных дыр (Бугаенко и др., 2003).

Уникальной особенностью ТЕСИС, не имеющей аналогов в мире, является возможность фотографирования Солнца одновременно в четырех каналах наблюдений. Поскольку разные каналы соответствуют разным температурам солнечной плазмы, это позволяет одновременно наблюдать несколько слоев много-температурной солнечной атмосферы. Инструмент отличает также возможность наблюдения дальней короны на расстояниях до нескольких солнечных радиусов в ВУФ-диапазоне спектра. Наконец, ТЕСИС обладает чрезвычайно высоким

динамическим диапазоном, порядка 10^8 , что позволяет вести эффективные наблюдения как в минимуме, так и в максимуме солнечной активности.

В состав ТЕСИС входят два телескопа высокого разрешения (на диапазоны 132/171 и 304/171А), коронограф ВУФ-диапазона 304 А, два спектрогелиометра 8,42 и 280... 330 А, первый из которых является монохроматическим, а также рентгеновский спектрофотометр Сфинкс (SphinX), разработанный в центре космических исследований Польской академии наук. Прибор оборудован двумя звездными датчиками, которые используются для точной ориентации получаемых изображений.

Работу механических узлов ТЕСИС обеспечивают 16 микроприводов, управляющих затворами инструментов, а также приводами фокусировки и позиционирования зеркал. Инструмент имеет систему выравнивания температуры по несущей конструкции на основе тепловых труб, позволяющую значительно уменьшить термодформации, возникающие из-за постоянных изменений освещенности аппарата при движении по орбите.

Все изображающие каналы ТЕСИС, кроме звездных датчиков, оборудованы детекторами на основе back-side ПЗС-матриц CCD42-40 производства компании e2v. Матрицы имеют формат 2048×2048 ячеек размером 13,5×13,5 мкм. Для блокировки рассеянного фильтра на светочувствительную поверхность матриц напылены многослойные фильтры (Кузин и др., 2008). Созданные на основе этих матриц детекторы имеют аналого-цифровые преобразователи (АЦП) с разрядностью 14 бит. Тепловые шумы составляют около 6 электрон/с при 0 °С. Детекторы оборудованы комбинированной пассивной и активной системой термоохлаждения, обеспечивающей температуру –30...–40 °С.

В состав ТЕСИС входит специально разработанный бортовой компьютер с процессором производительностью 64МОПС и объемом встроенной памяти 256 Мбайт. Компьютер обеспечивает управление прибором с помощью команд, поданных с Земли, принимает и обрабатывает информацию с детекторов, сохраняет ее во внутренней памяти и передает на систему сбора и регистрации научной информации (ССРНИ), разработанную в ИКИ РАН. Программное обеспечение бортового компьютера при необходимости может быть полностью обновлено по командам, передаваемым с Земли.

Первые результаты эксперимента ТЕСИС

Научная программа эксперимента началась 26 февраля 2009 г., когда были получены первые данные с приборов. Суточный объем информации, поступающий с орбиты, составлял, в среднем, 700 Мбайт. Около 100 Мбайт приходилось на данные прибора «Сфинкс». Поскольку начало эксперимента совпало с периодом аномально низкой солнечной активности, основная работа ТЕСИС проводилась в «низкоэнергичных» каналах: преимущественно, в канале 304 Å (переходный слой Солнца) и канале 171 Å (солнечная корона). Высокотемпературные инструменты обсерватории работали в фоновом режиме с минимальной выработкой ресурса. Информация о проведенных наблюдениях и результаты их анализа представлялись на сайте ФИАН (<http://tesis.lebedev.ru>).

Наблюдения низкотемпературной плазмы в линии HeII

Наблюдения переходного слоя в линии ионизованного гелия HeII 304 А имеют ряд важных особенностей. Хотя эта линия с температурой возбуждения около 80 000 К доминирует в своем спектральном диапазоне, в непосредственной близости от нее расположена линия иона кремния SiXI 303.32 Å, излучающаяся много более горячей плазмой с $T \sim 1,5$ млн К. Так как с помощью современных многослойных покрытий эти две линии спектрально не разделяются, то на изображениях Солнца, полученных в этом диапазоне, всегда регистрируется плазма двух диапазонов температур.

Зеркало ТЕСИС на диапазон 304 Å имеет новый тип многослойного покрытия, обладающий узкой, $\lambda/\Delta\lambda = 25$, полосой отражения, что позволяет существенно уменьшить общий вклад горячих линий-спутников, расположенных в этом спектральном диапазоне. Поскольку в условиях минимума активности горячая «корональная» компонента дополнительно подавлена, это позволяет регистрировать практически монохроматические изображения Солнца, температура которых соответствует переходному слою. Характерный вид Солнца, наблюдаемого ТЕСИС в линии HeII, приведен на рис. 1.

Конструктивные особенности ТЕСИС позволяют реализовать серии наблюдений с чрезвычайно высоким временным разрешением — до 0,1 с. Во время таких сеансов в линии HeII

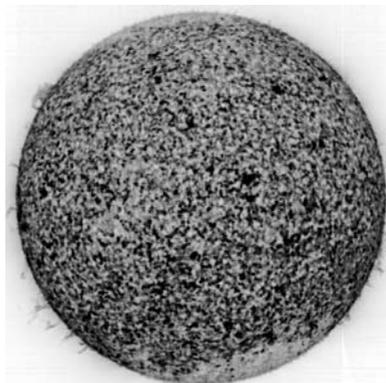


Рис. 1. Переходный слой Солнца в условиях глубокого минимума солнечной активности по наблюдениям ТЕСИС в линии иона гелия HeII 304 Å

была зарегистрирована и измерена тонкая динамика переходного слоя: вертикальные движения плазмы со скоростями около 100 км/с. Скорости и характер движения плазмы отличны от ее динамики в более низких слоях Солнца, фотосфере и хромосфере, и в расположенной выше горячей короне. Очевидно, что плазма приводится в движение иными механизмами.

При наблюдениях полного солнечного диска в линии HeII было зарегистрировано большое количество протуберанцев, значительно превышающее их число, наблюдавшееся во время



Рис. 2. Эрупция протуберанца на восточном лимбе Солнца 23 апреля 2009 г. Наблюдения ТЕСИС в линии HeII 304 Å. Температура плазмы около 80 000 К

максимума цикла активности. По-видимому, сравнительно слабые корональные магнитные поля в период минимума активности не препятствуют холодной и плотной плазме подниматься в высокие слои солнечной атмосферы. Этим же можно объяснить и другую особенность протуберанцев — сравнительно большое время жизни, до одного солнечного оборота, что может быть связано с высокой устойчивостью их внутренней структуры в отсутствие сильных внешних магнитных полей.

В условиях глубокого минимума активности было зарегистрировано несколько крупных эруптивных протуберанцев. Один из них приведен на рис. 2. Это же событие в динамике (фильм формата wmv) можно просмотреть на сайте проекта (http://tesis.lebedev.ru/info/mass_ejection_20090423.php).

Наблюдения в линии FeIX 171 Å

Уникальной особенностью телескопа на диапазон 171 Å является то, что он регистрирует *монохроматические* изображения в монохроматической линии FeIX 171.07 Å с максимумом эмиссии при температуре 0,8 млн К. Это реализовано благодаря новому типу отражающих покрытий ВУФ-диапазона, разработанных в Институте физики микроструктур. Таким образом, наблюдения в этом канале дают фактическую возможность наблюдать монотемпературную плазму.

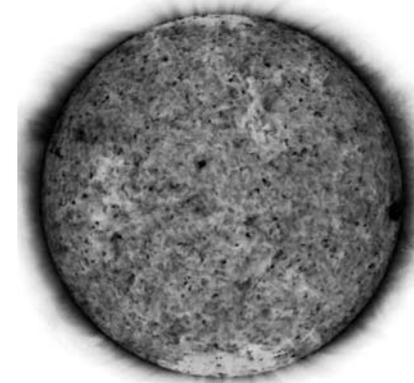


Рис. 3. Корона Солнца в условиях глубокого минимума солнечной активности. Наблюдения ТЕСИС в линии иона железа FeIX 171 Å

В целом, в период с февраля по май 2009 г. активность Солнца была чрезвычайно низкой. В течение этих четырех месяцев на диске Солнца появилось только несколько активных областей. Вид Солнца в этот период показан на рис. 3. На диске хорошо различаются структуры, характерные для минимума активности: долгоживущие полярные и экваториальные корональные дыры и яркие точки короны.

Комплекс ТЕСИС первым из действующих на орбите инструментов позволил наблюдать начало нового (24-го) цикла солнечной активности. Первые области нового цикла, зарегистрированные в конце марта 2009 г., были расположены на широтах около 30° в северном полушарии Солнца. В конце мая телескопами было зарегистрировано формирование симметричного пояса активности в южном полушарии. Таким образом, конфигурация магнитных полей нового цикла активности Солнца по состоянию на начало лета 2009 г. оказалась полностью сформирована (рис. 4).

Большое поле зрения этого канала, а также возможность смещать изображение Солнца на угол до двух градусов путем наклона зеркал позволяло комплексу ТЕСИС наблюдать не только

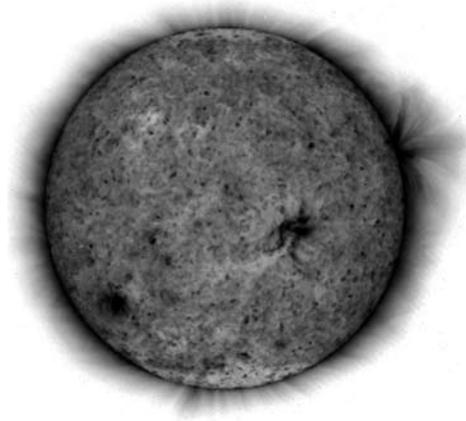


Рис. 4. Корона Солнца в конце мая 2009 г. Завершено формирование магнитной структуры нового цикла активности. На Солнце наблюдаются активные области северного и южного магнитных поясов, а также экваториальная область, принадлежащая поясу активности предыдущего солнечного цикла

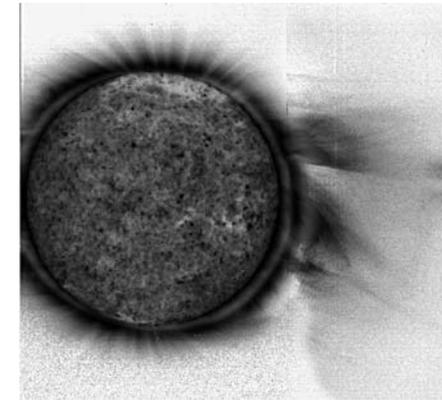


Рис. 5. Наблюдения протяженных касповых структур в дальней короне Солнца. Изображение получено ТЕСИС в линии FeIX 171 Å. Температура плазмы около 800 000 К

ближнюю, но и дальнюю солнечную корону. Проводимые здесь измерения являются уникальными, так как отечественные и зарубежные космические телескопы прежних поколений имели ограниченное поле зрения, лишь на несколько угловых минут превышающие угловой размер диска Солнца. Так как плазма в короне Солнца локализована преимущественно внутри силовых трубок магнитного поля, то изображения ТЕСИС дают прекрасную возможность для исследования магнитных полей в дальней короне. В частности, здесь наблюдаются многочисленные касповые структуры, обычно считающиеся характерными для более низких слоев короны (рис. 5).

Особый интерес для исследования представляют наблюдения ТЕСИС 12–13 мая 2009 г., когда в не достижимых ранее подробностях был зарегистрирован процесс формирования коронального выброса массы на высотах около 1 радиуса Солнца. Выброс наблюдался в линии FeIX 171 Å, то есть имел температуру около 1 млн К, и был весьма необычной формы — в виде чаши, повернутый «дном» к Солнцу (рис. 6). Наблюдение этого события ставит ряд вопросов: что служит триггером этого события, почему выброс массы имеет такую необычную форму, а также в чем причина снижения эмиссии холодной плазмы и увеличения горячей по мере развития этого явления.

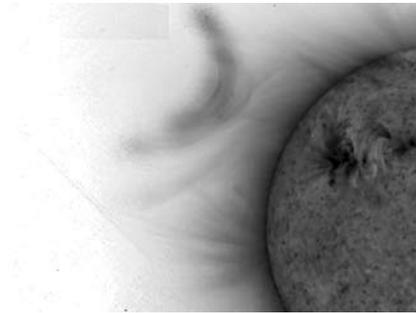


Рис. 6. Формирование коронального выброса массы в дальней короне Солнца. Сфотографирован момент отделения плазмоида от силовых линий магнитного поля Солнца. Наблюдения ТЕСИС в линии FeIX 171 Å

Наблюдения горячей плазмы

Несмотря на низкую активность, за первые месяцы наблюдения было зарегистрировано несколько вспышек рентгеновского класса А и В, в частности вспышка балла В1.8, зарегистрированная 26 марта 2009 г. около 01:39:43 UT. Вспышка наблюдалась всеми основными приборами ТЕСИС, в частности в линии FeIX 171 Å и HeII 304 Å.

Эта же вспышка была зарегистрирована с помощью спектрогелиографа, предназначенного для получения монохроматических изображений в линии иона MgXII. Были получены первые в новом цикле фотографии горячей корональной плазмы с температурой 8...10 млн К. Показано, что нагрев плазмы до таких температур может происходить даже в условиях минимума солнечного цикла. Ранее источники излучения с температурой 10 млн К и выше регистрировались на Солнце только в периоды высокой активности Солнца.

Другим инструментом, предназначенным для наблюдения вспышечной плазмы в составе ТЕСИС, является телескоп на спектральный диапазон 132 Å, где находятся интенсивные линии ионов FeXX и FeXXIII с T более 12 млн К. Несмотря на низкую активность Солнца, здесь также было зарегистрировано несколько вспышек.

В ходе эксперимента Сфинкс получены новые данные о физике солнечных микровспышек. Под микровспышками обычно понимаются события с интенсивностью рентгеновского

излучения менее 10 Вт/см² в диапазоне 1...8 Е (уровень вспышек балла А1.0). Благодаря высокой чувствительности Сфинкс зарегистрировал более сотни событий в диапазоне 0,1...10 Вт/см². Для их описания была расширена шкала солнечных вспышек, в которую введены два новых класса: S — для событий с интенсивностью излучения в диапазоне 1...10 Вт/см² и Q — для событий диапазона 0,1...1 Вт/см².

Благодарности: научному руководителю проекта Ю. Д. Котову, главному конструктору комплекса научной аппаратуры В. Н. Юрову, главному конструктору космического аппарата Р. С. Салихову, сотруднику Института астрофизики МИФИ, ФГУП НПП «Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики имени А. Г. Иосифьяна» (ВНИИЭМ), ФГУП «Научно-исследовательский институт электромеханики» (НИИЭМ), а также других организаций, внесших большой вклад в подготовку и осуществление проекта. Авторы крайне признательны Н. Н. Салашенко, В. И. Лучину, Н. И. Чкало и другим сотрудникам Института физики микроструктур (ИФМ) РАН за огромный вклад в создание новых элементов рентгеновской оптики, без которых невозможно было создание большинства инструментов ТЕСИС.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проекты № 08-02-13633-офи_ц и 08-02-01301-а, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Программа 16, часть 3» и Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Плазменные процессы в солнечной системе».

Литература

- Бугаенко О. И., Житник И. А., Кузин С. В.* и др. Исследование солнечных образований на основе комплексных наблюдений с Земли и на спутнике «КОРОНАС-Ф» II Магнитные поля в корональных дырах на разных высотах // Изв. Крымской астрофиз. обсерватории. 2003. Т. 99. С. 14–18.
- Кузин С. В., Шестов С. В., Перцов А. А., Рева А. А., Зуев С. Ю., Лопатин А. Я., Лучин В. И., Жоу Х., Хуо Т.* 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.
- Урнов А. М., Шестов С. В., Горяев Ф. Ф., Житник И. А., Кузин С. В., Богачев С. А.* О пространственно-временных характеристиках и механизмах образования мягкого рентгеновского излучения в солнечной короне // Письма в АЖ. 2007. Т. 33. № 6. С. 446–462.

Zhitnik I., Bugaenko O., Ignat'ev A., Krutov V., Kuzin S. et al. Dynamic 10 MK Plasma Structures Observed in Monochromatic Full Sun Images by the SPIRIT Spectroheliograph on the CORONAS-F Mission // Mon. Not. RAS. 2003. V. 331. P. 67–71.

**FIRST RESULTS OF THE EXPERIMENT TESIS
FOR STUDY OF THE SOLAR ATMOSPHERE
ON CORONAS-PHOTON SATELLITE**

S. V. Kuzin, S. A. Bogachev, A. A. Perzov

*Establishment of the Russian academy of sciences
P. N. Lebedev Physical institute of RAS (FIAN), Moscow*

The TESIS experiment to study solar atmosphere takes place on the Russian spacecraft CORONAS-PHOTON since February 26, 2009. The experiment is based on the method of imaging spectroscopy of the Sun, according to which the Sun images are taken in monochromatic lines or narrow spectral regions of EUV and SXR spectral range. This paper presents the first results of the experiment, obtained during period of unusually deep minimum of solar activity in the first half of 2009. We present observations of the Sun's transition region and solar corona at altitudes up to 2 solar radii in the helium line 304 Å ($T \sim 80\,000$ K), iron ions FeIX 171 Å ($T \sim 1$ million K) and FeXXII 132 Å ($T \sim 15$ million K), and line of magnesium MgXII 8.42 Å ($T \sim 8$ million K).

Keywords: Sun, corona, transition region, flare, solar activity, solar space research.

Kuzin Sergey Vadimovich — Head of Laboratory, Ph. D. E-mail: kuzin@sci.lebedev.ru)

Bogachev Sergey Alexandrovich — Senior Researcher, Ph. D. E-mail: bogachev@sci.lebedev.ru)

Perzov Andrey Alexandrovich — Senior Researcher, Ph. D. E-mail: perzov@sci.lebedev.ru)

**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПОЛЯРИМЕТРА ЖЁСТКОГО
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА
«ПИНГВИН-М» НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА «КОРОНАС-ФОТОН»**

**В. А. Дергачев¹, Г. А. Матвеев¹, Е. М. Круглов¹, В. П. Лазутков¹,
М. И. Савченко¹, Д. В. Скородумов¹, А. А. Пятигорский¹,
И. И. Шишов¹, Ю. Д. Котов², В. Н. Юров², А. С. Гляненко²,
А. И. Архангельский², М. В. Бессонов², А. С. Буслов²**

¹ Учреждение Российской академии наук физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А. Ф. Иоффе), Санкт-Петербург

² Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)), Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва

Обсуждаются результаты первых месяцев работы научной аппаратуры «ПИНГВИН-М», предназначенной для измерения степени линейной поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек в энергетическом диапазоне 20...150 кэВ и энергетических спектров рентгеновского излучения солнечных вспышек в диапазоне энергий 2...500 кэВ.

Приведены данные предполетных калибровок и калибровок на орбите, проведенных после включения прибора.

Ключевые слова: солнечные вспышки, рентгеновское излучение, поляризация, космический эксперимент, результаты, калибровки, обсуждения, спектры, «ПИНГВИН-М», «КОРОНАС-ФОТОН».

Дергачев Валентин Андреевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, д-р физ.-мат. наук. E-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru.

Матвеев Геннадий Александрович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: genadiy.matveev@mail.ioffe.ru.

Круглов Евгений Михайлович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук.

Лазутков Вадим Петрович — научный сотрудник. E-mail: vadim.lazutkov@mail.ioffe.ru.

Савченко Михаил Иванович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: mikhail.savchenko@mail.ioffe.ru.

Скородумов Дмитрий Всеволодович — научный сотрудник. E-mail: dmitri.skorodumov@mail.ioffe.ru.

Пятигорский Алексей Григорьевич — ведущий инженер. E-mail: alxp@bk.ru.

Шишов Игорь Игоревич — электроник 1-й категории.

Котов Юрий Дмитриевич — директор ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: kotov@mephi.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Гляненко Александр Степанович — заведующий научно-исследовательским сектором, канд. физ.-мат. наук. E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Архангельский Андрей Игоревич — научный сотрудник. E-mail: angel1966@list.ru.

Бессонов Михаил Владимирович — инженер. E-mail: mvbessonov@gmail.com.

Буслов Антон Сергеевич — инженер. E-mail: ASBuslov@mephi.ru.

Введение

Научные задачи, решаемые прибором «ПИНГВИН-М», его устройство и принцип действия подробно изложены в работе настоящего сборника: *Дергачев В.А.* и др. Прибор «ПИНГВИН-М», предназначенный для исследования поляризации жесткого рентгеновского излучения Солнца в космическом проекте «КОРОНАС-ФОТОН» (с. 83).

В настоящей статье описаны результаты наземных калибровок поляриметрической части прибора и приведены результаты первых месяцев работы прибора на орбите.

Кратко напомним устройство детекторной части прибора и принцип измерения поляризации. Детекторная часть прибора схематично изображена на рис. 1.

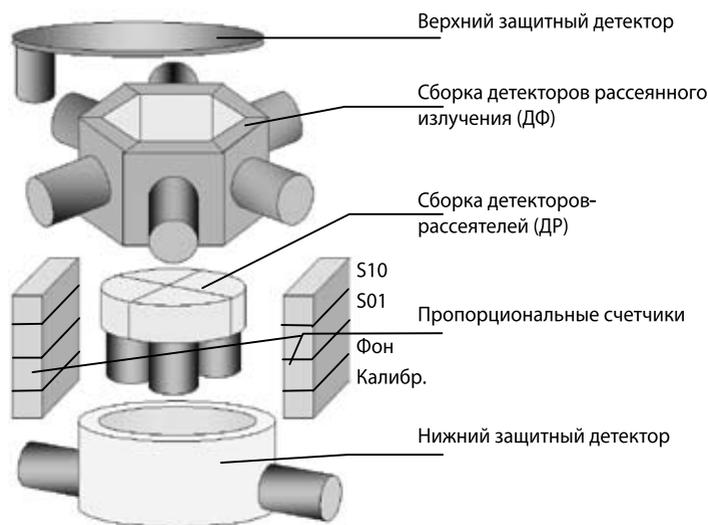


Рис. 1. Схема физической части прибора «ПИНГВИН-М»

Упрощенная схема блока детекторов прибора «ПИНГВИН-М»

Поляризация определяется по измерению степени асимметрии поля рассеянного излучения. Прибор содержит активный рассеиватель, состоящий из четырех кристаллов паратерфенила (четыре детекторов-рассеивателя — ДР). Поле рассеянного излучения измеряется шестью детекторами рассеянного излучения на основе кристаллов NaI, собранных по схеме Фосвич — ДФ.

Для измерения мягкого рентгеновского излучения прибор содержит два пропорциональных счетчика. Каждый счетчик состоит из четырех секций, расположенных по вертикали одна под другой. Верхняя секция S10 с наибольшей чувствительностью обеспечивает измерение рентгеновского излучения с 2 кэВ. Расположенная под ней секция с меньшей чувствительностью — S01 — измеряет рентгеновское излучение с ~8 кэВ. Следующие секции — фоновая и секция, на которой установлен калибровочный источник на основе изотопа Fe-55.

Предполетные калибровки и моделирование

В блоке детекторов «ПИНГВИН-М» каждый из ДР расположен несимметрично относительно ДФ (рис. 2). В связи с такой сложной геометрией детекторного узла для интерпретации результатов необходимо математическое моделирование его работы. Моделирование производилось с помощью программы GEANT4. Аксонометрическое изображение детекторного узла приведено на рис. 3.

С каждым из 24 каналов двойных совпадений может быть сопоставлена эффективная площадь $S^{\Phi, P}$, где индексы: Φ — номер детектора Фосвича, P — номер детектора рассеивателя. Эта эффективная площадь зависит от величины и направления поляризации и определяется как отношение скорости счета в канале (фотон/с) к падающему на прибор потоку (фотон/см²·с).

Удобнее оперировать отнормированной величиной — эффективностью регистрации в каждом канале:

$$\Theta^{\Phi, P} = A \cdot S^{\Phi, P},$$

где A — единый для всех каналов нормировочный множитель. Нормировка была выбрана нами на единицу:

$$\sum_1^6 \sum_1^4 (\Theta^{\Phi, P}) = 1.$$

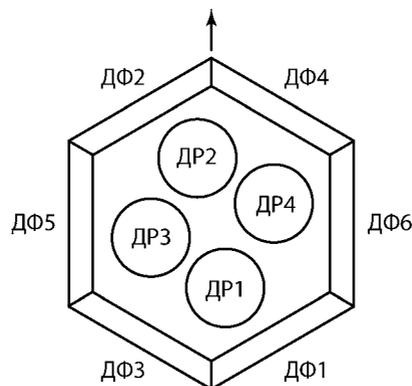


Рис. 2. Взаимное расположение детекторов-рассеивателей (ДР) и детекторов рассеянного излучения (ДФ) детекторного узла НА «ПИНГВИН-М»

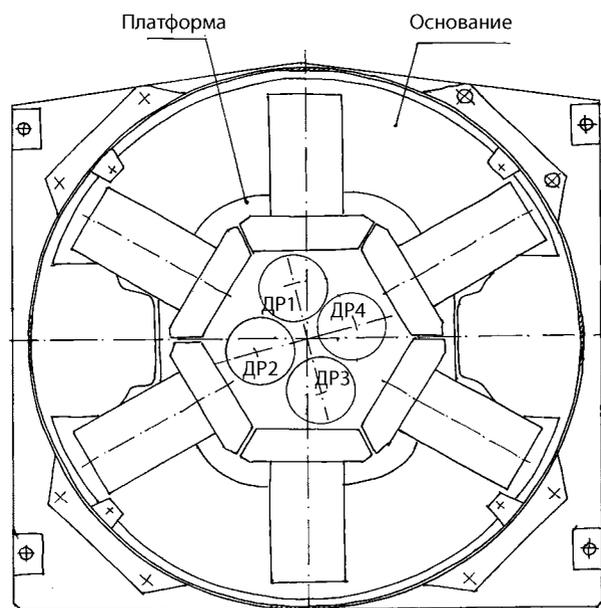


Рис. 3. Детекторный узел блока «ПИНГВИН-МД»

Математическая модель прибора является идеальной и поэтому, чтобы применить ее к интерпретации результатов с реального прибора, необходимо внести в нее поправки на индивидуальные характеристики детекторов. Определение таких поправочных коэффициентов для каждого из 24 каналов было главной задачей калибровки детекторов научной аппаратуры «ПИНГВИН-М».

Калибровки проводились с помощью высокоактивных радиоизотопных источников (в скобках указаны линии в энергетическом диапазоне прибора): ^{109}Cd (22...25, 88 кэВ), ^{241}Am (59 кэВ), ^{133}Ba (31...35, 81 кэВ).

Перед началом калибровок выставлялись энергетические пороги с помощью встроенного калибровочного источника на основе изотопа ^{133}Ba .

Для корректного определения поправочных коэффициентов необходимо облучать прибор равномерным по площади входного окна пучком неполяризованного излучения параллельно оптической оси прибора. Для создания такого поля излучения прибор облучался источниками с расстояния 2,5 м. При этом принимались специальные меры, для того чтобы расположить источник на оптической оси прибора. Для проведенных калибровок общая статистика в двойных совпадениях для отдельных линий превышала 10^7 импульсов. По полученным данным калибровок были определены экспериментальные эффективности для всех 24 каналов неполяризованного излучения $\Theta_{\text{экс}}^{\Phi, P}$. Поправочным коэффициентом к расчетной модели для каждого канала будет отношение экспериментальной и расчетной эффективности для неполяризованного излучения:

$$\left(\Theta_{\text{экс}}^{\Phi, P} \right)_{\text{нпи}} / \left(\Theta_{\text{расч}}^{\Phi, P} \right)_{\text{нпи}}$$

С использованием полученных данных прогноз экспериментальных значений зарегистрированных импульсов в двойных совпадениях в каждой из 24 пар ДФ-ДР для любой поляризации можно осуществить по формуле:

$$N_{\text{экс}}^{\Phi, P}(\Pi, \alpha) = N_{\text{расч}}^{\Phi, P}(\Pi, \alpha) \left(\Theta_{\text{экс}}^{\Phi, P} \right)_{\text{нпи}} / \left(\Theta_{\text{расч}}^{\Phi, P} \right)_{\text{нпи}},$$

где $N_{\text{экс}}^{\Phi, P}(\Pi, \alpha)$ — прогноз экспериментального значения зарегистрированных импульсов; $N_{\text{расч}}^{\Phi, P}(\Pi, \alpha)$ — расчетное значение

зарегистрированных импульсов; P , α — величина и позиционный угол поляризации.

Для проверки работоспособности описанной процедуры была проведена экспериментальная калибровка детекторов НА «ПИНГВИН-М» с помощью поляризованного излучения, возникающего при рассеянии под углом 90° излучения радиоактивных источников.

В качестве примера в табл. 1 приводятся экспериментальные данные, полученные от источника ^{241}Am , и результаты расчета с помощью математической модели и приведенной выше формулы. Вектор напряженности электрического поля излучения расположен вдоль оси Y (см. рис. 2). В целях большей наглядности и увеличения статистики для каждого ДФ произведено суммирование по всем четырем рассеивателям. Приведенные в табл. 1 скорости счета отнормированы на единицу.

Таблица 1

Детектор	ДФ1	ДФ2	ДФ3	ДФ4	ДФ5	ДФ6
Экспериментальное значение	0,145	0,146	0,141	0,144	0,216	0,209
Расчет значений для $N^{\Phi, P}_{\text{экср}}(P, \alpha)$	0,144	0,147	0,139	0,133	0,221	0,216

Учитывая, что стандартное отклонение для расчетных данных составляет 0,003, а для экспериментальных — 0,001, совпадение полученных значений можно считать хорошим.

Функционирование прибора «ПИНГВИН-М» на борту космического аппарата (КА)

Прибор «ПИНГВИН-М» был включен на борту КА 19.02.2009 г. (включение прибора прошло в полном объеме).

На рис. 4 для примера представлена запись данных интенсивметров. Из приведенных данных видно, что параметры измерительных каналов детекторов-фосwichей остались достаточно идентичными, о чем свидетельствует близость скоростей счета (в пределах статистической ошибки) всех трех пар детекторов-фосwichей.

Фоновая скорость счета в сцинтилляционных детекторах на орбите в приэкваториальных областях невелика и, в основном,

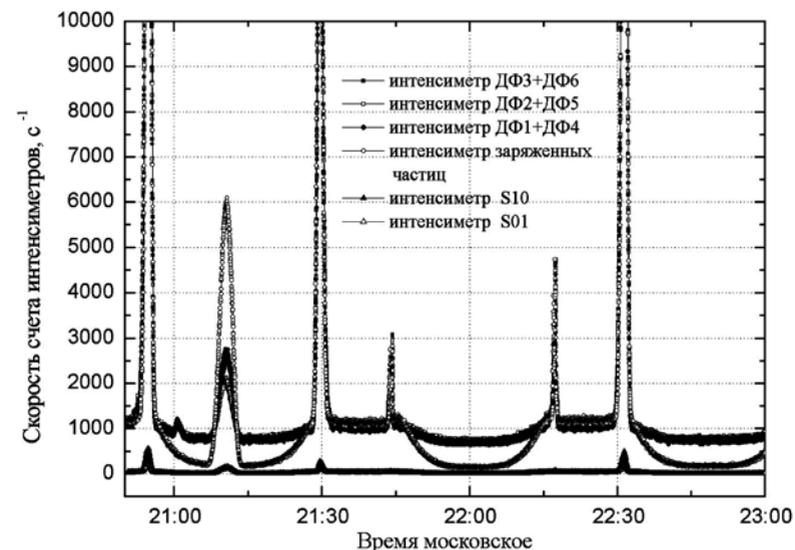


Рис. 4. Виток 306. Пример записи скоростей счета в интенсивметрах

определяется скоростью счёта от калибровочного источника (^{133}Ba).

Детектор мягкого рентгеновского излучения, установленный глубоко внутри блока, оказался достаточно защищенным от радиации радиационных поясов Земли, что обеспечивает хорошее соотношение сигнал — фон даже на высоких широтах. Исключением здесь является Южно-Атлантическая Аномалия, содержащая частицы высокой энергии, проходящие сквозь весь прибор.

Более подробный анализ переданных с борта спектров калибровочного источника ^{133}Ba , проводимый на участках орбиты с наименьшим фоном (в приэкваториальных областях), показал, что значения коэффициентов усиления детекторов немного разошлись (в пределах 10 %). Поэтому первоочередной задачей работы с прибором была подстройка усиления детекторов и приведение, таким образом, энергетической шкалы прибора к состоянию, которое она имела при наземных настройках и калибровках.

Процедура подстройки энергетической шкалы прибора осуществлялась пошагово: на борт КА подавались команды для

изменения усиления детекторов, после их отработки проводился анализ переданных с прибора калибровочных спектров и затем, в случае необходимости, вновь подавались команды корректировки.

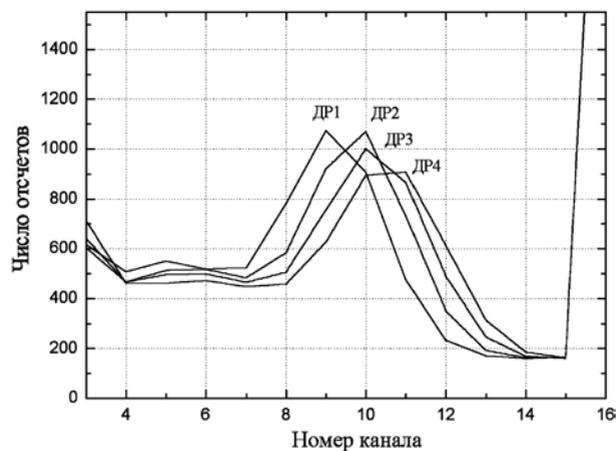


Рис. 5. Спектры калибровочного источника (линия 30 кэВ ^{133}Ba) в четырех детекторах-рассеивателях до сведения порогов

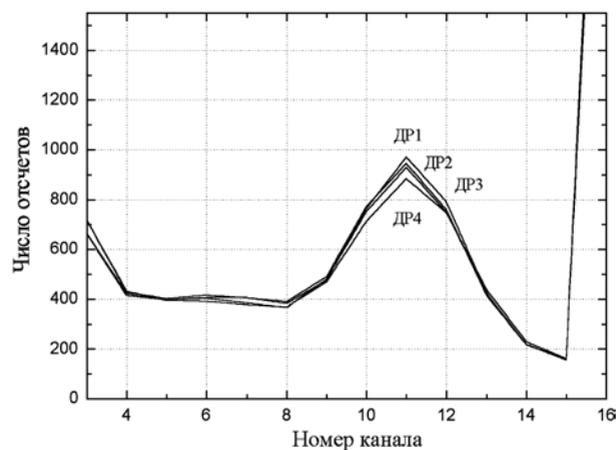


Рис. 6. Спектры калибровочного источника (линия 30 кэВ ^{133}Ba) в четырех детекторах-рассеивателях после сведения порогов

На рис. 5–8 приведены калибровочные спектры в детекторах-рассеивателях до и после подстройки усиления, а на рис. 9, 10 — калибровочные спектры в одном из детекторов-фосвичей до и после корректировки усиления.

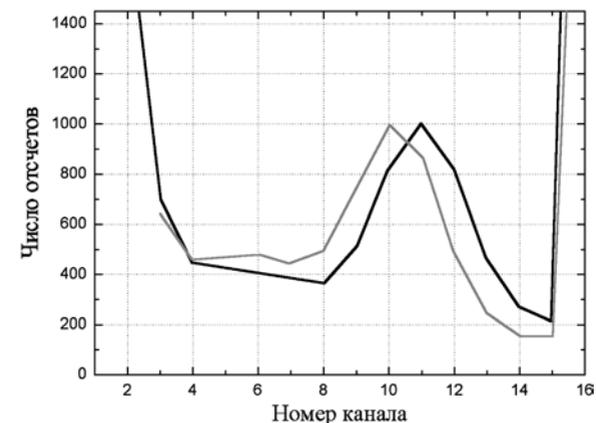


Рис. 7. Спектр калибровочного источника (линия 30 кэВ ^{133}Ba) в одном из детекторов-рассеивателей до сведения порогов в сравнении с наземной калибровкой. Полетные данные — серая линия, наземные — черная

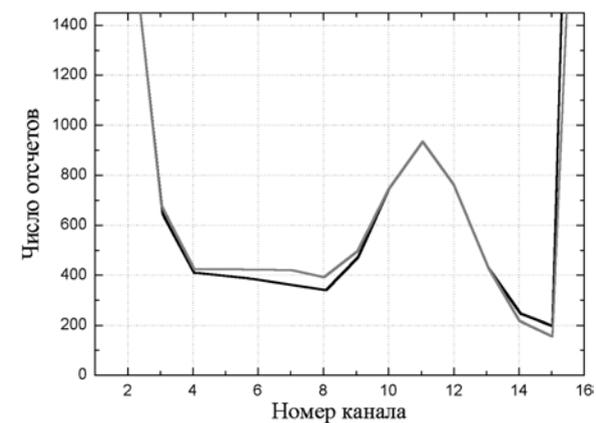


Рис. 8. Спектр калибровочного источника (линия 30 кэВ ^{133}Ba) в одном из детекторов-рассеивателей после сведения порогов в сравнении с наземной калибровкой. Полетные данные — серая линия, наземные — черная

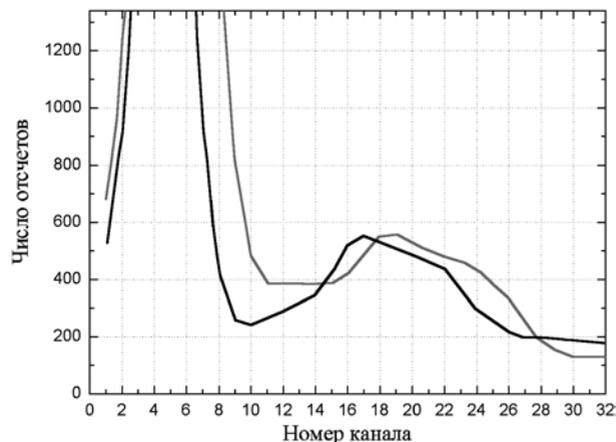


Рис. 9. Спектр калибровочного источника (линия 80 кэВ ^{133}Ba) в одном из детекторов-фосwichей до сведения порогов в сравнении с наземной калибровкой. Полетные данные — серая линия, наземные — черная

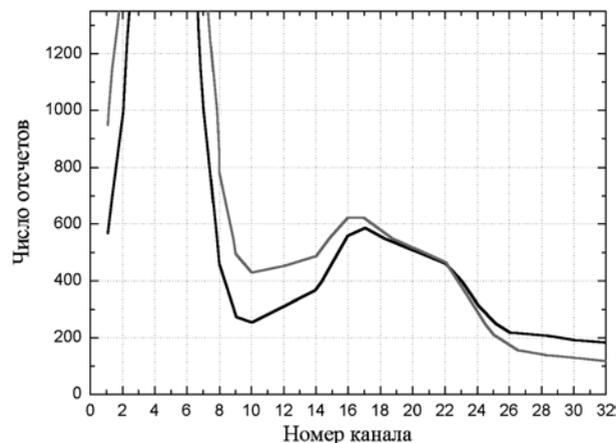


Рис. 10. Спектр калибровочного источника (линия 80 кэВ ^{133}Ba) в одном из детекторов-фосwichей после сведения порогов в сравнении с наземной калибровкой. Полетные данные — серая линия, наземные — черная

Срабатывание системы обнаружения всплесков происходило достаточно редко, и длительность таких интервалов была невелика. Следует отметить полное отсутствие срабаты-

ния системы обнаружения на приэкваториальных участках орбиты с низким фоном. Выработка ложных сигналов «Всплеск» происходила всегда либо на начальном этапе вхождения КА в радиационный пояс, либо на конечном этапе выхода из радиационного пояса в районах ярко выраженных нестабильностей гамма-излучения. Это свидетельствует о том, что предварительно выставленные параметры системы обнаружения всплесков были выбраны достаточно корректно, и система, в целом, неплохо справлялась с отсеиванием гамма-квантов радиационных поясов, а редкие срабатывания системы обнаружения на начальном и конечном участках некоторых радиационных поясов могли быть вызваны неудачной ориентацией КА к поясам в эти моменты.

Учитывая чрезвычайно низкую активность Солнца в период с февраля по июнь 2009 г., сцинтилляционными детекторами, кроме радиационных поясов Земли, регистрировались только гамма-всплески несолнечного происхождения.

На рис. 11 приведен временной профиль потоков рентгеновского и гамма-излучения в трех парах детекторов-фосwichей для наиболее мощного из зарегистрированных гамма-всплесков, произошедшего 08.04.2009 г.

Этот гамма-всплеск дал вполне измеримый сигнал в матрицах двойных совпадений — в интеграле около полутора

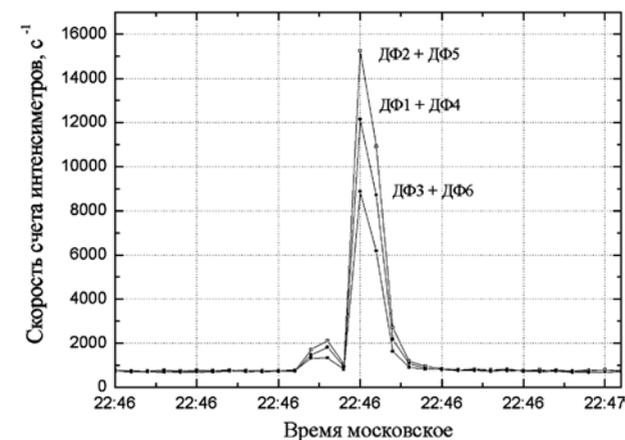


Рис. 11. Временной профиль потоков рентгеновского и гамма-излучения гамма-всплеска 08.04.2009 г.

тысяч для одного из четырех детекторов-рассеивателей, что, с учетом измерения прямого потока от этого гамма-всплеска по одиночным импульсам в детекторах-фосвичах, дало возможность оценить эффективность и эффективную площадь прибора в двойных совпадениях (поляриметрический сигнал). Оценка эффективности составила 6,7 % (к общей площади рассеивателей), и соответственно оценка эффективной площади прибора в двойных совпадениях составляет порядка 5 см^2 .

За первые месяцы наблюдений активность Солнца проявлялась в основном в мягком рентгеновском излучении, с февраля по июнь включительно прибором было зарегистрировано порядка 10 вспышек различной мощности (рентгеновского класса В и ниже).

Учитывая то, что заметная эффективность регистрации секции S10 начинается с 8 кэВ, для излучения с мягким спектром эта секция может быть использована как счетчик фона.

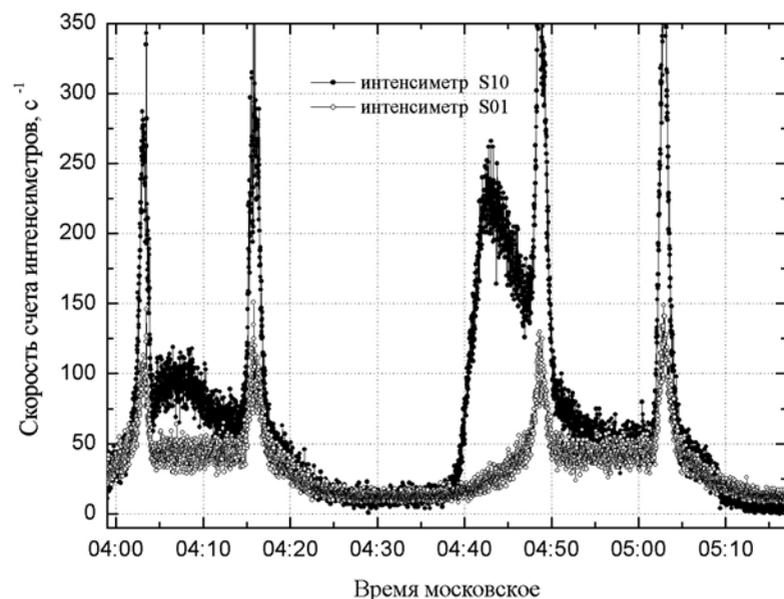


Рис. 12. Вспышка 26.03.2009 г. Детектор мягкого рентгеновского излучения РД. Временной ход скоростей счета в секциях S10 с большой площадью окна (черный) и S01 с малой площадью (серый). Временное разрешение — 1с

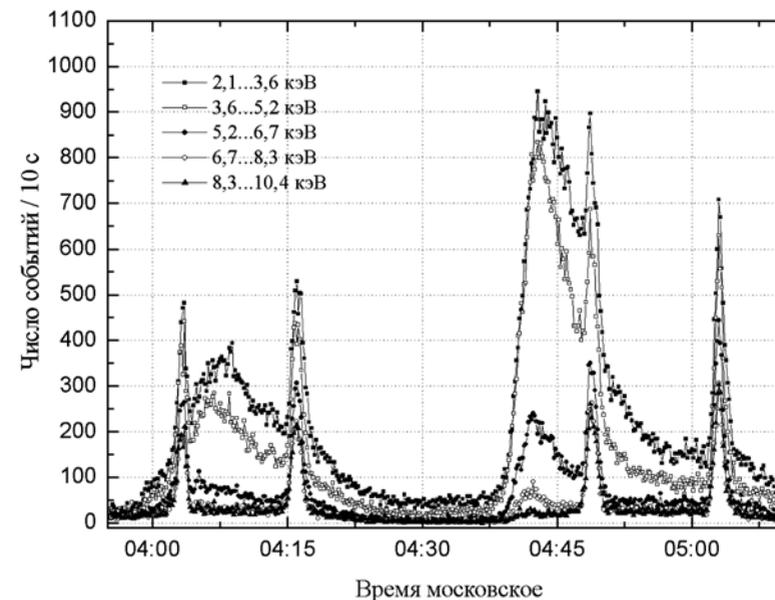


Рис. 13. Вспышка 26.03.2009 г. Детектор мягкого рентгеновского излучения РД. Временной ход скоростей счета в пяти энергетических каналах секции S10 детектора мягкого рентгеновского излучения

На рис. 12 и 13 представлен временной ход скорости счета в пяти энергетических каналах первых из зарегистрированных прибором солнечных рентгеновских вспышек.

На рис. 14 приведен временной ход скорости счета в шести энергетических каналах для наиболее мощной из зарегистрированных нами за указанный период вспышки, произошедшей 06.06.2009 г. Данные по этой вспышке представлены с вычетом фона (скорости счета в секции S01).

Кроме рентгеновских вспышек нами в некоторые периоды регистрировалось непрерывное рентгеновское излучение с энергией больше 2 кэВ. Такое излучение регистрировалось в первом или в первых двух каналах детектора мягкого рентгеновского излучения с 1 по 17 мая и с 1 по 6 июня 2009 г. На рис. 15 показан пример регистрации такого события, иллюстрирующий непрерывное излучение Солнца в первых четырех каналах (2,1...8,3 кэВ) секции S01 детектора мягкого рентгеновского излучения.

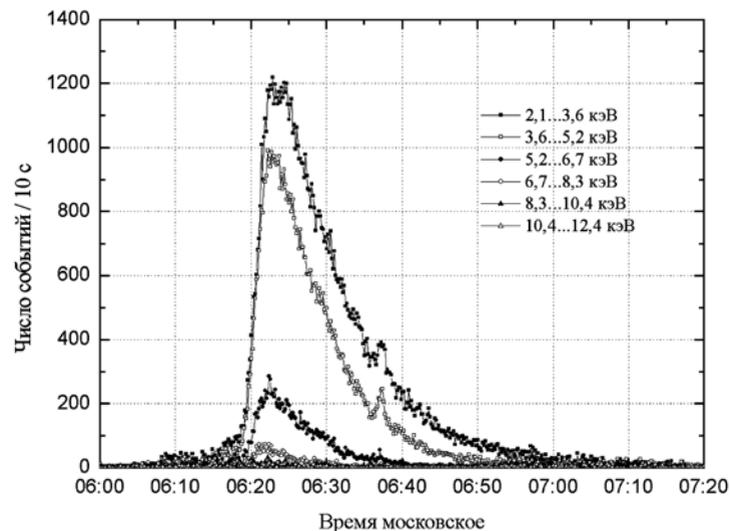


Рис. 14. Виток 1907. 06.06.2009 г. Шесть энергетических каналов. Солнечная вспышка рентгеновского класса В2.6, зарегистрированная секцией S10 детектора мягкого рентгеновского излучения

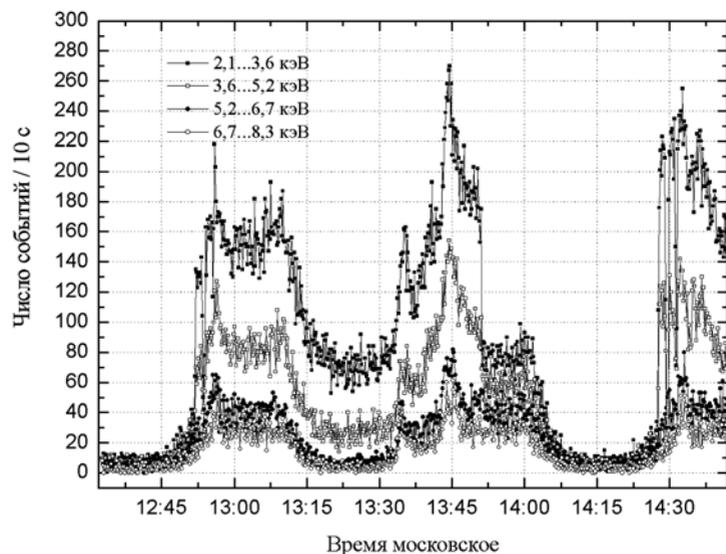


Рис. 15. Виток 1841. Фрагмент записи в четырех энергетических каналах за 01.06.2009 г.

Чувствительность прибора «ПИНГВИН-М» к мягкому рентгеновскому излучению для первых двух каналов с учетом реальной фоновой обстановки можно оценить как $3,5 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^{-9}$ Вт/м².

OPERATION OF HARD X-RAY POLARIMETER PENGUIN-M ONBOARD SATELLITE CORONAS-PHOTON

V. A. Dergachev¹, G. A. Matveev¹, E. M. Kruglov¹,
V. P. Lazutkov¹, M. I. Savchenko¹, D. V. Skorodumov¹,
A. G. Pyatigorsky¹, I. I. Shishov¹, Yu. D. Kotov²,
V. N. Yurov², A. S. Glyanenko², A. I. Arkhangelsky²,
M. V. Bessonov², A. S. Buslov²

¹ Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, St. Petersburg
² Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 —
National Research Nuclear University “MEPhI” (NRNU MEPhI)),
Astrophysics Institute MEPhI, Moscow

Results of first months of operation of the PENGUIN-M scientific instrument are discussed. The device is intended for measuring the degree of polarization of X-ray emission from solar flares in the energy range 20 to 150 keV as well as X-ray energy spectra from 2 to 500 keV.

The results of preflight and in-flight calibration are presented.

Keywords: solar flare, X-ray, polarimetry, space experiment, results, calibration, discuss, spectra, PENGUIN-M, CORONAS-PHOTON.

Dergachev Valentin Andreevich — Deputy director, doctor of sciences. E-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru.

Matveev Gennady Aleksandrovich — Senior Scientist, Ph. D. E-mail: genadiy.matveev@mail.ioffe.ru.

Kruglov Evgeny Mikhailovich — Senior Scientist, Ph. D.

Lazutkov Vadim Petrovich — Scientist. E-mail: vadim.lazutkov@mail.ioffe.ru.

Savchenko Mikhail Ivanovich — Senior Scientist, Ph. D. E-mail: mikhail.savchenko@mail.ioffe.ru.

Skorodumov Dmitry Vsevolodovich — Scientist. E-mail: dmitri.skorodumov@mail.ioffe.ru.

Pyatigorsky Aleksei Gregorievich — Leading Engineer. E-mail: alxp@bk.ru.

Shishov Igor Igorevich — Engineer.

Kotov Yury Dmitrievich — Director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: kotov@mephi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy Director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Glyanenko Alexander Stepanovich — Head of the Scientific Group, Ph. D.
E-mail: asgl2005@rambler.ru.

Arkhangelsky Andrey Igorevich — Scientist. E-mail: angel1966@list.ru.

Bessonov Mikhail Vladimirovich — Engineer. E-mail: mvbessonov@gmail.com.

Buslov Anton Sergeevich — Engineer. E-mail: ASBuslov@mephi.ru.

**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА RT-2
КОМПЛЕКСА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА «КОРОНАС-ФОТОН» НА ПЕРВЫХ ЭТАПАХ
ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

**Ю. Д. Котов⁶, А. Р. Рао³, С. К. Чакрабартти^{1,5}, Д. П. Малкар³,
С. Шрикумар⁴, М. К. Хингар³, А. Нанди^{1,2}, В. Н. Юров⁶,
А. И. Архангельский⁶, Р. А. Зятьков⁶**

¹ *Индийский центр космической физики, Калькутта, Индия*

² *Индийская организация по космическим исследованиям, Бангалор, Индия*

³ *Тата институт фундаментальных исследований, Мумбай, Индия*

⁴ *Космический центр им. Викрам Шарабхаи, Индия*

⁵ *Национальный центр фундаментальной физики
им. С. Р. Бозе, Калькутта, Индия*

⁶ *Московский инженерно-физический институт (Государственный
университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный
исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)),
Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва*

Спектрометр рентгеновского и гамма-излучения RT-2 входит в состав космического аппарата «КОРОНАС-ФОТОН», который был запущен с космодрома «Плесецк» 30 января 2009 г. на околоземную орбиту (высота ~550 км, наклонение 82,5°). Космический аппарат постоянно ориентирован на Солнце. Целью эксперимента RT-2 являлось изучение солнечного гамма- и рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне от 15 кэВ до 1 МэВ. Прибор состоит из трех детекторов (два «фосвич»-детектора RT-2/S, RT-2/G и один полупроводниковый детектор RT-2/CZT) и блока электроники RT-2/E. Приводятся особенности функционирования прибора RT-2 после запуска и первые результаты наблюдений.

Ключевые слова: КОРОНАС-ФОТОН, солнечные вспышки, гамма-всплески, рентгеновский и гамма-спектрометр, полупроводниковый детектор, «фосвич»-детектор.

Котов Юрий Дмитриевич — директор ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: kotov@mephi.ru.

Рао А. Р. —

Чакрабартти С. К. —

Малкар Д. П. —

Шрикумар С. —

Хингар М. К. —

Нанди А. —

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Архангельский Андрей Игоревич — научный сотрудник. E-mail: angel1966@list.ru.

Зятьков Роман Александрович — инженер. E-mail: zyatkovra@gmail.com.

Введение

Спектрометр рентгеновского и гамма-излучения RT-2 является составной частью проекта «КОРОНАС-ФОТОН» (Kotov et al., 2004, 2009) для изучения Солнца в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения — от ультрафиолета до высокоэнергичного гамма-излучения. Главные научные задачи прибора — изучение солнечного электромагнитного излучения в широком энергетическом диапазоне — от 15 кэВ до 1 МэВ, регистрация временных профилей (ВП) рентгеновского излучения солнечного и галактического происхождения в диапазоне 15...150 кэВ и получение изображений солнечных вспышек в жестком рентгеновском диапазоне при помощи полупроводниковых CdZnTe- и CMOS-детекторов с использованием кодирующей апертуры. Прибор состоит из трех детекторов (два сцинтилляционных «фосвич»-детектора RT-2/S и RT-2/G, один полупроводниковый детектор RT-2/CZT) и блока электроники RT-2/E. Каждый блок «фосвич»-детекторов содержит детектирующую систему для регистрации низкоэнергичного гамма-излучения и жесткого рентгеновского излучения, а также блок фронтальной электроники. Блоки RT-2/S и RT-2/G состоят из сцинтилляторов NaI(Tl) и CsI(Na), собранных по схеме «фосвич», «просматриваемых» одним общим ФЭУ. Данные блоки изготовлены голландской фирмой M/S Scionix Holland BV.

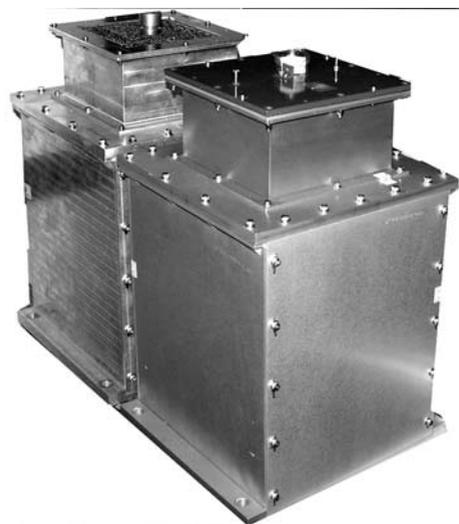
Оба детектора расположены за кодирующими коллиматорами с полем зрения $4 \times 4^\circ$ (RT-2/S), $6 \times 6^\circ$ (RT-2/G) соответственно и окружены пассивной защитой из тантала.

Детектор RT-2/S функционирует в диапазоне энергий от 15 кэВ до 1 МэВ (спектрометрический режим для суммарного сигнала с обоих сцинтилляционных кристаллов), перед кристаллами блока RT-2/G установлен дополнительный алюминиевый фильтр для устранения регистрации низкоэнергичных (<20 кэВ) фотонов. Блок RT-2/CZT состоит из трех CdZnTe (CZT)-детекторов (OMS40G256, изготовленных израильской фирмой Orbotech-medical) и одного CMOS-детектора (RadEye-1, изготовленного американской фирмой Radicon Imaging Corporation), размещенных в виде матрицы 2×2 . Каждый CZT-детектор содержит 256 отдельных детекторов (размер пикселей $2,5 \times 2,5$ мм, толщина 5 мм), которые управляются двумя программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС). CMOS-детектор состоит из матрицы 512×512 пик-

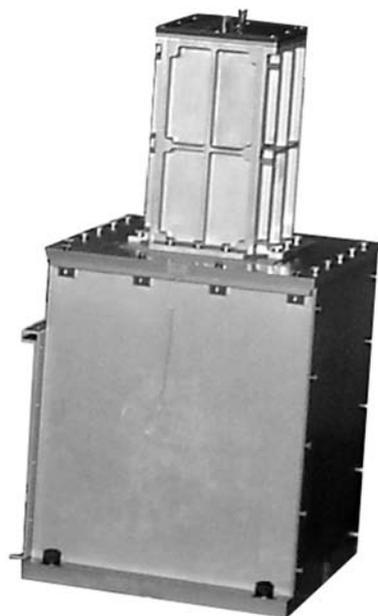
селов (размер пиксела 48×48 мкм), находящейся в оптическом контакте со сцинтиллятором Gd_2O_2S размером 25×50 мм, толщиной 3 мм. В блоке RT-2/CZT используются два различных типа кодирующих коллиматоров: обычная кодирующая маска (SAM, из тантала толщиной 0,5 мм) для двух CZT-модулей и френелевская кодирующая апертура (FZP, изготовленная из вольфрама толщиной 1 мм) для одного из CZT-модулей и CMOS-детектора. Блок окружен пассивной защитой из тантала и имеет суммарный угол зрения $5 \times 8^\circ$. Характеристики детекторов блока приведены в таблице.

Блок	RT-2/S & RT-2/G	RT-2/CZT
Тип детектора	NaI(Tl) + CsI(Na)	CZT + CMOS
Толщина, мм	3+25	5+3
Размер, мм	Ш116	4040, 24×24
Выход	ФЭУ	Пиксели
Эффективная площадь, см ²	100	48; 4,5
Энергетическое разрешение, %	18 (60 кэВ)	8 (60 кэВ)
Энергетический диапазон, кэВ	15...1 МэВ (RT-2/S) 25...150 (RT-2/G)	20...100
Время накопления	1 с временной ход + 100 с спектры или 100 мс временный ход + 10 с спектры или 10 мс временный ход + 1 с спектры	1 с 100 с

Все три детектирующих блока калибруются в полете при помощи радиоактивного источника Co^{57} (122 кэВ) активностью 100 нКи (максимальная), встроенного в одну из стенок коллиматора. Измеренное угловое разрешение модуля CZT составляет 30 угл. мин. Разрешение может быть улучшено до 2 угл. мин для мощных вспышек. В соответствии с данными лабораторных проверок угловое разрешение модуля CMOS для наиболее мощных вспышек с простой структурой может достигать 10 угл. с. Все три детектирующих блока (RT-2/S, RT-2/G и RT-2/CZT) взаимодействуют с системой сбора и регистрации научной информации (ССРНИ) через блок электроники (RT-2/E). Блок RT-2/E принимает необходимые команды от систем КА и выдает их соответствующему блоку детекторов, а также принимает



а



б

Рис. 1. Изометрическая проекция блоков детекторов RT-2/S: а — «фос-вич»-детекторы RT-2/S,G; б — полупроводниковый детектор RT-2/CZT. На рисунках видны различные части конструкции (например, коллиматор, высоковольтный источник питания, ФЭУ, CMOS-плата)

научную и служебную информацию от блоков детекторов и запоминает ее во внутренней памяти для последующей обработки. Внешний вид блоков RT-2/S (RT-2/G) и RT-2/CZT представлен на рис. 1а, б. Все три блока детекторов размещены вне гермоотсека космического аппарата соосно направлению оси КА на Солнце.

Параметры аппаратуры

Прибор RT-2 был включен на борту КА «КОРОНАС-ФОТОН» 19 февраля 2009 г. Перед включением температура детекторов составляла около 16 °С для RT-2/S и RT-2/G и –15 °С для RT-2/CZT. После включения температура детекторов установилась в благоприятном для их функционирования диапазоне: 18...25 °С — для блоков RT-2/S и RT-2/G и 2...11 °С — для блока RT-2/CZT. Профиль орбитальной температуры детекторов показан на рис. 2. Флуктуации профиля связаны с изменением нагрева КА при его орбитальном движении.

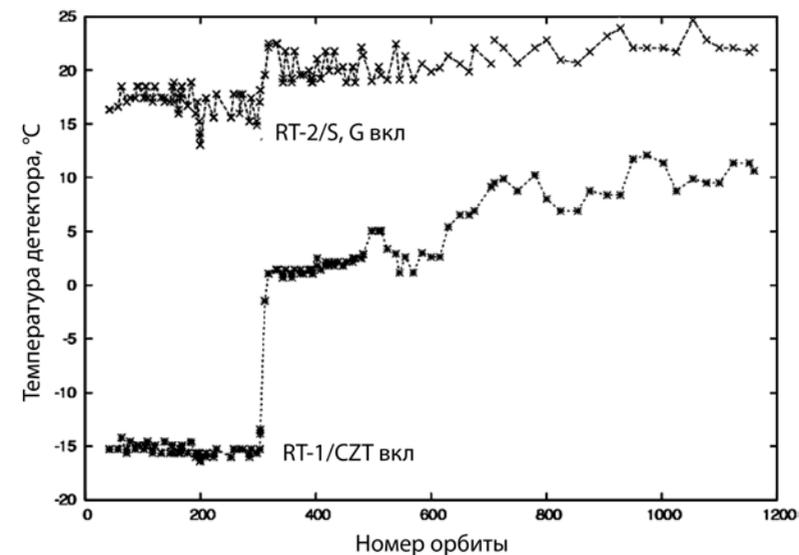


Рис. 2. Температурный профиль прибора RT-2 на борту КА «КОРОНАС-ФОТОН»

На начальном этапе функционирования КА на детекторы прибора подавалось пониженное высокое напряжение (HV) до тех пор, пока не был установлен штатный режим выдачи команд «Сшир/Вшир». При этом максимальная вариация скорости счета детекторов RT-2 (25 отсчетов/с для RT-2/S and 57 отсчетов/с для RT-2/G) во время прохождения КА через области повышенной радиации (Южная Полярная Шапка (SC) и Северная Полярная Шапка (NC)) соответствует штатному режиму работы в SC и NC. Оба детектирующих блока также регистрировали очень большое число событий при прохождении КА Южно-Атлантической Аномалии. Блок RT-2/CZT также регистрировал события на максимальном уровне 2 отсчета/с. В данный период наблюдений все служебные параметры прибора находились в допустимых пределах. Рабочие условия для RT-2/S и RT-2/G идентичны: напряжение питания 27_{-3}^{+7} В, энергопотребление 4,5 Вт для каждого блока. Напряжение питания конвертируется до величин +15 и +5 В при помощи низковольтного MDI DC-DC-преобразователя для питания компонент детектирующих блоков. Напряжение +15 В также используется для получения высокого напряжения — HV (~700 В), необходимого для питания ФЭУ. ФЭУ функционируют в диапазоне высокого напряжения 400...900 В, возможно изменение величины HV посредством Управляющих кодовых слов (УКС) с шагом 5 В. Параметр разделения сигналов по форме импульса (PSD), а также величина порога дискриминаторов нижнего уровня (LLD) для двух предусилителей (G1 и G2) также изменяются посредством УКС. Управляемый генератор (VCO) применяется для контроля служебных параметров прибора, таких как величина напряжения на выходе источника питания +5 В, температура, HV и LLD. Блоки RT-2/S и RT-2/G функционировали в штатном режиме. Пример мониторинга служебных параметров блока RT-2/S на 16 апреля 2009 г. приведен на рис. 3. Во время начальной фазы летных испытаний параметр HV для обоих «фосвич»-детекторов пошагово изменялся для проверки линейности зависимости величины HV от частоты VCO. При этом контролировались служебные параметры и правильность функционирования детекторов. Блоки RT-2/S и RT-2/G функционировали при величине HV 754 и 727 В соответственно. Линейность летной калибровки параметра HV для блока RT-2/S приведена на рис. 4. Для проверок функционирования блоков

RT-2/S и RT-2/G при различных энергетических порогах и линейности параметра LLD на прибор подавались команды изменения параметра LLD. При этом оба детектирующих блока функционировали в штатном режиме (величина LLD установлена на уровне 1,05 В). Линейность летной калибровки параметра LLD для блока RT-2/S приведена на рис. 5.

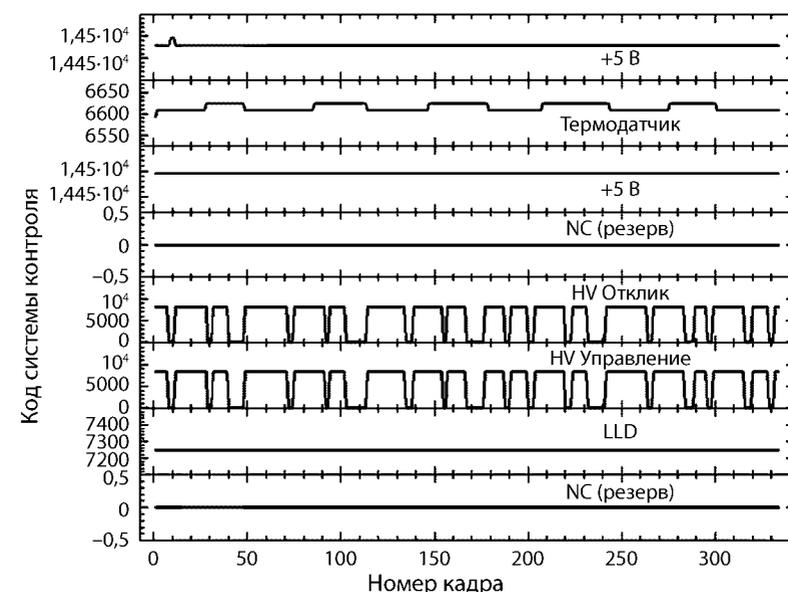


Рис. 3. График служебных параметров блока RT-2/S 16 апреля 2009 г.

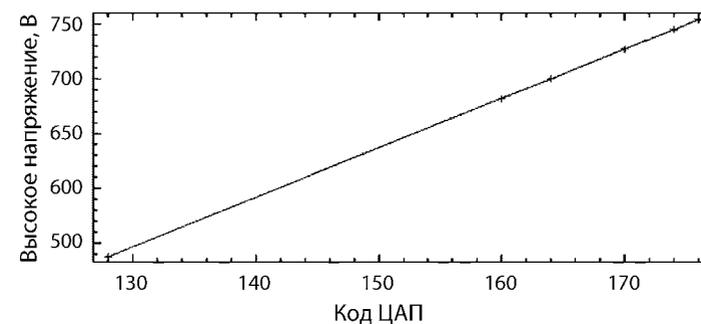


Рис. 4. Линейность калибровки параметра HV блока RT-2/S

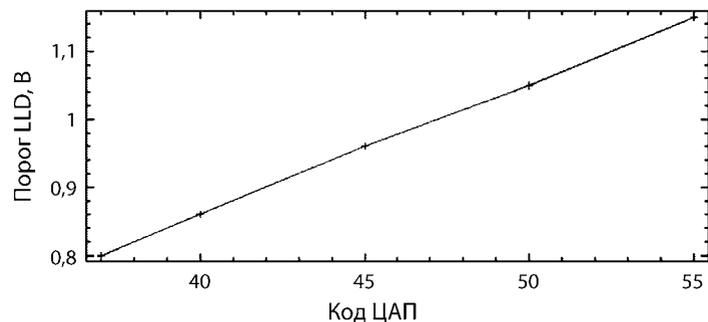


Рис. 5. Линейность калибровки параметра LLD блока RT-2/S

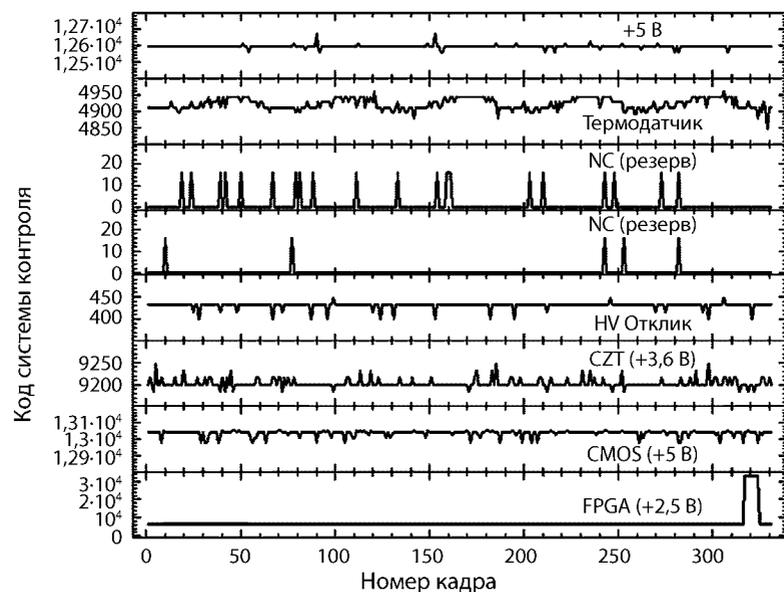


Рис. 6. График изменения служебных параметров блока RT-2/CZT 16 апреля 2009 г. FPGA — интегральная схема

Блок RT-2/CZT также функционирует при напряжении питания 27_{-3}^{+7} В, энергопотребление 7,5 Вт. Напряжение питания конвертируется до величин +15 и +5 В при помощи низковольтного MDI DC-DC-преобразователя для питания компонент детектирующего блока. Неуправляемый источник высокого

напряжения используется для получения высокого напряжения (-600 В), необходимого для питания модулей CZT. Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) применяется вместо управляемого генератора (VCO) для контроля служебных параметров RT-2/CZT, таких как величина напряжения на выходе источника питания +5 В, температура, HV и напряжение питания модулей CZT и CMOS. Блок RT-2/CZT функционировал в штатном режиме. Пример мониторинга служебных параметров блока RT-2/CZT на 16 апреля 2009 г. приведен на рис. 6.

Результаты наблюдений показывают стабильность энергетических и PSD-спектров «фосвич»-детекторов.

Энергетические спектры для RT-2/S и RT-2/G в кристаллах NaI(Tl) и CsI(Na) приведены на рис. 7 и 8 соответственно. PSD-спектр демонстрирует разделение NaI(Tl) — и CsI(Na)-событий, PSD-параметр для блоков RT-2/S и RT-2/G установлен на уровне 26 и 28-го каналов соответственно. Пики в области 540-го канала (RT-2/S) и 590-го канала (RT-2/G) в спектре NaI(Tl) соответствуют активационному пику I^{121} (58,5 кэВ). Линия Co^{57} (122 кэВ) хорошо видна в спектрах G2 (рис. 7, 8). Типичный калибровочный энергетический спектр для кристалла RT-2/G NaI(Tl) приведен на рис. 9. Линия I^{121} регистрируется

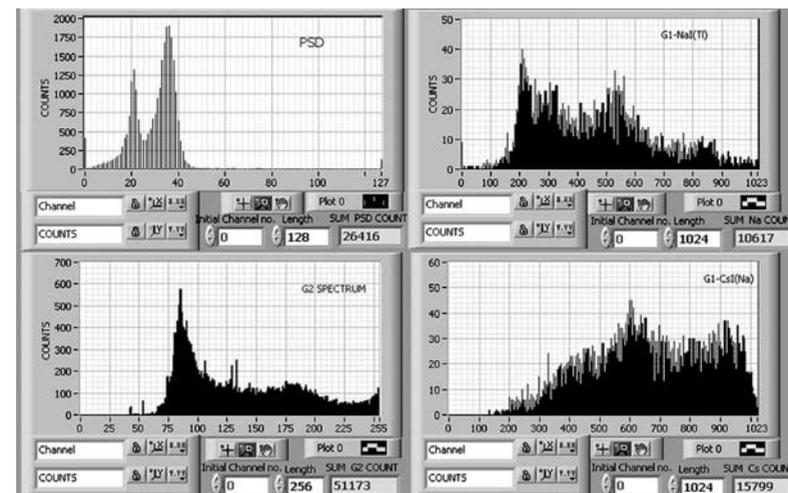


Рис. 7. Канальные спектры (PSD, NaI(Tl), CsI(Na) и G2) блока RT-2/S 16 апреля 2009 г.

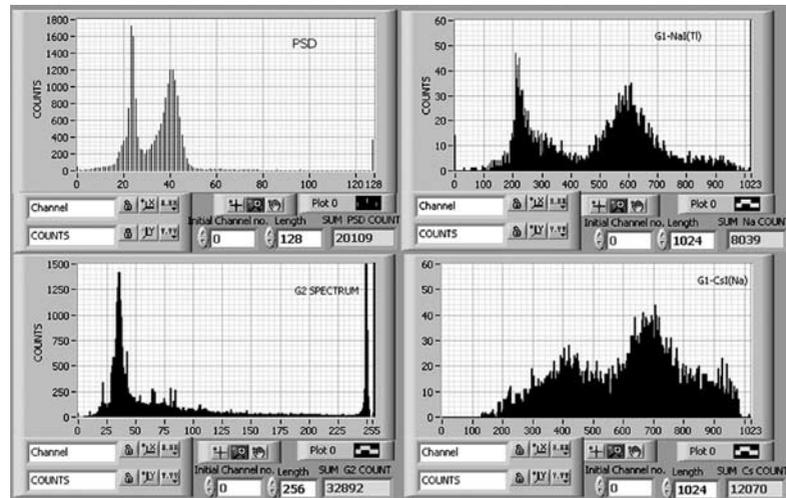


Рис. 8. Канальные спектры (PSD, NaI(Tl), CsI(Na) и G2) блока RT-2/G 16 апреля 2009 г.

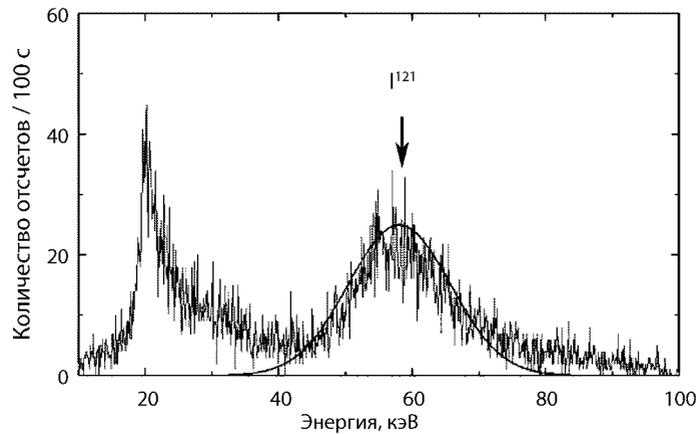


Рис. 9. Типичный калибровочный спектр с кристалла NaI(Tl) блока RT-2/G

с разрешением $\sim 30\%$. Пример энергетического спектра модуля CZT1 приведен на рис. 10. Три CZT-модуля регистрируют линию 122 кэВ Co^{57} с энергетическим разрешением 7,32 % (127 кэВ), 5,6 % (122 кэВ) и 5,97 % (124 кэВ) соответственно.

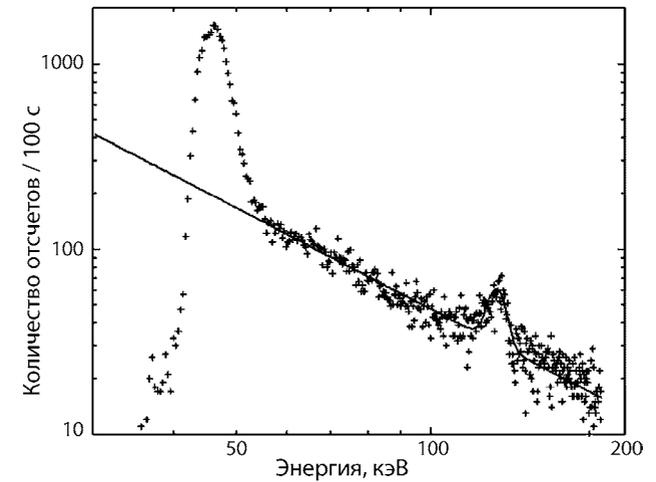


Рис. 10. Пример спектра модуля CZT1 (калибровочная линия с энергетическим разрешением 7,32 % при 127 кэВ)

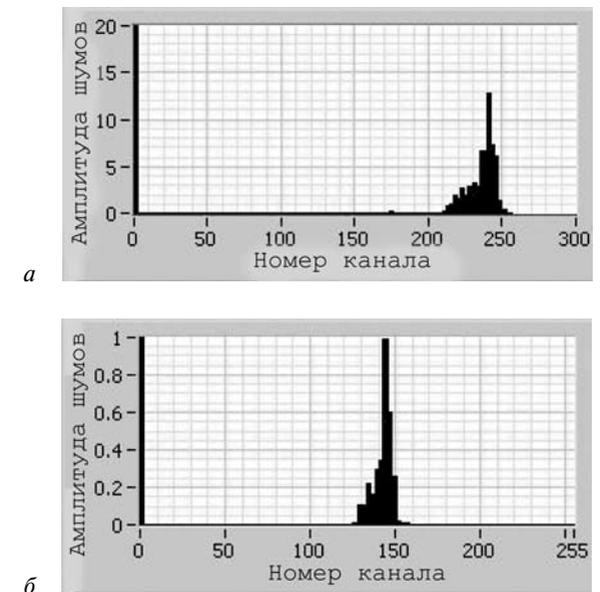


Рис. 11. Примеры калибровочных CMOS-спектров, полученных на различных участках орбиты КА (а, б?)

Смещение калибровочного пика в область более высоких энергий для модулей CZT1 (127 кэВ) и CZT3 (124 кэВ), возможно, вызвано увеличением шумов пикселей модулей. Калибровка CMOS — наиболее важная задача для вычитания шумовой составляющей. Как показали результаты наблюдений, в различных частях орбиты КА постоянные CMOS изменяются. Результаты калибровок представлены на рис. 11а, б. После стабилизации постоянных шумов CMOS получить истинную калибровку CMOS можно путем вычитания шумового порога.

Заключение

Оба «фосвич»-детектора (RT-2/S и RT-2/G) функционировали штатно в заданном энергетическом диапазоне. Однако шумы пикселей модулей CZT1 и CZT3 не были устранены. Для понимания данной особенности необходим тщательный анализ работы отдельных пикселей модулей. Калибровка CMOS-детектора продолжалась, для ее завершения необходимы измерения на участках орбиты КА с низкими фоновыми нагрузками.

Литература

- Kotov Yu. D. et al. (2004) Satellite Project CORONAS-PHOTON for Study of Solar Hard Radiation // 35th COSPAR Scientific Assembly. Paris, France, 18–25 July, 2004.
- Kotov Yu. D. et al. (2009) Solar Mission CORONAS-PHOTON : Inorbit Status and First Results // Proc. 31st ICRC, ___Ł'od'z___, 2009. Paper N. 1523.

RT-2 EXPERIMENT ON-BOARD THE CORONAS-PHOTON SATELLITE

Yu. D. Kotov⁶, A. R. Rao³, S. K. Chakrabarti^{1,5},
J. P. Malkar³, S. Sreekumar⁴, M. K. Hingar³, A. Nandi^{1,2},
A. I. Arkhangelskiy⁶, V. N. Yurov⁶, R. A. Zyatkov⁶

¹ Indian Centre for Space Physics, Kolkata, India

² Indian Space Research Organization-HQ, Bangalore, India

³ Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India

⁴ Vikram Sarabhai Space Centre, Thiruvananthapuram, India

⁵ S. N. Bose National Centre for Basic Sciences, Kolkata, India

⁶ Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 — National Research Nuclear University “MEPhI” (NRNU MEPhI), Astrophysics Institute MEPhI, Moscow

X-ray and Low energy gamma-ray spectrometer/telescope RT-2 is a part of the CORONAS-PHOTON satellite that was launched from cosmodrome Plesetsk on January 30, 2009 into a low-Earth, low eccentricity, high-inclination orbit (altitude about 550 km, inclination 82,5°). CORONAS-PHOTON is a 3-axis stabilized, Sun-pointing spacecraft. RT-2 experiment designed and developed for the study of solar gamma-rays/X-rays in the energy range of 15 keV to 1 MeV. This experiment consists of three detectors (two phoswich detectors RT-2/S, RT-2/G, one solid state imaging detector RT-2/CZT) and one processing electronic device (RT-2/E). In this paper we briefly describe the on-board performance of RT-2 instrument since its launch and summary of the first observational results.

Keywords: CORONAS-PHOTON, solar flares, X-ray and gamma-ray bursts, gamma-ray spectrometer, semi-conductor detector, Phoswich detector.

Kotov Yury Dmitrievich — Director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: kotov@mephi.ru.

Rao Arikkala Raghurama —
Chakrabarti Sandip Kumar —

Malkar Jaywant Pandurang —

Sreekumar Sankarattil —

Hingar Mahendra Kumar —

Nandi Anuj —

Arkhangelskiy Andrey Igorevich — Scientist. E-mail: angel1966@list.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Zyatkov Roman Aleksandrovich — Engineer. E-mail: zyatkovra@gmail.com.

**ВАРИАЦИИ ПОТОКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ
ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ
В МАРТЕ 2009 Г. — ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИБОРА
«ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» («КОРОНАС-ФОТОН»)**

**И. Н. Мягкова, М. И. Панасюк, Ю. И. Денисов,
В. В. Калегаев, Л. И. Старостин**

*Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва*

Выполнен анализ возрастания потоков электронов с энергиями 1...4 МэВ, регистрировавшихся на спутнике «КОРОНАС-ФОТОН» во внешнем радиационном поясе Земли в середине марта 2009 г. Возрастание наблюдалось после слабых магнитных возмущений, вызванных приходом к Земле 13 марта 2009 г. высокоскоростного потока солнечного ветра. Обсуждаются возможные физические причины этого возрастания потока релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе.

Ключевые слова: релятивистские электроны, внешний радиационный пояс Земли, магнитные возмущения, солнечный ветер.

Введение

Несмотря на то, что внешний радиационный пояс Земли (РПЗ) тщательно изучается с момента его открытия в 1958 г., многие фундаментальные проблемы, связанные с его динамикой, и, следовательно, с ускорением в нем частиц до релятивистских энергий, остаются актуальными.

Вопросы динамики внешнего РПЗ в последнее время также привлекают к себе пристальное внимание в связи со сбоями работы космической аппаратуры во время возрастных потоков

Мягкова Ирина Николаевна — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: irina@srd.sinp.msu.ru.

Панасюк Михаил Игоревич — директор НИИЯФ МГУ, д-р физ.-мат. наук, E-mail: panasyuk@sinp.msu.ru.

Денисов Юрий Иванович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук.

Калегаев Владимир Владимирович — старший научный сотрудник, д-р физ.-мат. наук. E-mail: klg@dec1.sinp.msu.ru.

Старостин Лев Иванович — программист 1-й категории. E-mail: levira.star@mail.ru.

релятивистских электронов, наблюдающихся во время магнитных возмущений.

Усредненные радиальные распределения основных максимумов потоков релятивистских электронов хорошо известны (см., например, (Кузнецов, Тверская, 2007)). Более того, в обзоре (Кузнецов, Тверская, 2007) отмечалось, что внешний электронный пояс испытывает значительные вариации даже во время слабых геомагнитных возмущений.

Одна из центральных научных задач эксперимента, проводимого при помощи прибора «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» на борту ИСЗ «КОРОНАС-ФОТОН», третьего космического аппарата серии КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца), — это исследование динамики потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли. Как будет показано ниже, и в отсутствие сильных геомагнитных бурь, в минимуме цикла солнечной активности (СА), наблюдаются значительные вариации потоков электронов во внешнем РПЗ.

1. Условия в околоземном пространстве в марте 2009 г.

Рассмотрим подробнее условия в межпланетном пространстве в марте 2009 г. На рис. 1 приведены вариации параметров межпланетного магнитного поля (ММП), солнечного ветра (СВ) и геомагнитных индексов со 2 по 24 марта 2009 г. (сайт Годдардовского центра космических полетов — <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). На рис. 1 видно: в ночь с 12 на 13 марта 2009 г. наблюдалась небольшая (минимальное значение $D_{st} = -28$ нТ, $K_p = 5$) магнитная буря, связанная с приходом к Земле высокоскоростного потока солнечного ветра (максимальное значение скорости солнечного ветра $V_{св} = 550$ км/с). На рис. 1 также видно, что около полуночи с 12 на 13 марта величина напряженности магнитного поля B резко возросла и составила 18 нТ. При этом B_z бывшая до того положительной в течение нескольких часов (величина ее составляла около 8 нТ), сменила знак, и в максимуме амплитуды достигала -12 нТ.

Авроральная активность в рассматриваемый период времени также была относительно низкой. Согласно данным Мирового центра данных по геомагнетизму в Киото (swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/), максимального значения — 800 нТ —

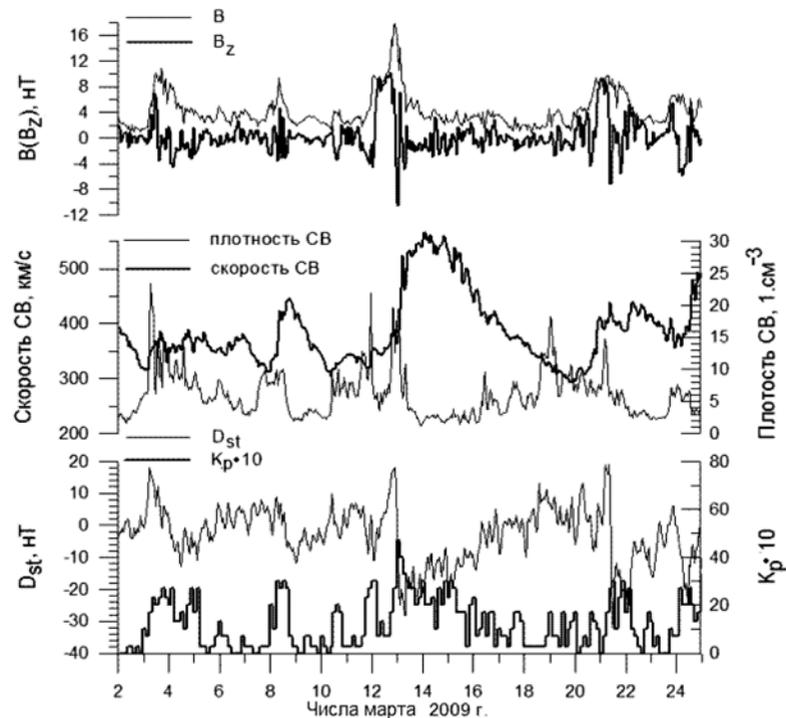


Рис. 1. Вариации B и B_z межпланетного магнитного поля (ММП), скорости и плотности солнечного ветра (СВ) и геомагнитных индексов со 2 по 24 марта 2009 г.

AE-индекс достигал только около 7 ч утра 13 марта (в максимуме главной фазы магнитного возмущения) и около полудня 21 марта.

При этом по данным сети Intermagnet (<http://www.intermagnet.org/>) на ряде высокоширотных станций, таких как Соданкюла (Sodankyla), Нарсесуак (Narsarsuaq), было зарегистрировано возрастание волновой активности примерно с 15 по 20 марта 2009 г.

2. Результаты измерения потоков релятивистских электронов

На рис. 2. приведены профили по L скоростей счета электронов с энергией от 1 до 4 МэВ для девяти прохождений ИСЗ «КОРОНАС-ФОТОН» через внешний РПЗ при одних и тех же

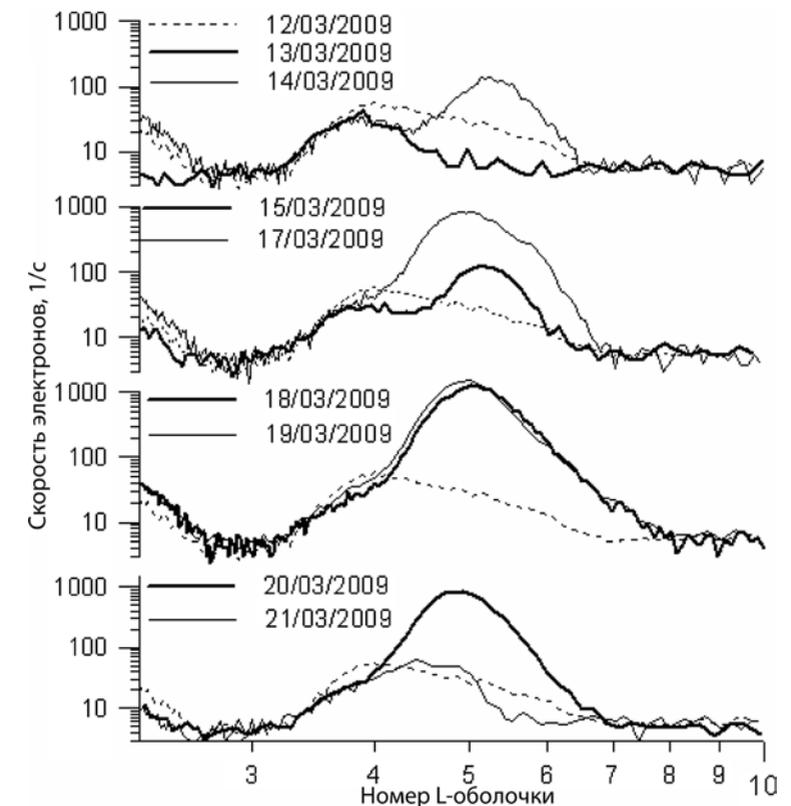


Рис. 2. Зависимости скоростей счета электронов с энергией 1...4 МэВ от номера L -оболочки для девяти прохождений ИСЗ «КОРОНАС-ФОТОН» через внешний РПЗ, полученные с 12 по 21 марта 2009 г.

значениях географических координат и магнитного локального времени (MLT) до, во время и после геомагнитного возмущения 12–13 марта. Пунктиром на всех четырех панелях представлены данные о скоростях счета электронов, полученные рано утром 12 марта, до начала возмущения, которые мы считаем фоновыми условиями (профили, полученные для 11, 9 и 8 марта, от данных за 12 марта фактически не отличаются). Из рис. 2 видно, что 13 марта, вблизи главной фазы бури, наблюдается небольшое падение скоростей счета регистрируемых электронов (жирная кривая на верхней панели). Это не противоречит результатам, полученным на предыдущем ИСЗ серии «КОРОНАС» —

«КОРОНАС-Ф», когда во время сильных геомагнитных бурь наблюдалось резкое падение интенсивности релятивистских электронов во внешнем РПЗ, практически до его полного опустошения. В данном случае скорость счета электронов падает незначительно, но и амплитуда возмущения, вызвавшая данное падение, мала — всего -28 нТ. Кроме того, изменилась с 13 марта ширина внешнего РПЗ — до возмущения полярная граница внешнего РПЗ простиралась до $L = 7$, а 12 марта — не выше $L = 5$.

14 марта (тонкая сплошная кривая на верхней панели) величина потока электронов в районе «добуревого» максимума на $L = 4$ не изменилась. При этом на более высоких L -оболочках появился добавочный пик с максимумом, расположенным на $L = 5,2$. Полярная граница вернулась на $L = 7$, т. е. туда, где она наблюдалась до бури. Профиль, полученный 15 марта (жирная кривая на второй сверху панели), мало отличается от профиля 14 марта. Данные за 16 марта, соответствующие нужным географическим координатам и MLT (Magnetic Local Time — магнитное локальное время), отсутствуют. 17 марта (тонкая сплошная кривая на второй сверху панели) упомянутый новый максимум сдвинулся чуть ближе к Земле (примерно до $L = 5$), а его интенсивность возросла почти на порядок. В течение 18 и 19 марта рост интенсивности потоков электронов во внешнем поясе продолжился, хотя и не столь интенсивно, жирная и тонкая кривые на второй панели сверху, соответственно. Максимум скоростей счета релятивистских электронов был зафиксирован 19 марта. 20 марта интенсивность немного упала (жирная кривая на нижней панели). После еще одного геомагнитного возмущения, произошедшего 21 марта, скорость счета релятивистских электронов во внешнем РПЗ в максимуме вернулась к уровню 12 марта. При этом максимум внешнего РПЗ локализован дальше от Земли, чем до бури, — примерно на $L = 4,5$, а полярная граница переместилась, наоборот, ближе к Земле — на $L = 5,5$. Поскольку экваториальная граница внешнего РПЗ не сместилась, очевидно, что его ширина уменьшилась.

На рис. 3 приведена динамика максимальных скоростей счета релятивистских электронов на высоте 550 км в трех диапазонах L : $L = 3...4$, $4...5$, $5...6$. На рисунке видно, что самый высокий рост потоков релятивистских электронов наблюдался на максимальном расстоянии от Земли — на $L = 5...6$, а на $L = 3...4$

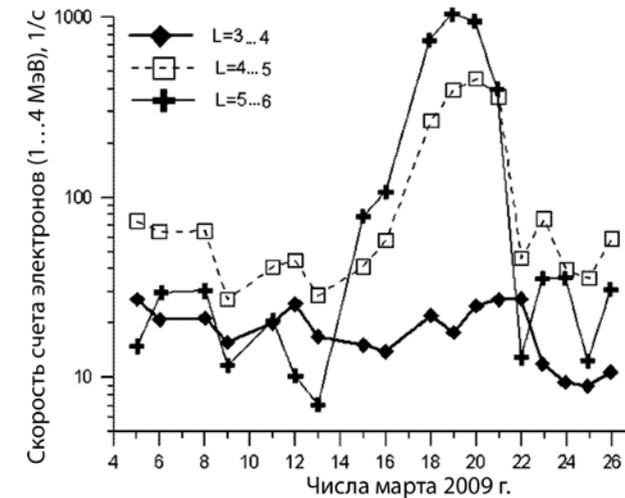


Рис. 3. Временная зависимость максимальных скоростей счета релятивистских электронов на высоте 550 км по данным прибора «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» в марте 2009 г. в трех диапазонах L ($L = 3...4$; $4...5$; $5...6$)

возрастания фактически не наблюдалось. При этом максимальные потоки на $L = 5...6$ зарегистрированы на день раньше, чем на $L = 4...5$, на четверо суток позже момента возмущения, вызванного приходом высокоскоростного потока СВ. Отметим, что полученная величина временной задержки совпадает с данными работы (Li et al., 1997), выполненной на основании результатов эксперимента на ИСЗ SAMPEX.

3. Обсуждение результатов измерений

Как уже отмечалось, экспериментальные исследования электронов внешнего РПЗ неоднократно проводились учеными разных стран (например, см. (Williams et al., 1968; Вакулов и др., 1975; Емельяненко и др., 1978; Baker et al., 1974; Blake et al., 1992) и приведенные там ссылки). Так, при сопоставлении вариаций внешнего РПЗ на разных высотах (Williams et al., 1968; Емельяненко и др., 1978) было показано, что эти вариации носят похожий характер, но различны по амплитуде. В упоминавшейся выше работе (Li et al., 1997) было отмечено, что существует

корреляция на уровне 40 % между потоками релятивистских электронов внешнего РПЗ со скоростью СВ с запаздыванием на 2 сут на $L = 10$ и 4 сут на $L = 6,6$. Также отмечается корреляция потоков релятивистских электронов (с энергией выше 1 МэВ) на геостационарной орбите (ИСЗ LANL) со скоростью солнечного ветра в работе (Li et al., 2005), причем измерения проводились, как и в нашем случае, вблизи минимума солнечной активности (1995). Авторами статьи (Li et al., 2005) высказывается предположение, что механизмом вариаций потоков релятивистских электронов может служить либо радиальная диффузия, либо «разогрев» VLF-волнами, однако относительный вклад данных механизмов пока остается не ясен. Тем не менее, феноменологически зарегистрированное нами возрастание потоков релятивистских электронов, произошедшее после прихода к Земле высокоскоростного потока СВ, подтверждает выводы работы (Li et al., 2005).

Динамика потоков электронов РПЗ с энергией 0,3...3 МэВ на высотах 400... 500 км во время наиболее сильных магнитных бурь 2001–2005 гг., исследованная на основании данных ИСЗ «КОРОНАС-Ф», подробно показана в работах (Панасюк и др., 2004; Ермолаев и др., 2004; Кузнецов и др., 2007).

В рассматриваемом случае геомагнитное возмущение, вызвавшее описанные в п. 3 вариации потоков релятивистских электронов, не является не только сильной, но и, по сути дела, не может вообще считаться магнитной бурей в принятом смысле этого слова. Значительных суббурь в рассматриваемый период также не наблюдалось, но, как указывалось в п. 2, в этот период на ряде высокоширотных станций отмечалось возрастание волновой активности, что, вполне вероятно, и могло привести к наблюдавшемуся возрастанию потоков релятивистских электронов. Данное предположение представляется возможным, поскольку, согласно теоретическим расчетам (Bortnik et al., 2008), при нелинейном взаимодействии энергичных электронов с волнами большой амплитуды может происходить быстрое увеличение энергии электронов.

Выводы

Как было показано выше, прибором «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» в эксперименте было зарегистрировано значитель-

ное возрастание потока релятивистских электронов (энергии 1...4 МэВ) во внешнем радиационном поясе Земли, начавшееся после слабой магнитной бури ($D_{st} = -28$ nT) 13 марта 2009 г. и продолжавшееся до следующей серии магнитных возмущений 21 марта 2009 г.

Как уже отмечалось, в течение марта 2009 г. и буревая, и суббуревая (авроральная) активность была невысока, однако на ряде магнитных станций была зафиксирована значительная волновая активность. Весьма возможно, что именно волновая активность привела к ускорению электронов внешнего радиационного пояса.

Зарегистрированное возрастание потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ показывает, что даже слабые геомагнитные возмущения в сочетании с волновой активностью могут оказать весьма существенное влияние на радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 09-05-00798 и 07-02-92004-ННС_а.

Литература

- Вакулов П. В., Коврыгина Л. М., Минеев Ю. В., Тверская Л. В. (1975) Динамика внешнего пояса энергичных электронов во время умеренной магнитной бури // Геомагнетизм и аэрномия. 1975. Т. 15. № 6. С. 1028–1032.
- Емельяненко С. П., Кузнецов С. Н., Столповский С. Г. (1978) Внешний радиационный пояс во время сильной магнитной бури // Космич. исслед. 1978. Т. 16. № 4. С. 529–543.
- Ермолаев Ю. И., Зеленый Л. М., Застенкер Г. Н. и др. (2005) Год спутя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45. № 1. Р. 1–41.
- Кузнецов С. Н., Мяжкова И. Н., Юшков Б. Ю., Муравьева Е. А., Кудела К. (2007) Динамика внешнего радиационного пояса во время сильных магнитных бурь по данным «КОРОНАС-Ф» // Астрономич. вестн. 2007. Т. 41. № 4. С. 338–347.
- Кузнецов С. Н., Тверская Л. В. (2007) Модель космоса. Физические условия в космическом пространстве. Радиационные пояса / Под ред. проф. Панасюка М. И. М.: КДУ. 2007. Т. 1. Гл. 3, 4. С. 518–546.

- Панасюк М. И., Кузнецов С. Н., Лазутин Л. Л. и др. (2004) Магнитные бури в октябре 2003 года // Космич. исслед. 2004. Т. 42. № 5. С. 509–554.
- Baker D. N. et al. (1997) Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. N. A7. P. 14,141–14,148.
- Blake J. B., Kolasinski W. A., Fillius R. W., Mullen E. G. (1992) Injection of electrons and protons with energies of tens of MeV into $L < 3$ on March 24, 1991 // Geophysical Research Letters. 1992. V. 19. P. 821–833.
- Bortnik J., Thorne R. M., Inan U. S. (2008) Nonlinear interaction of energetic electrons with large amplitude chorus // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. Iss. 21. CiteID L21102, doi:10.1029/2008GL035500.
- Li X., Baker D. N., Temerin M., Cayton T. E., Reeves E. G. D., Christense R. A., Blake J. B., Looper M. D., Nakamura R., Kanekal S. G. (1997) Multisatellite observations of the outer zone electron variation during the November 3-4, 1993, magnetic storm // J. Geophysical Research. 1997. V. 102A, P. 14,123–14,140.
- Li X., Baker D. N., Temerin M., Reeves G. D., Friedel R., Shen C. (2005) Energetic electrons, 50 keV – 6 MeV, at geosynchronous orbit: their responses to solar wind variations // Space Weather. 2005. V. 3. P. S04001. doi:10.1029/2004SW000105.
- Williams D. J., Arens J. F., Lanzerotti L. J. (1968) Observations of trapped electrons at low and high altitudes // J. Geophysical Research. 1968. V. 73. P. 5673–5696.

**RELATIVISTIC ELECTRONS VARIATIONS IN OUTER
ERB DURING MARCH 2009 – THE FIRST RESULTS
OF “ELECTRON-M-PESKA” (CORONAS-PHOTON)**

**I. N. Myagkova, M. I. Panasyuk, Yu. I. Denisov,
V. V. Kalegaev, L. I. Starostin**

*Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute
of Nuclear Physics (MSU SINP)*

The analysis of electron (1...4 MeV) flux enhancement detected on board CORONAS-PHOTON satellite in the outer radiation belt of the Earth in the middle of March, 2009 are carried out. It was observed after the weak magnetic disturbance caused by arrival to the Earth on March, 13th of the high-speed solar wind

stream. The possible physical reasons of observed relativistic electron enhancement in the outer radiation belt are discussed.

Keywords: Relativistic electrons, outer radiation belt of the Earth, magnetic disturbances, solar wind.

Myagkova Irina Nikolaevna — Senior scientist, Ph. D. E-mail: irina@srd.sinp.msu.ru.

Panasyuk Mikhail Igorevich — Director of MSU SINP.

Denisov Juri Ivanovich — Senior scientist, Ph. D.

Kalegaev Vladimir Vladimirovich — Senior scientist, Doctor of sciences. E-mail: klg@decl.sinp.msu.ru.

Starostin Lev Ivanovich —

СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРА «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА ИСЗ «КОРОНАС-ФОТОН»

**В. В. Калегаев, Д. А. Парунакян, В. О. Барина, Ю. И. Денисов,
И. Н. Мягкова, М. И. Панасюк, Л. И. Старостин**

*Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва*

Полностью автоматизированная система обработки и хранения данных измерений прибора «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» в эксперименте на спутнике «КОРОНАС-ФОТОН» разработана на основе программно-аппаратного комплекса HP Proliant DL-385 — Система управления базами данных (СУБД) Oracle. Для доступа к данным созданы веб-формы, размещенные на Интернет-портале Центра данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ (ЦДОКМ НИИЯФ) <http://smdc.sinp.msu.ru>. Поток энергичных заряженных частиц, зарегистрированные прибором за последние два часа и за последние 12 ч непрерывных измерений, размещаются на главной странице портала ЦДОКМ НИИЯФ в разделе «Космическая погода».

Ключевые слова: космическая радиация, околоземное космическое пространство, базы данных

Введение

Важнейший аспект научного исследования космического пространства — сохранение полученной информации и обеспечение эффективного доступа к ней. Поэтому создание инфор-

Калегаев Владимир Владимирович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: klg@dec1.sinp.msu.ru.

Парунакян Давид Алексеевич — программист 1-й категории. E-mail: jaffar.gumith@gmail.com.

Барина Вера Олеговна — младший научный сотрудник. E-mail: alisawera@gmail.com.

Денисов Юрий Иванович — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: yuden@coronas.ru.

Мягкова Ирина Николаевна — старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук. E-mail: irina@srd.sinp.msu.ru.

Панасюк Михаил Игоревич — директор НИИЯФ МГУ, д-р физ.-мат. наук. E-mail: panasyuk@sinp.msu.ru.

Старостин Лев Иванович — программист 1-й категории. E-mail: levira.star@mail.ru.

мационно-вычислительных систем, включающих средства хранения и интеллектуальные средства доступа к данным, является необходимым элементом любых космических экспериментов. Особое значение это имеет при проведении прикладных исследований, связанных с прогнозированием радиационной обстановки, поскольку энергичные заряженные частицы, а также другие факторы космического происхождения оказывают воздействие на материалы и оборудование космических аппаратов, наземные системы, и, в некоторых случаях, на жизнь и здоровье членов экипажей.

Прибор «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА», установленный на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ) «КОРОНАС-ФОТОН», предназначен для регистрации потоков электронов, протонов, альфа-частиц и частиц группы CNO. Такие измерения дают важную информацию о динамике частиц космических лучей и радиационных поясов и позволяют вести непрерывный мониторинг радиационного состояния околоземного космического пространства. Для работы с данными измерений прибора «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» в НИИЯФ МГУ создана автоматизированная информационная система. Система функционирует на базе программно-аппаратного комплекса, состоящего из вычислительного кластера (восемь серверов HP Proliant — 32 вычислительных ядра Orteron) и сервера баз данных HP Proliant DL-385 под управлением СУБД Oracle. Управление данными и доступ к данным реализуются через веб-портал Центра данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ <http://smdc.sinp.msu.ru> (Parunakian et al., 2008).

В настоящей работе будут даны описание информационной системы для хранения и доступа к данным измерений прибора «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» и планы ее использования для оценки радиационного состояния околоземного космического пространства.

1. Информационная система обработки и хранения данных измерений прибора «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА»

Для эффективной работы с данными создано программное обеспечение. В состав пакета программ входят следующие системы:

- загрузки данных научной телеметрии;

- дешифровки научной телеметрии;
- загрузки параметров орбиты;
- расчета орбиты спутника;
- загрузки данных на ftp-сервер и в базу данных (БД) Oracle;
- доступа к данным в БД Oracle;
- визуализации данных;
- «реального времени» для анализа радиационного состояния космического пространства.

Первичные данные поступают на FTP-сайт Московского Инженерно-физического института (государственного университета) (МИФИ). Сервер НИИЯФ МГУ периодически опрашивает хранилище файлов научной телеметрии в МИФИ на наличие свежей информации, относящейся к прибору «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА». При поступлении новых данных измерений файлы копируются на сервер в НИИЯФ МГУ, где немедленно запускается программа дешифровки. Обработанный файл с данными измерений потоков заряженных частиц и исходный файл научной телеметрии размещаются на FTP-сервере Центра данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ <ftp://smdc.sinp.msu.ru> в разделах L1 и L0 файловой системы, соответственно.

Одновременно с сайта <http://celestrak.com> загружаются текущие файлы с параметрами орбиты спутника «КОРОНАС-ФОТОН» (файлы tle). В автоматическом режиме рассчитывается траектория спутника: вычисляются геодезические, географические координаты, солнечно-магнитные координаты и координаты Мак-Илвайна (L-V). Данные измерений и координаты спутника загружаются в базу данных под управлением СУБД Oracle. Текущие измерения потоков частиц, зарегистрированные прибором за последние два часа работы и за последние 12 ч, размещаются на главной странице портала ЦДОКМ НИИЯФ, на графиках для предварительного ознакомления в разделе «Космическая погода» (представлены два канала: протоны 4...16 МэВ и электроны 1...4 МэВ). Изображения являются гипертекстовыми ссылками на архив всех изображений профилей потоков на временных интервалах 2 и 12 ч, на которых, кроме указанных выше двух каналов, приводятся данные по потокам протонов $E > 80$ МэВ и электронов $E < 1$ МэВ, географические сферические декартовы координаты, а также магнит-

ное локальное время. На рис. 1 представлена главная страница веб-портала ЦДОКМ НИИЯФ МГУ <http://smdc.sinp.msu.ru> с текущими измерениями потоков заряженных частиц на орбите спутника «КОРОНАС-ФОТОН».

В базу данных в автоматическом режиме загружались все измерения потоков заряженных частиц прибором «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА», с момента начала устойчивой работы прибора 4 марта 2009 г. На начало июля общий объем принятых телеметрических

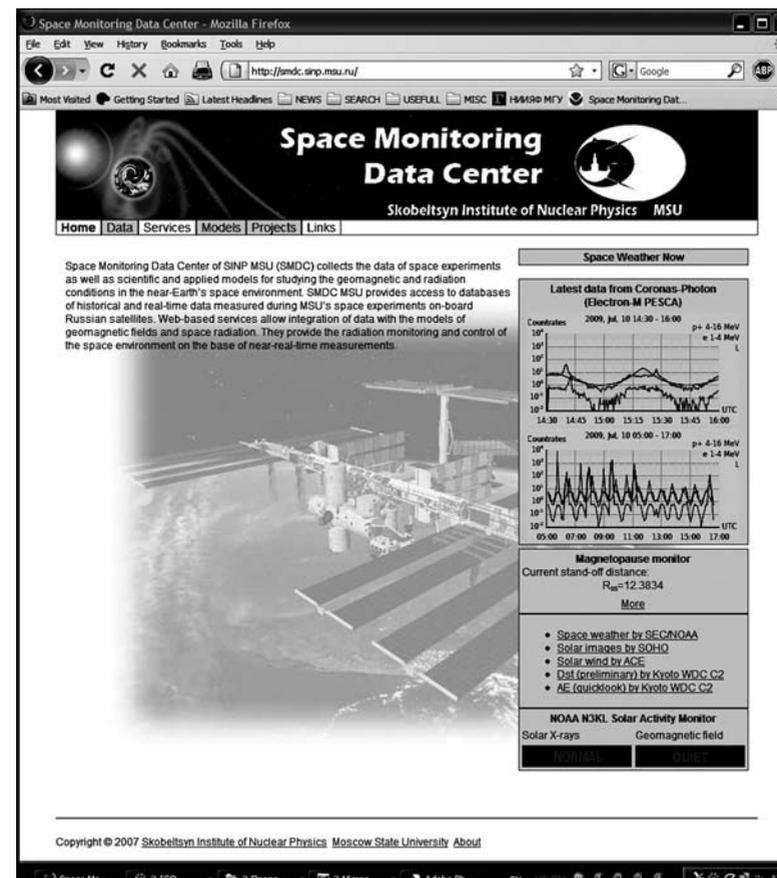


Рис. 1. Текущие измерения КА «КОРОНАС-ФОТОН» (прибор «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА») на главной странице портала ЦДОКМ НИИЯФ

данных составил около 200 Мбайт; после обработки и расчетов орбиты спутника получены текстовые таблицы общим объемом около 2 Гбайт и сгенерированы файлы предварительного просмотра изображений объемом около 300 Мбайт. Ко всей информации обеспечен открытый доступ через Интернет. Система доступа к данным реализована на языке Python. На рис. 2 изображена схема информационного поиска в базе данных.

Для доступа к данным созданы веб-формы, размещенные на Интернет-портале <http://smdc.sinp.msu.ru>. Доступ к данным осуществляется через раздел портала DATA / Coronas-Photon. Для получения информации необходимо выбрать формат представления (таблица на экране, графический файл, текстовый файл), указать интервал времени и нужные каналы. На рис. 3 представлена форма доступа к данным измерений КА «КОРОНАС-ФОТОН» (прибор «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА») на сайте Центра данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ. Пользователь заполняет поля веб-формы, после чего

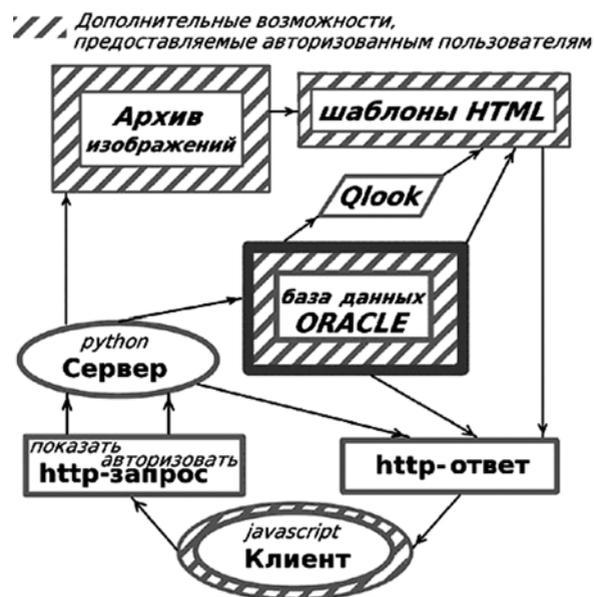


Рис. 2. Схема информационного поиска документов и результатов измерений в базе данных

сервер на основе введенной информации генерирует SQL-запрос к базе данных Oracle.

Графические изображения строятся с использованием пакета графических программ QLOOK, также разработанного в НИИЯФ МГУ (Баранова и др., 2007). На рис. 4 представлен пример работы системы визуализации: вариации потоков электронов с энергиями 1...4 и 0,2...1 МэВ и протонов с энергиями 4...16 и более 80 МэВ, измеренные 6 июля 2009 г. вдоль орбиты КА «КОРОНАС-ФОТОН» за период UT 2...4 ч.

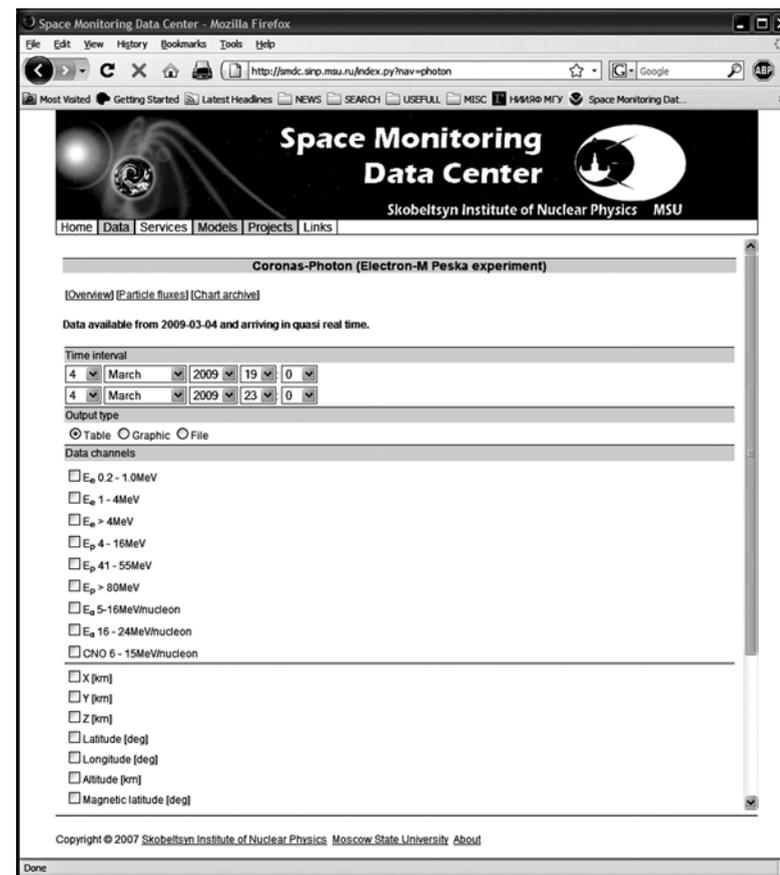


Рис. 3. Форма доступа к данным измерений КА «КОРОНАС-ФОТОН» (прибор «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА») на сайте Центра данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ <http://smdc.sinp.msu.ru>

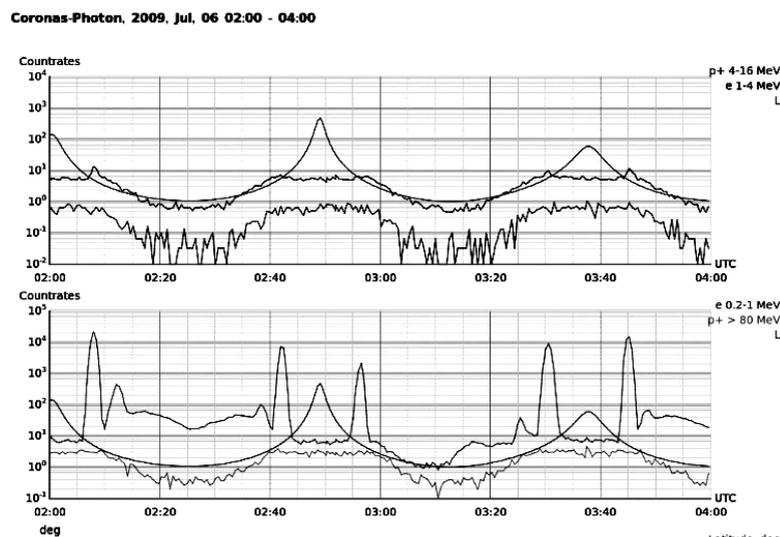


Рис. 4. Вариации потоков электронов с энергиями 1...4 и 0,2...1 МэВ и протонов с энергиями 4...16 и >80 МэВ за период UT 2...4 ч 6 июля 2009 г.

Важной характеристикой системы является ее открытость, переносимость и масштабируемость. Данные измерений могут быть получены любым заинтересованным специалистом через веб-интерфейсы без каких-либо ограничений доступа. Архитектура системы предусматривает возможность ее развертывания и в других заинтересованных космических центрах, на других вычислительных платформах и в других операционных средах. По мере накопления данных и расходования вычислительных ресурсов к системе могут быть добавлены новые дисковые массивы и вычислительные модули кластера.

2. Оценка радиационного состояния околоземного космического пространства по данным измерений прибора «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА»

Важным направлением физики космоса является исследование влияния факторов внеземного происхождения на радиационные процессы в околоземном космическом пространстве, прогнозирование его состояния в связи с гелиогеофизической

активностью (Панасюк и др., 2004). Процессы в радиационных поясах, солнечные протонные события могут воздействовать на космическую среду, космические и наземные технологические системы и даже, в экстремальных случаях, на здоровье и жизнь людей. Исследование механизмов воздействия солнечной активности на радиационное окружение Земли является актуальной задачей проекта «КОРОНАС-ФОТОН».

Непрерывные измерения потоков энергичных заряженных частиц в магнитосфере прибором «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» позволяют приступить к созданию системы мониторинга радиационного состояния околоземного пространства. Комплексная информационная система может обеспечить эффективный доступ к архивам данных, космофизическим моделям и утилитам для обработки данных на основе Интернет-технологий. С использованием инженерных версий моделей космической среды и средств распределенной обработки и доступа к данным выполняется анализ вариаций магнитосферного магнитного поля, потоков энергичных заряженных частиц и границ радиационных поясов вдоль орбит спутников, что позволяет выполнить оперативный анализ геомагнитного и радиационного состояния космической среды. По данным измерений потоков заряженных частиц можно восстановить состав и спектры энергичных протонов и электронов в диапазонах энергий сотни килоэлектронвольт — сотни мегаэлектронвольт, положения границ радиационных поясов и границ проникновения солнечных энергичных частиц в полярные области земной ионосферы.

Наиболее достоверная информация о процессах, происходящих в магнитосфере Земли, может быть получена на основе анализа одновременных измерений, выполняемых в разных областях космического пространства. При исследовании динамических магнитосферных процессов ключевое значение имеет информация о состоянии солнечного ветра, а также о величине и направлении межпланетного магнитного поля. Измерения этих параметров межпланетной среды космическим аппаратом ACE (космический аппарат ACE изготовлен NASA и запущен в 1997 г.) позволяют заблаговременно получать информацию о возмущениях в межпланетном пространстве, способных повлиять на состояние магнитосферы, в том числе и радиационное.

На главной странице портала <http://smdc.sinp.msu.ru> расположен монитор положения магнитопаузы, который в режиме

реального времени строит текущие значения расстояния от центра Земли до подсолнечной точки магнитосферы. Для этого с периодичностью один раз в час производится автоматическая загрузка и обработка нового пакета данных параметров солнечного ветра с КА ACE. По этим данным рассчитываются таблицы и графики часовой и суточной динамики магнитопаузы. На рис. 5 представлены расчеты положения магнитопаузы, выполненные 14 июля 2009 г.

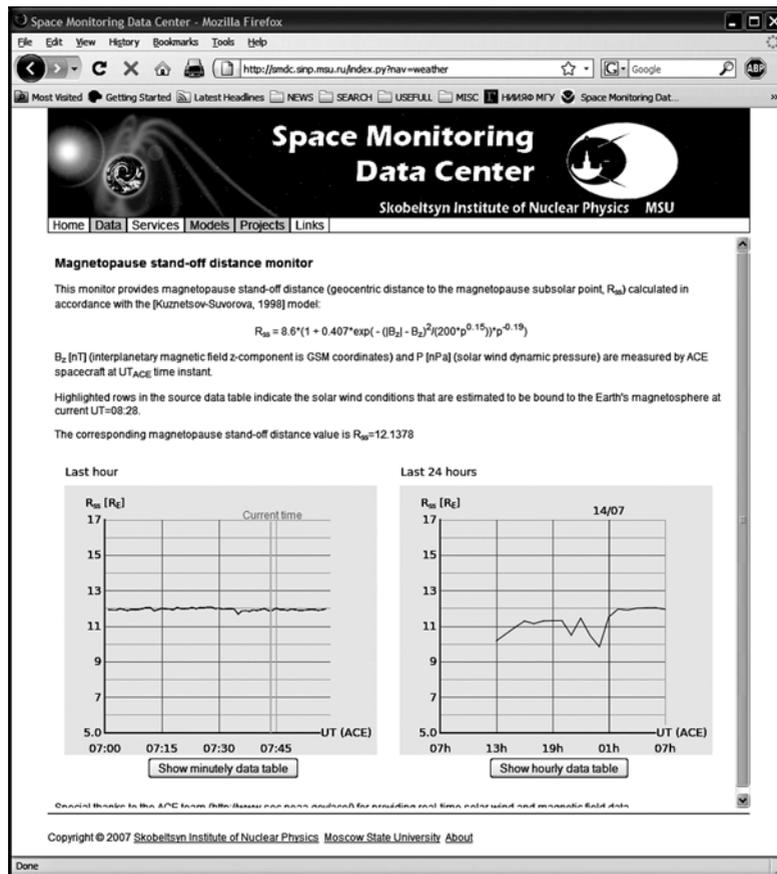


Рис. 5. Вариации положения магнитопаузы по данным космического аппарата ACE на сайте ЦДОКМ (слева — в течение часа, справа — за прошедшие сутки)

Данные непрерывного космического мониторинга параметров солнечного ветра и потоков заряженных частиц в магнитосфере позволяют получить ключевые результаты о воздействии солнечной активности на радиационное окружение Земли, составляющие фундаментальную основу эксперимента «КОРОНАС-ФОТОН» / «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА». Эти результаты обеспечивают оперативный анализ радиационной обстановки на отдельных витках орбит и других ИСЗ и орбитальных станций, исходя из текущих величин потоков заряженных частиц на орбите Земли, текущего состояния параметров солнечного ветра и возмущенности магнитосферы и пространственно-временных координат движения космических аппаратов.

Заключение

Базы данных космических экспериментов являются эффективным инструментом для исследования процессов в космическом пространстве. Данные оперативного космического мониторинга потоков заряженных частиц в околоземном космическом пространстве позволяют осуществить анализ радиационного состояния магнитосферы с использованием расчетов в рамках моделей космической среды и на базе современных информационных технологий. Такой мониторинг позволяет прояснить актуальные вопросы о влиянии солнечной активности на радиационные процессы в ближнем космосе.

Работа частично поддержана РФФИ, проект № 09-05-00798.

Литература

- Баранова В. О., Парунакян Д. А., Калегаяев В. В. (2007) Система визуализации данных научных измерений Qlook 2.0 // Всерос. науч. конф. «Научный сервис в сети Интернет». Новороссийск, 24–29 сентября 2007. М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 316–318.
- Панасюк М. И. и др. (2004) Магнитные бури в октябре 2003 г. // Космич. исслед. 2004. Т. 42. № 5. С. 509–554.
- Parunakian D. A., Kalegaev V. V., Bobrovnikov S. Yu., Barinova W. O. (2008) SINP space monitoring data center portal // Proc. 7th Intern. Conf. “Problems of Geocosmos” 26–30 May, 2008. SPb.: St. Petersburg University (SPbU), 2008. P. 206–210.

PROCESSING AND COLLECTING OF MEASUREMENTS
FROM ELECTRON-M-PESCA DEVICE DURING EXPERIMENT
ON-BOARD CORONAS-PHOTON SATELLITE

V. V. Kalegaev, D. A. Parunakyan, V. O. Barinova, Yu. I. Denisov,
I. N. Myagkova, M. I. Panasyuk, L. I. Starostin

*Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute
of Nuclear Physics (MSU SINP)*

Our information system for processing and subsequent storage of data measured by the Electron-M-Pesca device onboard CORONAS-PHOTON satellite is built on the platform comprised of a HP Proliant DL-385 server and Oracle 10g RDBS. A number of web forms have been developed in order to provide access to the data from the Internet portal of Space Monitoring Data Center of the Institute of Nuclear Physics, Moscow State University <http://smdc.sinp.msu.ru>. Energetic particle fluxes registered by ELECTRON-M-PESCA device during the last two hours and the last 12 hours of continuous measurements are now available on the main page of the SMDC portal in the Space Weather chapter.

Keywords: space radiation, near Earth's environment, data bases.

Kalegaev Vladimir Vladimirovich — Senior scientist, Ph. D., E-mail: klg@dec1.sinp.msu.ru)

Parunakyan David Alexeevich — Programmer. E-mail: affar.rumith@gmail.com.

Barinova Vera Olegovna — Young scientist. E-mail: alisawera@gmail.com.

Denisov Yuriy Ivanovich — Senior scientist, Ph. D. E-mail: yuden@coronas.ru.

Myagkova Irina Nikolaevna — Senior scientist, Ph. D. E-mail: irina@srd.sinp.msu.ru.

Panasyuk Mikhail Igorevich — Director of MSU SINP, Doctor of science. E-mail: panasyuk@sinp.msu.ru.

Starostin Lev Ivanovich — Programmer. E-mail: levira.star@mail.ru.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ
СПЕКТРОМЕТРА-ТЕЛЕСКОПА СТЭП-Ф
И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИАЦИОННОГО
КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

А. В. Дудник¹, В. К. Персиков², Д. Бошер³,
Ю. Д. Котов⁴, В. Н. Юров⁴

¹ Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Харьков, Украина

² ОАО «АО НИИ радиотехнических измерений», Харьков, Украина

³ Национальный аэрокосмический исследовательский центр ONERA,
Тулуза, Франция

⁴ Московский инженерно-физический институт (Государственный
университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный
исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)),
Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва

Представлены описание спутникового спектрометра-телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф, его конструктивные особенности. Рассмотрены отдельные узлы и модули, методы их настройки, калибровки и испытаний (автономных и комплексных) в составе комплекса научной аппаратуры «ФОТОН» и космического аппарата. По результатам первых недель работы в ходе летных испытаний представлены уточненные данные по геометрическим факторам прибора и энергетическим диапазонам, как прямой регистрации заряженных частиц высоких энергий, так и по каналам смешанной регистрации нескольких сортов частиц. С целью проверки правильности распределения заряженной радиации на высотах полета КА «КОРОНАС-ФОТОН» проведено предварительное картографирование в нескольких протонных энергетических каналах.

Ключевые слова: детектор частиц, телескоп, компьютерное моделирование, калибровка, аналоговая обработка, ускоритель заряженных частиц, радиационные пояса, солнечная активность, магнитосфера, электроны, протоны, Южно-Атлантическая Аномалия

Дудник Алексей Владимирович — заведующий сектором космических исследований ХНУ им. В. Н. Каразина, канд. физ.-мат. наук. E-mail: Oleksiy.V.Dudnik@univer.kharkov.ua.

Персиков Валентин Константинович — заведующий отделом ОАО «Акционерное общество НИИ радиотехнических измерений».

E-mail: persikov@niiri.kharkov.com

Бошер Даниэл — руководитель группы радиационных эффектов Национального Аэрокосмического исследовательского центра ONERA. E-mail: Daniel.Boscher@onera.fr.

Котов Юрий Дмитриевич — директор ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: kotov@mephi.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Введение

Научный эксперимент с использованием спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф проводился в составе комплекса научной аппаратуры «ФОТОН» на основе договора о научно-техническом сотрудничестве между Харьковским национальным университетом им. В. Н. Каразина (Украина) и Национальным исследовательским ядерным университетом «МИФИ» (Россия), а также решений четырехсторонних совещаний полномочных представителей академий наук и космических агентств России и Украины (*Залюбовский* и др., 1997). Проект «КОРОНАС-ФОТОН» — один из немногих, входящих в совместную программу Российской академии наук, Национальной академии наук Украины и космических агентств обеих стран по фундаментальным космическим исследованиям с использованием автоматических космических аппаратов (*Дудник, Залюбовский, 2000*).

С учетом низкой орбиты и ее высокого наклона в ходе эксперимента можно было изучать не только динамику частиц магнитосферного происхождения, но и проникновение солнечных космических лучей в полярные «шапки» Земли, а также природу микровсплесков частиц на низких широтах.

1. Цели и научные задачи эксперимента

Основная цель проведения эксперимента — исследование динамики энергетических спектров и питч-угловых распределений высокоэнергичных электронов, протонов и альфа-частиц радиационных поясов Земли во время магнитосферных бурь и суббурь, а также при воздействии высокоскоростных потоков солнечного ветра на магнитосферу Земли. Предусматривалось также изучение динамики потоков высокоэнергетических частиц в магнитосфере Земли при их связи с волновыми процессами в электромагнитном диапазоне (*Дудник* и др., 2008).

В ходе реализации эксперимента в периоды повышенной солнечной активности планировалось определить высоты пре-

имущественного влияния электрической и магнитной компонент флуктуаций магнитного поля Земли на процесс радиальной диффузии частиц радиационных поясов (*Dudnik, 1996*); исследовать природу микровсплесков энергичных электронов на низких и приэкваториальных широтах (*Кудрявцев* и др., 2005); изучить взаимосвязь потоков захваченных и высыпающихся частиц магнитосферного происхождения с протонными вспышками на Солнце и солнечными космическими лучами.

2. Состав и конструктивные особенности прибора СТЭП-Ф

Прибор состоит из блока детекторов СТЭП-ФД, установленного вне герметичного отсека космического аппарата, и блока обработки цифровой информации СТЭП-ФЭ, находящегося внутри гермоотсека (рис. 1).

Телескопическая система (рис. 2) детекторной головки блока детекторов СТЭП-ФД содержит два идентичных кремниевых позиционно-чувствительных матричных детектора D1 и D2 (размером 45×45 мм и толщиной 380 мкм каждый) и два сцинтилляционных детектора на базе монокристаллов CsI(Tl), «просматриваемых» фотодиодами большой площади (в детекторном слое D3) и фотоэлектронным умножителем (в детекторе D4). Общий угол зрения телескопа составляет 108×108° для малых энергий частиц и 98×98° для высоких энергий. Размер каждого

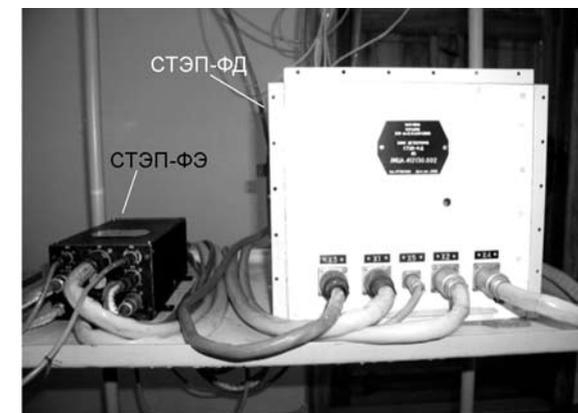


Рис. 1. Общий вид летного образца прибора СТЭП-Ф

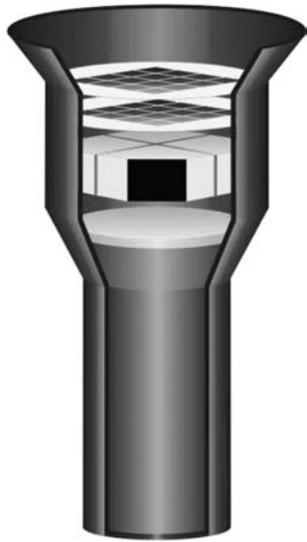


Рис. 2. Схематическое изображение телескопической системы из детекторов частиц

из 36 квадратных элементов матричного полупроводникового детектора составляет $7,3 \times 7,3$ мм, что позволяет получить среднее угловое разрешение около 8° в общем поле зрения телескопа для высокоэнергетических частиц (Frolov et al., 2001). Эффективные площади каждого из полупроводниковых детекторов — 17 см^2 , сцинтилляционных кристаллических детекторов — 36 и 49 см^2 , соответственно.

В нормальном режиме прибор после его включения работает непрерывно. Информация, выдаваемая в систему сбора и регистрации научной информации (ССРНИ) через каждые 30 с, содержит данные о потоках и угловых распределениях частиц. Минимальное временное разрешение данных составляет 2 с с целью изучения тонкой структуры

временной динамики потоков частиц (с высокой плотностью потока) во время прохождения космического аппарата через радиационные пояса, Южно-Атлантическую Аномалию и приполярные области.

Прибор определяет направление прихода каждого из трех сортов частиц, прошедших через (как минимум) два первых детектора. Эта информация поступает с временным разрешением 2 с, что позволяет, в частности, определять границы проникновения солнечных космических лучей средних энергий в магнитосферу Земли в приполярных областях, а также динамику наполнения радиационных поясов электронами и протонами из межпланетного пространства.

3. Отработка и испытания образцов прибора

На первоначальном этапе разработки прибора было проведено компьютерное моделирование методом Монте-Карло (с помощью библиотеки программ GEANT4) процессов прохож-

дения заряженных частиц через материалы детекторов. Были получены кривые зависимостей поглощенных энергий и ионизационных потерь в зависимости от первичной энергии для трех сортов заряженных частиц (Дудник и др., 2003; Дубина, Дудник, 2007), позволившие сформулировать требования к параметрам узлов аналоговой обработки сигналов.

Настройка электрических параметров прибора проводилась с помощью специально разработанной и изготовленной контрольно-испытательной аппаратуры, позволившей не только определить и отрегулировать 69 каналов аналоговой обработки сигналов от детекторов, но и проверить правильность формирования выходных информационных массивов по различным интерфейсам связи с бортовыми системами космического аппарата.

В лабораторных условиях стабильные и короткоживущие радиоактивные изотопы использовались при проверке работоспособности детекторов частиц высоких энергий; с их помощью проведена градуировка аналоговой части прибора на выходах усилителей-формирователей в начальной части амплитудной шкалы откликов. Калибровка для более высоких энергий была продолжена на ускорителях заряженных частиц высоких энергий:

1) ионном циклотроне Института физических и химических проблем RIKEN (Япония), где были использованы пучки альфа-частиц с энергией 400 МэВ и ионов H_2 с энергией 140 МэВ (Dudnik et al., 2003);

2) ионном циклотроне НИИЯФ МГУ им. М. В. Ломоносова (Москва), где работа была проведена с пучками дейтронов энергией 15,3 МэВ и альфа-частицами энергией 30 МэВ;

3) электронном микротроне М-30 Института электронной физики Национальной академии наук — НАН Украины (Ужгород), с использованием электронов в диапазоне энергий 2...17 МэВ.

Автономные испытания трех макетов прибора — лабораторного, технологического и летного — проводились как в организации—разработчике прибора, так и на сертифицированной испытательной базе Харьковских предприятий космической отрасли Украины — акционерном обществе «НИИ радиотехнических измерений» и научно-производственном предприятии «Хартрон-Сигма», которые обеспечили температурные, вакуумные, климатические, механические и акустические воздействия.

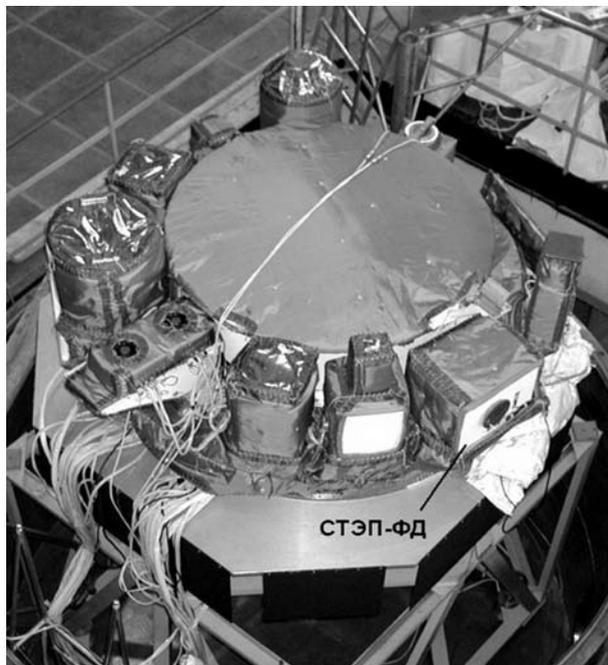


Рис. 3. Блок детекторов СТЭП-ФД технологического образца прибора во время проведения тепловакуумных испытаний в ФГУП «Научно-исследовательский институт электромеханики» (НИИЭМ), г. Истра

Стыковочные и комплексные испытания четырех макетов прибора осуществлены как в составе комплекса научной аппаратуры «Фотон» в институте Астрофизики НИЯУ МИФИ, так и в составе космического аппарата в организации–разработчике космического аппарата (рис. 3).

4. Технические и физические параметры прибора

Масса прибора составляет: СТЭП-ФД — 15,4 кг, СТЭП-ФЭ — 2,7 кг; потребляемая мощность — 39,9 Вт. Габаритные размеры блоков: СТЭП-ФД — 337×395×293 мм, СТЭП-ФЭ — 95×287×160 мм. Для низких энергий частиц полный угол зрения телескопической системы прибора составляет $108 \times 108^\circ$, для частиц с большими энергиями, проникающими в более глубокие слои материалов детекторов, полный угол зрения умень-

шается до $98 \times 98^\circ$. Среднее угловое разрешение в полном угле зрения телескопа $\sim 6^\circ$ при наклонном падении частиц и $\sim 14^\circ$ при вертикальном по отношению к плоскости детекторов падении частиц. Временное разрешение прибора: наименьшее — 2 с (12 отсчетов в 30 с) и стандартное — 30 с (1 отсчет за первые 24 с каждых 30 с).

В ходе наземных градуировочных испытаний, а также при предварительном анализе первых научных данных летных испытаний получены следующие диапазоны регистрируемых энергий заряженных частиц:

- 1) электроны e , МэВ: 0,35...0,95; 1,2...2,6 и $> 2,6$;
- 2) протоны p , МэВ: 7,4...10,0; 15,6...17,5; 17,5...20,4; 20,4...24,0; 24,0...28,0; 28,0...32,0; 32,0...37,0; 37,0...43,5; 43,5...51,8; 51,8...58,0 и $> 58,0$;
- 3) альфа-частицы α , МэВ: 29,8...40,5; 63,8...65,8; 65,2...70,8; 70,8...78,4; 78,4...86,8; 86,8...96,8; 96,8...109,0; 109,0...123,4; 123,4...145,0; 145,0...177,0 и $> 177,0$.

Каналы смешанной регистрации обусловлены невозможностью разделить сорта частиц в случае их остановки в самом верхнем детекторе телескопической системы прибора:

- 1) электроны с энергией $E_e = 0,18...0,51$ МэВ и протоны с энергией $E_p = 3,5...3,7$ МэВ;
- 2) протоны с энергией $E_p = 3,7...7,4$ МэВ и электроны с энергией $E_e = 0,55...0,95$ МэВ;
- 3) альфа-частицы с энергией $E_\alpha = 15,9...29,8$ МэВ и протоны с энергией $E_p = 7,4...10,0$ МэВ.

5. Программное обеспечение для экспресс-анализа научных данных

С целью экспресс-анализа качества получаемой с прибора информации и преобразования бинарных данных в формат, удобный для использования стандартными программными средствами, была разработана программа MicroEye.exe. Выделены три типа текстовых файлов, образованных в результате обработки этой программы:

- 1) структура файлов первого типа совпадает со структурой информационного цифрового массива, заложенной в специальное программное обеспечение микроконтроллера блока электроники СТЭП-ФЭ;

2) второй тип информационных файлов содержит столбцы с двухсекундными данными о потоках частиц в каждом из всех энергетических диапазонов для каждого сорта частиц во всех информационных цифровых массивах на протяжении всего периода, заложенного в исходный *.dat-файл системы сбора и регистрации научной информации;

3) третий тип файлов включает столбцы с 30-секундными данными о потоках частиц в каждом из всех энергетических диапазонов для каждого сорта частиц во всех информационных цифровых массивах на протяжении всего периода, заложенного в исходный *.dat-файл.

Визуализация данных с прибора СТЭП-Ф представляет собой графическое изображение зависимости потоков каждого сорта частиц в каждом из энергетических интервалов от времени с дискретностью: 2 с (для созданных текстовых файлов согласно второму типу информационных цифровых массивов), 30 с (для созданных текстовых файлов согласно третьему типу информационных файлов).

Пример визуализации данных о потоках протонов 31 марта 2009 г. с двухсекундным разрешением приведен на рис. 4.

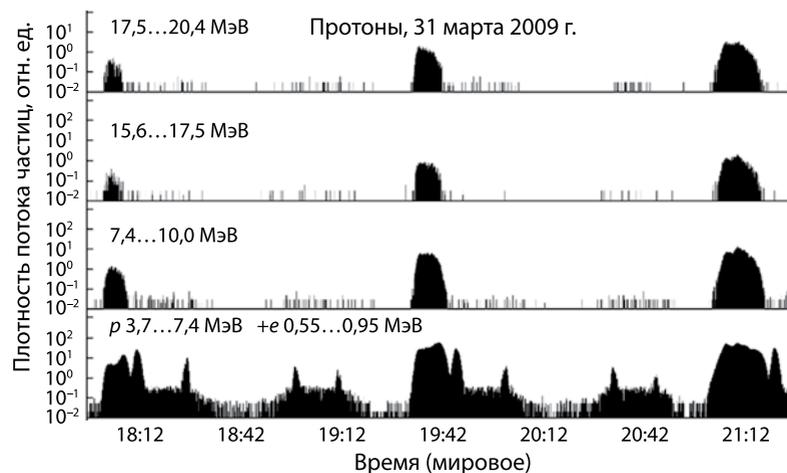


Рис. 4. Пример визуализации данных о потоках протонов 31 марта 2009 г., временное разрешение — 2 с

6. Предварительная проверка качества научной информации

С целью проверки адекватности отображения прибором СТЭП-Ф распределений заряженной радиации высокой энергии на низкой спутниковой орбите были проанализированы данные о потоках протонов в нескольких энергетических диапазонах. В магнито-спокойный период с 3 марта до 1 апреля 2009 г. спектральные плотности потоков протонов были нанесены на условную карту Земли для сопоставления с результатами радиационного картографирования околоземного пространства аналогичными приборами, установленными на других искусственных спутниках Земли.

На рис. 5, 6 показаны распределения протонов в энергетических диапазонах $\Delta E_p = 7,4...10,0$ МэВ и $\Delta E_p = 28,0...32,0$ МэВ, спроецированные на поверхность планеты. Обработка данных проведена на одном из режимов регистрации частиц, а именно — при накоплении протонов в полном телесном угле зрения прибора, т. е. без учета углового распределения, а также с максимально возможным временным разрешением — 30 с.

Несмотря на то, что орбита космического аппарата «КОРОНАС-ФОТОН» проходит значительно ниже радиационного пояса Земли, прибором СТЭП-Ф уверенно фиксируются энергичные протоны, которые углубляются вместе с силовыми линиями магнитного поля Земли до ионосферных высот

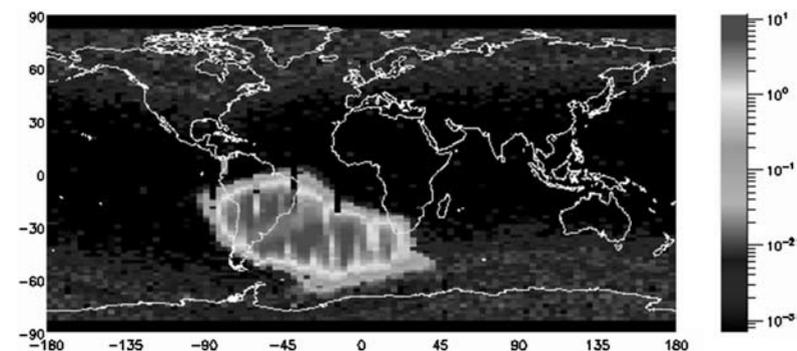


Рис. 5. Распределение числа протонов на высоте полета КА «КОРОНАС-ФОТОН» в диапазоне энергий $\Delta E = 7,4...10,0$ МэВ, полученное с помощью прибора СТЭП-Ф в период с 3 марта по 1 апреля 2009 г.

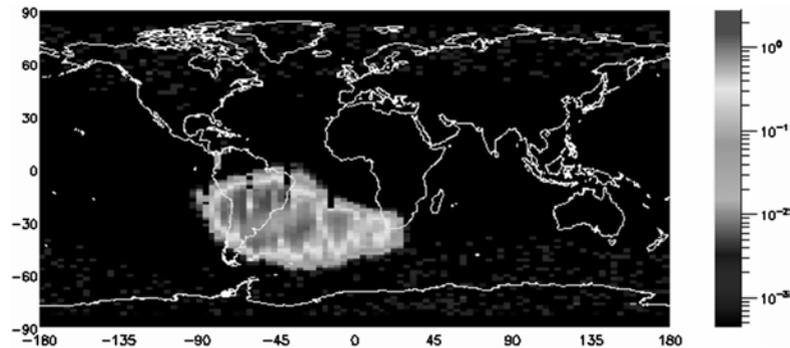


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но для диапазона энергий протонов $\Delta E_p = 28,0 \dots 32,0$ МэВ

в области Южно-Атлантической Аномалии. Заметны четкая структура и границы аномалии. Первые результаты радиационного картографирования прибором СТЭП-Ф уверенно повторяют данные предыдущих исследований околоземного пространства в периоды минимума солнечной активности.

Работа выполнена при поддержке Национального космического агентства Украины, контракты № 1-22/05 и 1-04/08.

Литература

- Дубина В. Н., Дудник А. В. (2007) Особенности детектирования электронов прибором СТЭП-Ф. Результаты моделирования // Сб. науч. тр. «Научная сессия МИФИ-2007»: В 14 т. М.: МИФИ, 2007. Т. 7. С. 26–27.
- Дудник А. В., Залюбовский И. И. (2000) Научные задачи международного космического эксперимента «КОРОНАС-ФОТОН» // Космічна наука і технологія. 2000. Т. 6. № 2/3. С. 3–12.
- Дудник А. В., Малыхина Т. В., Персиков В. К. (2003) Компьютерное моделирование прохождения частиц через детекторы спектрометра СТЭП // Сб. науч. тр. «Научная сессия МИФИ-2003». М.: МИФИ, 2003. Т. 7. С. 51–52.
- Дудник А. В., Мягкова И. Н., Муравьева Е. А., Юровский Ю. Ф. (2008) Поиск взаимосвязи СВЧ-радиовсплесков фона и динамики энергичных частиц по данным прибора МКЛ на ИСЗ «КОРОНАС-Ф» // Астроном. вестн. 2008. Т. 42. № 1. С. 75–85.
- Залюбовский И. И., Дудник А. В., Котов Ю. Д., Юров В. Н. (1997) Международный проект «ФОТОН» для комплексного изучения

солнечной активности и солнечно-земных связей // Изв. РАН. Сер. Физическая. 1997. Т. 61. № 6. С. 1173–1176.

Кудрявцев М. И., Логачев Ю. И., Морозов О. В., Свертилов С. И. (2005) Кратковременные возрастания потоков электронов с энергиями > 80 кэВ на орбитах станции «МИР» в низкоширотных ($L < 2$) областях: Препринт. № 2005-8/774. М.: НИИЯФ МГУ, 2005. 33 с.

Dudnik A. V. (1996) Precipitating Radiation Belt Electrons as a Source of High-Frequency Radio Emission // Radiation Measurements. 1996. V. 26. N. 3. P. 395–397.

Dudnik O. V., Goka T., Matsumoto H., Fujii M., Persikov V. K., Malykhina T. V. (2003) Computer simulation and calibration of the charge particle spectrometer-telescope STEP-F // Advances in Space Research. 2003. V. 32. N. 11. P. 2367–2372.

Frolov O. S., Dudnik A. V., Sadovnichiy A. A. et al. (2001) Development of silicon matrixes and channels of amplification of signals for a telescope-spectrometer of charge particles // Proc. 27th Intern. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany, 07–15 Aug. 2001. P. 2305–2308.

EXPERIMENTAL POSSIBILITIES OF THE STEP-F SPECTROMETER-TELESCOPE AND FIRST RESULTS OF THE RADIATION CARTOGRAPHY

O. V. Dudnik¹, V. K. Persikov², B. Danie³, Yu. D. Kotov⁴, V. N. Yurov⁴

¹ Kharkiv National University named V. N. Karazin, Kharkiv, Ukraine

² Scientific & Research Institute of radio technical measurements, LTD, Kharkiv, Ukraine

³ National Aerospace research Center ONERA, France

⁴ Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 — National Research Nuclear University “MEPHI” (NRNU MEPhI)), Astrophysics Institute MEPhI, Moscow

The satellite telescope of electrons and protons STEP-F description, its design features are presented. The individual components and modules, and methods of their adjustment, calibration and testing are given. As a result of the first weeks of device work during the flight tests refined specification of the instrument and the energy ranges of registering high energy charged particles are presented. To verify the adequacy of the charged radiation mapping on altitudes of the satellite CORONAS-PHOTON flight, preliminary cartography in several proton energy channels is performed.

Keywords: particle detector, telescope, computer simulation, calibration, analog processing, charge particle accelerator, radiation belts, solar activity, magnetosphere, electrons, protons, South Magnetic Anomaly.

Dudnik Oleksiy Volodymyrovich — Leader of the group, Ph. D. E-mail: Oleksiy.V.Dudnik@univer.kharkov.ua.

Persikov Valentin Konstantynovich — Head of the deputy. E-mail: persikov@niiri.kharkov.com.

Daniel Boscher — Chef de l'Unité Radiations et Effects de Charge, Departement Environnement Spatial, ONERA, Centre de Toulouse. E-mail: Daniel.Boscher@onera.fr.

Kotov Yury Dmitrievich — Director of the Astrophysics Institute MEPHI, Ph. D. E-mail: kotov@mephi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy Director of the Astrophysics Institute MEPHI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

НАБЛЮДЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СОЛНЦА: ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**В. Д. Кузнецов¹, Ю. Д. Жугжда¹, В. Н. Юров²,
Н. И. Лебедев¹, С. И. Болдырев¹**

¹ Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва

² Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) (МИФИ), Москва (с 07.2009 г. — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)), Институт астрофизики МИФИ (ИАФ МИФИ), Москва

Гелиосейсмологический эксперимент на космическом аппарате «КОРОНАС-ФОТОН» предназначен для изучения характеристик и внутреннего строения Солнца с помощью спектра собственных колебаний Солнца, полученного методом измерения вариаций интенсивности солнечного излучения. Он является продолжением исследований солнечных глобальных колебаний, начатых на ИСЗ «КОРОНАС-И» и «КОРОНАС-Ф». Измерения вариаций интенсивности излучения Солнца в семи оптических диапазонах — от ближней ультрафиолетовой до инфракрасной областей спектра — проводятся разработанным в ИЗМИРАН солнечным фотометром СОКОЛ (Солнечные КОлебания). По результатам наблюдений в начальный период работы прибора получены спектры *p*-мод колебаний Солнца.

Ключевые слова: гелиосейсмология, флуктуации яркости, температурные волны, *p*-моды, КОРОНАС-ФОТОН, солнечный фотометр СОКОЛ.

Гелиосейсмологический эксперимент СОКОЛ на ИСЗ «КОРОНАС-ФОТОН» является продолжением исследований солнечных глобальных колебаний, начатых на ИСЗ «КОРОНАС-И» (1994–2001) и «КОРОНАС-Ф» (2001–2005).

Кузнецов Владимир Дмитриевич — директор ИЗМИРАН, д-р физ.-мат. наук. E-mail: kvd@izmiran.ru.

Жугжда Юзеф Данилович — главный научный сотрудник, д-р физ.-мат. наук. E-mail: yzhugzhda@mail.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, канд. физ.-мат. наук. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Лебедев Николай Иванович — старший научный сотрудник. E-mail: lebedev@izmiran.ru.

Болдырев Сергей Иванович — заведующий сектором, канд. физ.-мат. наук. E-mail: boldyrev@izmiran.ru.

Фотометр СОКОЛ так же, как фотометр ДИФОС (ДИФференциальные Осцилляции Солнца) на спутнике «КОРОНАС-Ф», предназначен для многоцветной фотометрии флуктуаций яркости Солнца. Различные слои фотосферы вносят неодинаковый вклад в образование отдельных частей непрерывного спектра Солнца. Это, в принципе, открывает возможность для сейсмологии фотосферы на основе результатов наблюдений флуктуаций яркости в различных диапазонах непрерывного спектра. Эта идея была реализована в работах Стодилки М. И. (Стодилка, 2005), а также Жугжды Ю. Д. и Лебедева Н. И. (Жугжда, Лебедев, 2009). Удалось, при ряде предположений, получить зависимость амплитуды флуктуаций температуры, вызываемых p -модами, от глубины (от поверхности Солнца) в фотосфере Солнца. Эта зависимость была рассчитана на основе данных об изменении амплитуды флуктуаций яркости от длины волны оптического излучения Солнца, полученных по результатам эксперимента ДИФОС на спутнике «КОРОНАС-Ф» (рис. 1) (Жугжда и др., 2009). Было обнаружено наличие температурных волн, создаваемых пятиминутными колебаниями в фотосфере. О точности решения обратной задачи можно судить по рис. 2, на котором кружками обозначены данные прибора ДИФОС, а квадратами — данные солнечного фотометра SPM-SOHO. Сплошными кривыми показан результат

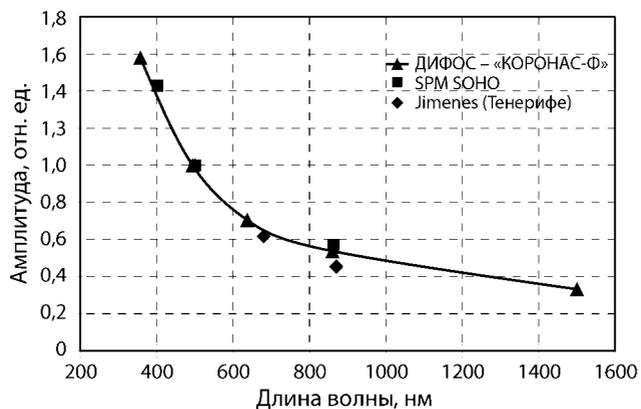


Рис. 1. Амплитуда собственных колебаний Солнца как функция длины волны наблюдения по результатам эксперимента ДИФОС «КОРОНАС-Ф»

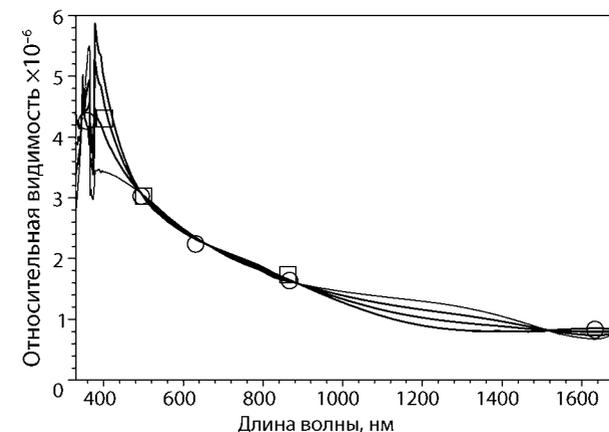


Рис. 2. Решение обратной задачи о видимости собственных колебаний Солнца как функции длины волны наблюдения по результатам эксперимента ДИФОС «КОРОНАС-Ф». Кружками показаны экспериментальные данные фотометра ДИФОС, квадратами — данные фотометра SPM (SOHO)

решения обратной задачи определения амплитуды флуктуаций температуры в фотосфере по данным о флуктуациях яркости в различных диапазонах непрерывного спектра. Разброс кривых определяет точность решения обратной задачи.

Очевидно, что для дальнейшего повышения точности решения обратной задачи необходимо увеличение числа диапазонов непрерывного спектра, в которых измеряются флуктуации яркости Солнца. Солнечный фотометр СОКОЛ имеет семь оптических диапазонов наблюдения и позволяет измерять флуктуации яркости в ближнем инфракрасном диапазоне, что существенно улучшает точность решения обратной задачи.

Научная программа эксперимента направлена на решение следующих задач:

- изучение зависимости относительной мощности солнечных колебаний от длины волны наблюдения и уточнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных результатов, полученных в предыдущих экспериментах;
- изучение взаимодействия акустических и тепловых волн в верхних слоях конвективной зоны (большой интерес

представляют наблюдения в диапазоне 1550 нм, излучение которого выходит из наиболее глубоких слоев фотосферы):

- изучение природы вариаций «солнечной постоянной»: определение относительного вклада пятен, факелов, фотосферной сетки и других проявлений солнечной активности в изменение солнечной постоянной;
- установление связи параметров собственных колебаний с проявлениями солнечной активности и определение условий возникновения колебаний;
- исследование зависимости параметров наблюдаемых глобальных колебаний от 11-летнего цикла солнечной активности;
- определение величины скорости звука как функции глубины от поверхности Солнца, распределения плотности и скорости вращения внутренних слоев Солнца;
- проведение наблюдений поглощения солнечного излучения атмосферой Земли для определения ее параметров и направления градиента плотности, а также локальных вариаций поглощения излучения по высоте.

Солнечный фотометр СОКОЛ был разработан и изготовлен Лабораторией экспериментальной гелиосейсмологии Учреждения Российской академии наук Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова. Конструктивно прибор состоит из одного блока (рис. 3, 4), который установлен вне гермоотсека космического аппарата и ориентирован оптической осью на центр Солнца.

Фотометр СОКОЛ дает возможность проводить измерения интенсивности солнечного излучения одновременно в спектральных каналах: 265, 340, 500, 650, 850, 1100 и 1550 нм с шириной полосы примерно 20 нм.

Относительная разрешающая способность фотометра в интенсивности составляет $1,5 \cdot 10^{-5}$ от полной интенсивности излучения Солнца за время накопления сигнала 1 с. Пространственное разрешение отсутствует (доступными для изучения являются колебательные моды низких степеней с $l \leq 3$). Поле зрения каналов фотометра — $2,8^\circ$, точность ориентации оси фотометра на центр солнечного диска определяется системой ориентации спутника и не превышает 10 угл. мин.

Рис. 3. Фотометр СОКОЛ на испытаниях

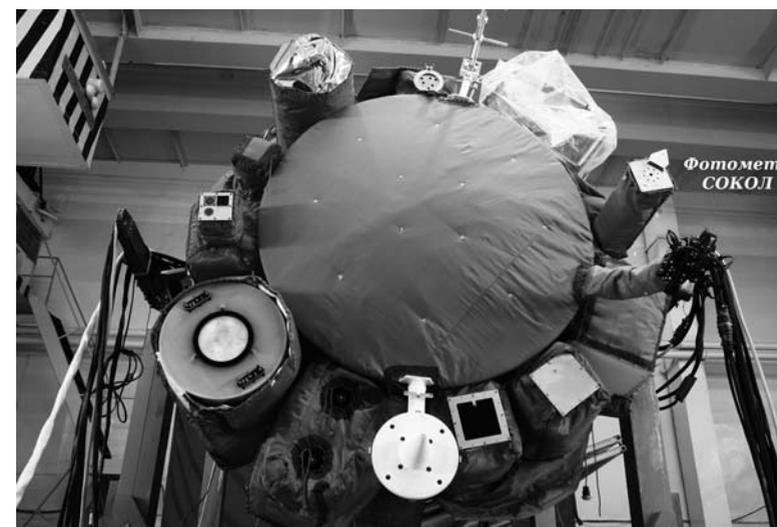


Рис. 4. Фотометр СОКОЛ на верхней платформе ИСЗ «КОРОНАС-ФОТОН»

Фотометр СОКОЛ был включен на спутнике «КОРОНАС-ФОТОН» 19 февраля 2009 г. в 19:59:35 МСК.

27 февраля в 21:02:27 была открыта защитная крышка входных окон фотометра, и прибор приступил к выполнению научной программы эксперимента.

Анализ телеметрической информации показывает, что внутренняя циклограмма работы прибора выполнялась без нарушений, незначительные потери данных при передаче со спутника, по-видимому, связаны с работой приемных пунктов телеметрии и отладкой программного обеспечения приемного центра. Температура панели фотоприемников находилась в заданных пределах, во время бестеневого периода работы спутника она не превышала 25 °С (рис. 5).

Первичная обработка поступающей научной информации включает разделение бинарных массивов научной информации по спектральным каналам наблюдения фотометра, исключение из данных наблюдений ошибочных измерений (выбросов) по критерию 3σ , коррекцию хода бортового времени и формирование суточных файловых массивов данных наблюдений. Подготовленная таким образом информация была использована для выполнения научных задач эксперимента. На рис. 6 приведен пример подготовленного ряда данных для одного витка (спектральный диапазон — 1550 нм).

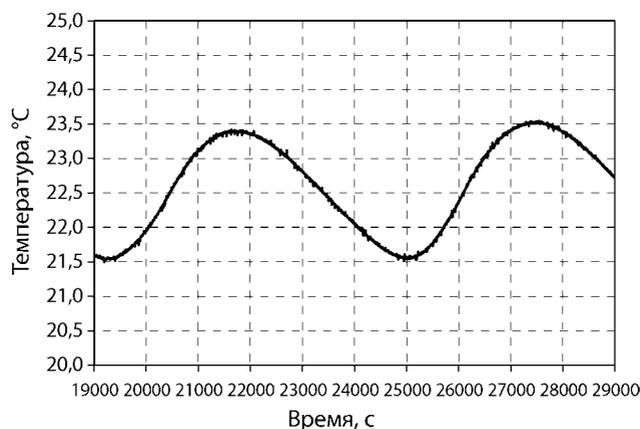


Рис. 5. Температурный режим фотоприемников для двух витков 6 апреля 2009 г. Время указано в секундах от начала суток

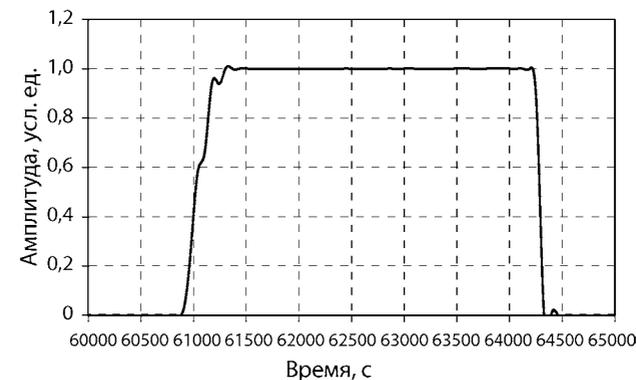


Рис. 6. Нормированный поток солнечного излучения в оптическом спектральном диапазоне 1550 нм за 1 марта 2009 г. (один виток). Время указано в секундах от начала суток

Исходная информация и данные после первичной обработки сохранялись в рабочем архиве компьютерной базы данных, а также на оптических дисках с целью длительного хранения.

Были начаты работы, направленные на получение научных результатов в рамках программы проведения эксперимента по исследованию глобальных солнечных колебаний.

Первый этап заключался в получении спектров собственных колебаний с целью определения точных частот, взаимных амплитуд и фазовых соотношений p -мод разных степеней. Для построения спектров брались непрерывные временные ряды длительностью от 2 до 3 сут. Длина ряда выбиралась исходя из времени жизни мод колебаний (2...7 сут). На рис. 7 показан один из таких спектров. Числа рядом с идентифицированными модами собственных колебаний обозначают степень l и радиальный порядок n соответствующей гармоники колебаний.

Поскольку относительная амплитуда колебаний крайне мала и составляет примерно 10^{-5} ... 10^{-6} яркости Солнца в соответствующем оптическом диапазоне наблюдений, для обеспечения требуемой точности в определении параметров колебаний необходимо многократно увеличить соотношение сигнал-шум. Для этого применяется метод накопления спектров, заключающийся в получении усредненного спектра колебаний за очень большой интервал времени наблюдений — порядка нескольких

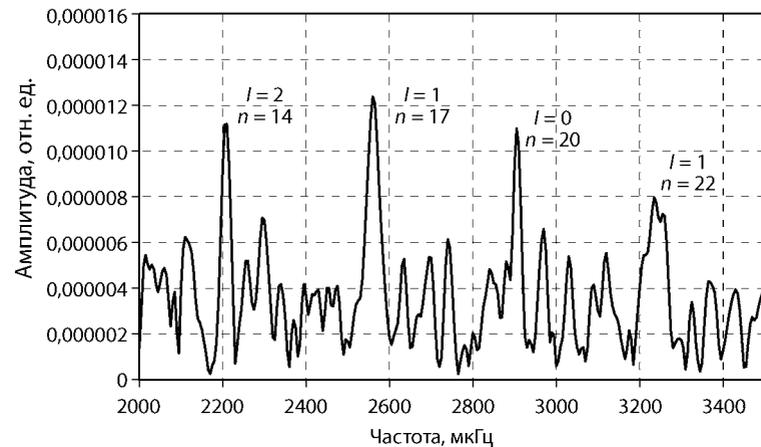


Рис. 7. Амплитудный спектр. Канал 1100 нм. 2–3 апреля 2009 г. Амплитуда приведена относительно полного солнечного потока в указанном спектральном диапазоне

месяцев. При этом мощность колебаний в интервале частот в районе 3000 нм, соответствующем пятиминутным колебаниям, значительно увеличивается. Пример такого усредненного спектра для канала 1550 нм за относительно небольшой период — со 2 по 16 апреля 2009 г., построенного по трехдневным рядам данных, приведен на рис. 8. На графике видно относительное увеличение амплитуды колебаний вблизи частоты 3000 мкГц, соответствующей области пятиминутных колебаний Солнца.

В процессе исследований результатов наблюдений фотометра ДИФОС в проекте «КОРОНАС-Ф» проводилось сравнение данных наблюдений прибора ДИФОС и фотометров SPM (Solar PhotoMeter) гелиосейсмологического комплекса SOHO, которое показало их сопоставимое качество наблюдений, а также возможность совместной обработки их данных. Учитывая наличие в фотометрах SPM спектральных каналов, близких по длине волны к диапазонам прибора СОКОЛ (402 и 360 нм; 500 и 500 нм; 862 и 850 нм соответственно), планировалось проведение совместной научной обработки данных наблюдений с целью более полного выполнения научной программы эксперимента СОКОЛ. Необходимо заметить, что наблюдения солнечных колебаний в инфракрасных диапазонах — 1100 и

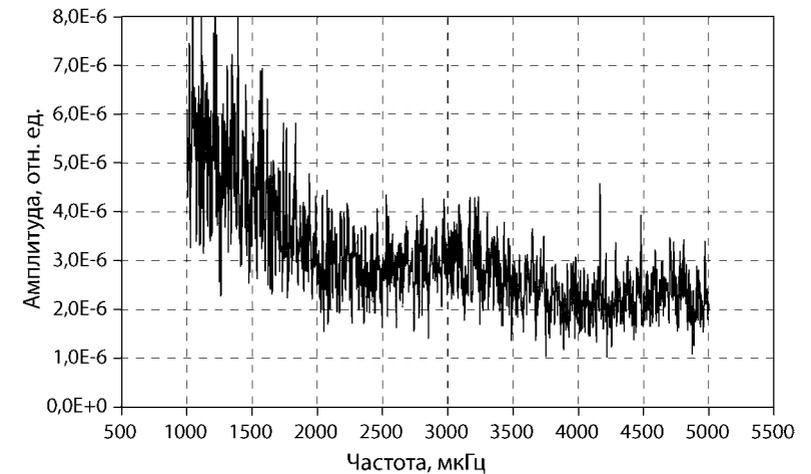


Рис. 8. Усредненный амплитудный спектр, построенный по трехдневным рядам данных. Канал 1550 нм. Временной период 2–16 апреля 2009 г.

1550 нм — являются единственными космическими наблюдениями в этом диапазоне волн и могут быть востребованы отечественными и зарубежными учеными, работающими в области гелиосейсмологии.

Работа поддержана РФФИ, проект № 09-02-00494-а.

Литература

- Жугжда Ю. Д., Кузнецов В. Д., Лебедев Н. И. (2009) // Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике «КОРОНАС-Ф» / Под ред. В. Д. Кузнецова. М.: Физматлит, 2009.
- Жугжда Ю. Д., Лебедев Н. И. (2009) // Письма в АЖ. 2009. Т. 35. № 6. С. 1–14.
- Стоділка М. І. (2005) (Стоділка М. І.) // Космічна наука і технологія. 2005. Т. 11. С. 30–36.

OBSERVATIONS OF THE GLOBAL OSCILLATION OF THE SUN:
THE FIRST RESULTS OF SOKOL EXPERIMENTV. D. Kuznetsov¹, Y. D. Zhugzhda¹, V. N. Yurov²,
N. I. Lebedev¹, S. I. Boldyrev¹¹ *Institution of Russian Academy of Sciences Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,
Ionosphere and Radio Wave Propagation, Moscow*² *Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Moscow (from 07.2009 —
National Research Nuclear University "MEPhI" (NRNU MEPhI)),
Astrophysics Institute MEPhI, Moscow*

Helioseismological experiment SOKOL on-board of CORONAS-PHOTON is directed to the study of characteristics and inner structure of the Sun on the basis of the spectra of global oscillations of the Sun. Such spectra are taken by method of measurement of solar radiation intensity variations. This experiment continues the study of solar global fluctuations started on CORONAS-I and CORONAS-F satellites. Solar photometer SOKOL designed by IZMIRAN observes the variations of intensity of solar radiation in seven optical ranges from near ultra-violet up to infra-red range of the spectrum. The spectra of p -modes fluctuations of the Sun are obtained on the initial stage of observations.

Keywords: helioseismology, brightness fluctuations, temperature waves, p -modes, CORONAS-PHOTON, sunphotometer SOKOL.

Kuznetsov Vladimir Dmitrievich — Director of IZMIRAN, Doctor of Science, Physics and Mathematics. E-mail: kvd@izmiran.ru.

Zhugzhda Yuzef Danilovich — Main Researcher, Doctor of Science, Physics and Mathematics. E-mail: yzhugzhda@mail.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — Deputy Director of the Astrophysics Institute MEPhI, Ph. D. E-mail: VNYurov@mephi.ru.

Lebedev Nikolay Ivanovich — Senior Researcher. E-mail: lebedev@izmiran.ru.

Boldyrev Sergey Ivanovich — Head of Laboratory, Ph. D. E-mail: boldyrev@izmiran.ru.

О ПЕРВЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИБОРОМ
БУС-ФМ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ НАУЧНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ КА «КОРОНАС-ФОТОН»И. В. Козлов¹, А. Д. Новиков², М. Н. Пустовалов², А. Д. Рябова¹,
И. Е. Громкова², Т. П. Магурина², Т. Л. Шпагина¹¹ *Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ
РАН), Москва (с 08.2009 — Учреждение Российской академии наук
Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН))*² *ОАО «ОКБ «ААЛМ», Бишкек, Кыргызстан*

Выполнен анализ первых результатов участия модифицированного блока управления и соединений (прибор БУС-ФМ) в выполнении программы научных исследований на борту космического аппарата «КОРОНАС-ФОТОН» в рамках программы изучения Солнца «КОРОНАС» (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца). Обсуждены вопросы наземного моделирования работы прибора БУС-ФМ для случая прохождения космическим аппаратом «КОРОНАС-ФОТОН» радиационного пояса Земли.

Ключевые слова: бортовое питание, радиационный пояс Земли, моделирование режимов, разовые команды.

Введение

В данной статье рассматриваются первые результаты технического обеспечения модифицированным блоком управления и соединений (прибором БУС-ФМ) выполнения программы научных исследований на борту космического аппарата (КА) «КОРОНАС-ФОТОН», который был запущен 30 января 2009 г.

Козлов Игорь Владимирович — главный специалист. E-mail: igkozlov@iki.rssi.ru.

Новиков Александр Демьянович — главный конструктор. E-mail: alexdem1946@mail.ru.

Пустовалов Михаил Николаевич — начальник группы. E-mail: mpustovalov@rambler.ru.

Рябова Алина Дмитриевна — руководитель группы. E-mail: arjabova@iki.rssi.ru.

Громкова Ирина Евгеньевна — ведущий инженер. E-mail: gromkova@rambler.ru.

Магурина Татьяна Павловна — ведущий конструктор.

Шпагина Татьяна Львовна — ведущий инженер. E-mail: shpagina_t@mail.ru.

с Государственного испытательного космодрома № 1 (Плесецк) ракетой-носителем «Циклон-3». Прибор БУС-ФМ вошел в состав комплекса научной аппаратуры (КНА) «ФОТОН», разработанного для решения научных задач в рамках программы изучения Солнца «КОРОНАС» (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца). Был выполнен анализ функционирования прибора БУС-ФМ в части обеспечения научной аппаратуры бортовым питанием, разовыми командами управления и признаками прохождения КА «КОРОНАС-ФОТОН» полярных областей, Южно-Атлантической аномалии и теневых (солнечных) участков орбиты.

1. Прибор БУС-ФМ как составная часть КНА «ФОТОН»

Структурно-функциональная схема включения прибора БУС-ФМ в состав КНА «ФОТОН» на борту КА «КОРОНАС-ФОТОН» представлена на рис. 1.

Прибор БУС-ФМ предназначен для выполнения следующих функций:

- приема от системы энергоснабжения (СЭС) КА бортового питания, формирования независимых шин питания научных приборов и осуществления режима «разрешение/запрещение» на выдачу бортового питания в научные приборы;
- приема от бортового управляющего комплекса (БКУ) разовых функциональных команд управления режимами работы КНА «ФОТОН», преобразования их при необходимости из импульсов напряжения в импульсы «сухой контакт», развязки и последующей выдачи их на научные приборы;
- формирования и выдачи в научные приборы специальных признаков, характеризующих условия нахождения космического аппарата на околоземной орбите;
- формирования и выдачи ТМ-параметров в телеметрическую систему (БАТС) о режимах работы прибора и научной аппаратуры.

Прибор БУС-ФМ имеет более 40 внешних разъемов для соединения со служебными системами КА и приборами, входящими в состав КНА «Фотон». Внешний вид прибора представлен на рис. 2.

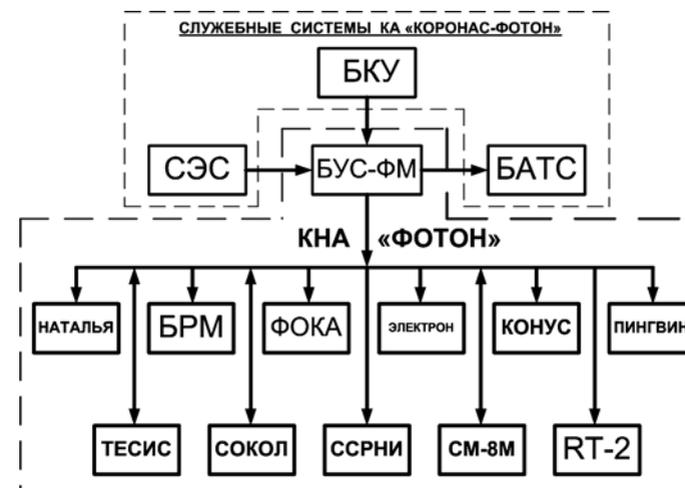


Рис. 1. Структурно-функциональная схема включения прибора БУС-ФМ в состав КНА «Фотон»: «НАТАЛЬЯ-2М» — спектрометр высокоэнергичных излучений; RT-2 — телескоп низкоэнергетичного гамма-излучения; БРМ — быстрый рентгеновский монитор; «ПИНГВИН-М» — поляриметр жесткого рентгеновского излучения; ФОКА — многоканальный монитор ультрафиолетового излучения; «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА» — анализатор заряженных частиц; ТЕСИС — Телескоп-спектрометр EUV-диапазона; «КОНУС-РФ» — рентгеновский и гамма-спектрометр; БУС-ФМ — блок управления и соединений; СОКОЛ — солнечный фотометр; СМ-8М — магнитометр



Рис. 2. Внешний вид прибора БУС-ФМ

Основные технические характеристики прибора БУС-ФМ:

- максимальное количество функциональных команд, выдаваемых потребителям, — 160;
- напряжение бортового питания и амплитуда выдаваемых функциональных команд — в диапазоне +24...+34 В;
- длительность командного импульса — 0,1...0,3 с;
- максимальный ток нагрузки по цепям команд — 0,7 А;
- признаки прохождения КА теневого/солнечного участка орбиты («свет/тень») и радиационных поясов Земли (РПЗ) («Вшир/Сшир») — выдаются потребителям в виде «сухих контактов»;
- масса прибора БУС-ФМ — не более 10 кг.

3. Основные результаты наземных испытаний

Прибор БУС-ФМ до старта прошел полный цикл наземных испытаний:

- лабораторно-отрабочные испытания;
- приемо-сдаточные испытания;
- конструкторско-доводочные испытания (КДИ) модулей бортовой автоматики МБА, входящих в состав прибора;
- ресурсные испытания модулей бортовой автоматики (МБА) в ОАО «ОКБ ААЛАМ»;
- граничные испытания МБА в ОАО «ОКБ ААЛАМ»;
- граничные испытания в ИКИ РАН;
- комплексные испытания (КИ), включая стыковочные испытания летного образца (ЛО) и запасных инструментов и принадлежностей (ЗИП), в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), в Научно-исследовательском институте электромеханики (НИИЭМ), г. Истра, и предстартовые на космодроме.

По результатам проведенной наземной отработки были уточнены следующие технические характеристики прибора:

- потребление;
- количество используемых разовых команд управления;
- количество и назначение контролируемых ТМ-параметров прибора.

В декабре 2008 г. прибор БУС-ФМ был доставлен в составе КА «КОРОНАС-ФОТОН» на территорию Государственного ис-

пытательного космодрома № 1 Плесецк, где успешно прошел полный цикл предстартовых наземных испытаний.

4. Задачи прибора БУС-ФМ в ходе выполнения программы научных исследований

Участие прибора БУС-ФМ в выполнении программы научных исследований (ПНИ) сводится к следующему:

- осуществление первого включения прибора БУС-ФМ после вывода КА «КОРОНАС-ФОТОН» на околоземную орбиту и введение его в штатную эксплуатацию;
- отработка циклограмм управления прибором БУС-ФМ и КНА «Фотон» посредством разовых команд;
- регулярный контроль за состоянием и функционированием прибора БУС-ФМ по телеметрической информации, поступающей с БАТС;
- отработка и моделирование основных режимов работы прибора БУС-ФМ в случае пересечения КА «КОРОНАС-ФОТОН» радиационного пояса Земли и теневого (солнечного) участка орбиты;
- обеспечение штатного режима приема от системы энергоснабжения (СЭС) КА бортового питания, формирования независимых шин питания научных приборов и осуществление признака «разрешение/запрещение» на выдачу бортового питания в научные приборы;
- оценка качества принимаемой ТМ-информации, уточнение и контроль технических характеристик прибора;
- отработка аппаратно-программных методов и средств обработки поступающей ТМ-информации;
- определение ресурса работы прибора в реальных условиях на борту КА «КОРОНАС-ФОТОН».

5. Анализ функционирования прибора БУС-ФМ

Анализ функционирования прибора проводился на основе получаемой телеметрической информации с борта КА «КОРОНАС-ФОТОН». Структурная схема приема телеметрической информации с прибора БУС-ФМ в ИКИ РАН представлена на рис. 3.

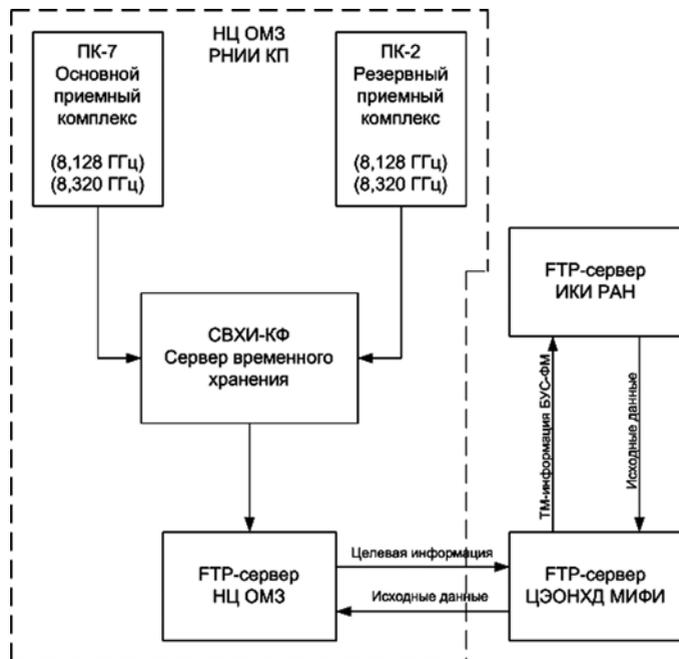


Рис. 3. Структурная схема приема телеметрической информации прибора БУС-ФМ в ИКИ РАН: НЦ ОМЗ РНИИ КП — Научный центр оперативного мониторинга Земли Российского научно-исследовательского института космического приборостроения; ЦЭОНХД МИФИ — Центр экспресс-обработки, накопления и хранения данных Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) (до 07.2009 г. — Московский инженерно-физический институт (МИФИ))

Прием целевой телеметрической информации осуществлялся четыре раза в сутки с двух последовательных восходящих и нисходящих витков с суточным объемом данных порядка 1 Гбайт.

Дешифровка ТМ-параметров прибора БУС-ФМ проводилась по данным каждого сброса с использованием специальной программы дешифровки ТМ-параметров «Телеметрия», которая была разработана специалистами МИФИ.

Регулярный оперативный контроль и анализ функционирования не отметил каких-либо сбоев в работе прибора БУС-ФМ за истекший период — прибор БУС-ФМ работал в штатном режиме и использовался по целевому назначению.

6. Моделирование работы прибора БУС-ФМ

С целью проверки правильности обработки прибором БУС-ФМ закладываемой полетной программы во время выполнения ПНИ регулярно проводились наземная отработка и моделирование работы прибора БУС-ФМ с использованием компьютерной программы Orbitron, позволяющей моделировать движение КА «КОРОНАС-ФОТОН» практически для любого момента времени.

Работы по моделированию проводились на основе данных телеметрии прибора БУС-ФМ, которые представляли собой отклик прибора на выполнение управляющих команд полетной циклограммы.

Моделирование режимов прохождения КА радиационного пояса Земли с использованием программы Orbitron проводилось на основе карты РПЗ (рис. 4).

Радиационный пояс Земли для удобства моделирования был условно разбит на пять зон:

- две зоны РПЗ, располагающиеся в высоких северных широтах;
- две зоны РПЗ, располагающиеся в высоких южных широтах;
- зона Южно-Атлантической Аномалии.

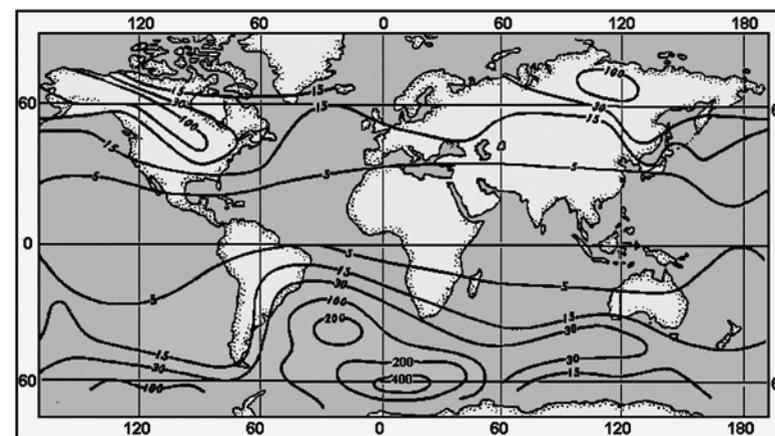


Рис. 4. Карта областей радиационного пояса Земли и Южно-Атлантической Аномалии

Зоны РПЗ, при вхождении в которые прибор БУС-ФМ должен был выдавать команду «Вшир» на изменение режимов работы научных приборов, выделены на рис. 4 черной сплошной линией с надписью 15.

Для иллюстрации процесса моделирования была взята телеметрическая информация с витка № 1832 за 1 июня 2009 г., отражающая изменения телеметрических параметров (БУ12–БУ15, БУ18, БУ20) при прохождении КА «КОРОНАС-ФОТОН» радиационного пояса Земли (рис. 5).

Дискретность временного шага, используемая для моделирования движения КА на околоземной орбите, выбиралась равной 1 с.

Контроль за местоположением КА «КОРОНАС-ФОТОН» осуществлялся по расчетным значениям географических координат, представленным в окне «Данные» (рис. 6).

В процессе моделирования движения КА отслеживалось текущее время полета. В момент совпадения времени (заданного и смоделированного) входа в первую зону радиационного пояса Земли, моделирование полета КА останавливалось, и в окне «Данные» считывались соответствующие текущие значения географической широты и долготы местоположения КА (см. рис. 6).

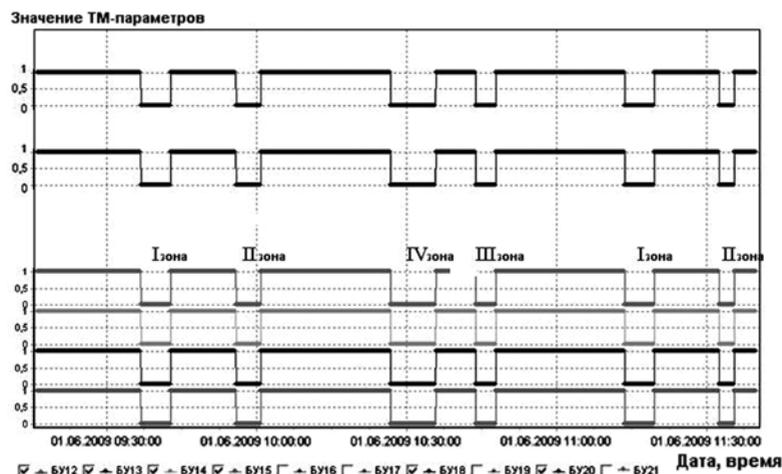


Рис. 5. Изменение ТМ-параметров прибора БУС-ФМ при пересечении радиационного пояса Земли на витке № 1832

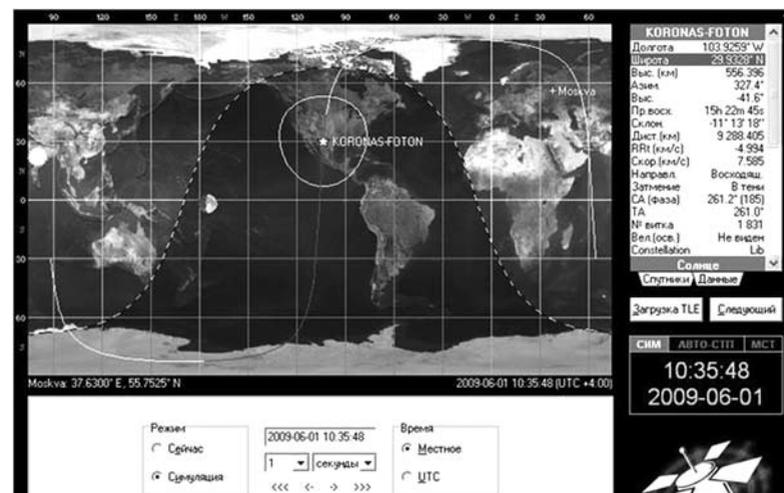


Рис. 6. Вид программы Orbitron с географическими координатами КА «КОРОНАС-ФОТОН» при моделировании полета на восходящем витке № 1832

Полученные расчетные показания широты и долготы точки входа КА в первую зону РПЗ на восходящем витке № 1832 сравнивались с географическими координатами соответствующей области РПЗ (см. рис. 4). Многократное моделирование входа КА «КОРОНАС-ФОТОН» в радиационный пояс Земли на различных витках показало, что прибор БУС-ФМ обрабатывает режим входа в РПЗ (режим «Вшир») с допустимой погрешностью, не превышающей $\pm 1,5^\circ$.

7. Основные результаты участия прибора БУС-ФМ в выполнении программы научных исследований

Была проведена работа по первому включению прибора БУС-ФМ после сравнения установленного состояния прибора с исходным предстартовым состоянием.

Проверено управление прибором посредством разовых команд, передаваемых в сеансе управления.

Данные, поступающие из прибора БУС-ФМ на БАТС, выводились в полном объеме и без сбоев.

Все команды, формируемые в приборе БУС-ФМ в соответствии с заданной программой полета, отрабатывались приборами КНА штатно.

Проверено функционирование прибора при прохождении КА «КОРОНАС-ФОТОН» Южно-Атлантической Аномалии (ЮАА) и полярных областей. Прибор БУС-ФМ штатно формировал и выдавал признак «Вшир» на изменение режимов работы научных приборов при пролете этих областей.

Проверено функционирование прибора БУС-ФМ при входе и выходе из тени при орбитальном движении КА «КОРОНАС-ФОТОН». Прибор штатно и без замечаний формировал и выдавал в научные приборы признаки «свет/тьень».

Проверен штатный режим приема от системы энергоснабжения (СЭС) КА бортового питания, формирования независимых шин питания научных приборов и осуществления признака «разрешение/запрещение» на выдачу бортового питания в научные приборы СМ-8М, «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА», СОКОЛ и RT-2.

Значения бортового напряжения питания на выходе прибора БУС-ФМ и температурный режим прибора по данным телеметрии находились в норме и не выходили за пределы допустимых значений.

Участие прибора БУС-ФМ в выполнении программы научных исследований на борту КА «КОРОНАС-ФОТОН» проходило штатно, без замечаний к работе прибора.

Телеметрические данные, выводимые на БАТС, поступали для обработки в ИКИ РАН без сбоев и искажений.

Прибор БУС-ФМ продолжал выполнение программы научных исследований в составе КНА «ФОТОН» на борту КА «КОРОНАС-ФОТОН» до выхода КА из строя.

ABOUT THE FIRST RESULTS OF PERFORMANCE WITH BUS-FM DEVICE OF SCIENTIFIC RESEARCH PROGRAM OF SPACECRAFT "CORONAS-PHOTON"

I. V. Kozlov¹, A. D. Novikov¹, M. N. Pustovalov², A. D. Ryabova¹,
I. E. Gromkova², T. P. Magurina², T. L. Shpagina¹

¹ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow

² OAO "OKB AALAM", Beshkek, Kirgizstan

The analysis of the first results obtained with participation of BUS-FM (the control unit and connections) device is made in

framework of the Sun's study program "CORONAS" (Complex Orbital Observations Near-Earth of Activity of the Sun). The questions of ground simulation of BUS-FM mode operation for cases of passage "CORONAS-PHOTON" satellite through the Earth's radiation belt are discussed.

Keywords: on-board power supply, the radiation belt of the Earth, operation modes, single commands.

Kozlov Igor Vladimirovich — Leading specialist. E-mail: igkozlov@iki.rssi.ru.

Novikov Alexander Demjanovich — Leading constructor. E-mail: alexdem1946@mail.ru.

Pustovalov Mikhael Nikolaevich — Head of the group. E-mail: arjabova@iki.rssi.ru.

Ryabova Alina Dmitrievna — Leader of the group. E-mail: gromkova@rambler.ru.

Gromkova Irina Evgenievna — Leading engineer.

Magurina Tatyana Pavlovna — Leading constructor.

Shpagina Tatyana Lvovna — Leading engineer. E-mail: shpagina_t@mail.ru.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати __. __. 10

Заказ 2199

Формат 70×1081/32

Тираж 200 10,42 уч.-изд. л.