

ISSN 2075-6836

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИКИ РАН)

ТРУДЫ СЕМИНАРА
РЕЗУЛЬТАТЫ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
КОРОНАС-ФОТОН
ПРЕДЛОЖЕНИЯ
ПО ПРОДОЛЖЕНИЮ ПРОГРАММЫ **КОРОНАС**:
НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ И АППАРАТУРА

РОССИЯ
ТАРУСА
19–21 мая 2010 года

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

СЕРИЯ
МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА

Москва
2012

В данный сборник трудов включены материалы, представленные на семинаре по проекту КОРОНАС-ФОТОН. Семинар проводился Учреждением Российской академии наук Институтом космических исследований РАН (с 1 января 2012 г. — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук) (ИКИ РАН) и Федеральным государственным бюджетным (с декабря 2010 г. — автономное) образовательным учреждением высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Федерального агентства по образованию РФ (с декабря 2011 г. — Министерства образования и науки) (НИЯУ МИФИ) в Тарусе Калужской области 19–21 мая 2010 г.

Приводятся научные и методические результаты, полученные при выполнении космического эксперимента на КА «КОРОНАС-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 Space research institute Russian Academy of Science and National research nuclear university MEPhI in Tarusa, Kaluga region 19–21.05.2010.

The scientific and methodological results received at carrying out of CORONAS-Photon space experiment 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, В. Г. Тышкевич, Е. А. Антоненко

Редактор:

В. С. Корниленко

Компьютерная верстка:

Н. Ю. Комарова

Содержание

| | |
|---|-----|
| Предисловие | 5 |
| <i>Юров В. Н., Тышкевич В. Г.</i> Комплекс научной аппаратуры космического аппарата «КОРОНАС-Фотон». Уроки эксплуатации | 7 |
| <i>Рао А. Р., Малкар Д. П., Хингар М. К., Агравал В. К., Чакрабарти С. К., Нанди А., Дебнатх Д., Коточ Т. В., Саркар Р., Чидамбарам Т. Р., Винод П., Шрикумар С., Котов Ю. Д., Буслов А. С., Юров В. Н., Тышкевич В. Г., Архангельский А. И., Зятков Р. А.</i> Функционирование телескопа-спектрометра низкоэнергичного гамма-излучения RT-2 на борту космического аппарата «КОРОНАС-Фотон». Результаты эксперимента | 19 |
| <i>Кузин С. В., Житник И. А., Шестов С. В., Богачев С. А., Бугаенко О. И., Игнатев А. П., Перцов А. А., Ульянов А. С., Рева А. А., Слемзин В. А., Суходрев Н. К., Иванов Ю. С., Гончаров Л. А., Митрофанов А. В., Попова С. Г., Шергина Т. А., Соловьев В. А., Опарин С. Н., Зыков М. С., Лучин В. И., Полковников В. Н., Салащенко Н. Н., Цыбин Н. Н.</i> Эксперимент ТЕСИС космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» | 41 |
| <i>Кузин С. В., Шестов С. В., Богачев С. А., Перцов А. А., Ульянов А. С., Рева А. А.</i> Регистрация и обработка изображений в эксперименте ТЕСИС на спутнике «КОРОНАС-Фотон» | 61 |
| <i>Котов Ю. Д., Умнова О. Н.</i> Поиск поляризации рентгеновского излучения во вспышке 26.10.2009 г. по данным прибора «Пингвин-М» | 75 |
| <i>Глянченко А. С., Котов Ю. Д., Архангельский А. И., Буслов А. С., Юров В. Н., Дергачев В. А., Круглов Е. М., Лазутков В. П., Матвеев Г. А., Пятигорский А. Г., Савченко М. И., Скородумов Д. В.</i> Результаты регистрации солнечных вспышек прибором «Пингвин-М» | 88 |
| <i>Дудник А. В.</i> Динамика электронов радиационных поясов Земли в мае 2009 г. по наблюдениям с помощью аппаратуры СТЭП-Ф | 103 |

| | |
|---|-----|
| <i>Мягкова И. Н., Калегаев В. В., Баринова В. О., Панасюк М. И., Богомолов А. В., Парунакян Д. А., Старостин Л. И.</i> | |
| Вариации потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли и положение его полярной границы в 2009 году по данным эксперимента с прибором «Электрон-М-Песка» на борту ИСЗ «КОРОНАС-Фотон» | 126 |
| <i>Лупарь Е. Э., Юров В. Н., Власик К. Ф.</i> | |
| Спектрометр высокоэнергичных излучений «Наталья-2М». Функционирование на орбите в составе космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» | 137 |
| <i>Трофимов Ю. А., Юров В. Н., Котов Ю. Д.</i> | |
| Регистрация быстрым рентгеновским монитором нестационарных кратковременных событий и их анализ | 169 |
| <i>Олейник Ф. П., Уланов М. В., Аптекарь Р. Л., Голенецкий С. В., Мазец Е. П., Свинкин Д. С., Фредерикс Д. Д., Котов Ю. Д., Юров В. Н.</i> | |
| Эксперимент КОНУС-РФ: основные научные результаты и предложения по продолжению эксперимента. | 182 |
| <i>Дергачев В. А., Лазутков В. П., Матвеев Г. А., Круглов Е. М., Савченко М. И., Скородумов Д. В., Пятигорский А. Г., Хилькевич В. М., Хмылко В. В., Котов Ю. Д., Гляненко А. С., Юров В. Н.</i> | |
| Перспективы продолжения экспериментов по измерению поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек, начатых на аппарате «КОРОНАС-Фотон» | 191 |
| <i>Власик К. Ф., Дмитренко В. В., Грачев В. М., Жучкова Е. А., Котов Ю. Д., Кочемасов А. В., Лупарь Е. Э., Трофимов Ю. А., Улин С. Е., Утешев З. М., Юров В. Н.</i> | |
| Гамма-спектрометры на основе скинтилляционного кристалла LaBr ₃ (Ce) и сжатого ксенона для регистрации линейчатого гамма-излучения солнечных вспышек. | 198 |

Предисловие

Космический эксперимент (КЭ) КОРОНАС-ФОТОН завершил Российскую программу исследований физики Солнца и солнечно-земных связей КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околосолнечные Наблюдения Активности Солнца). Космический аппарат (КА) с комплексом научной аппаратуры (КНА) «Фотон» был выведен на околоземную орбиту 30 января 2009 г. и функционировал до 1 декабря 2009 г. Эксперимент был прекращен из-за выхода из строя системы энергообеспечения КА.

Основными задачами экспериментов с КНА «Фотон» являлись 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 связей явлений в околосолнечном космическом пространстве с солнечной активностью.

В состав КНА входили приборы, предназначенные:

- для изучения временного поведения и энергетических спектров электромагнитного излучения от нескольких килоэлектронвольт до единиц гигаэлектронвольт («Наталья-2М», RT-2, «Конус-РФ», «Пингвин-М»);
- построения изображений в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазоне (ТЕСИС);
- измерения линейной поляризации жёсткого рентгеновского излучения («Пингвин-М»);
- мониторинга излучения в инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах («Сокол», ФОКА, БРМ);
- регистрации солнечных нейтронов («Наталья-2М»);
- измерения потоков заряженных частиц на орбите КА (СТЭП-Ф, «Электрон-М-Песка»);
- обеспечения интерфейса КНА со служебными бортовыми системами КА по электропитанию, управлению, ориентации, сбору и передаче научных данных (БУС-ФМ, СМ-8М, ССРНИ).

В создании научной аппаратуры принимали участие специалисты российских и зарубежных организаций: Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Федерального агентства по образованию РФ, Учреждения Российской академии наук Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Учреждения Российской академии наук

Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН), Учреждения Российской академии наук Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (ИЗМИРАН), Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Учреждения Российской академии наук физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А. Ф. Иоффе), ФГУ НПП «Геологоразведка» (все – Россия), Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (Украина), Тата института фундаментальных исследований (TIFR) (Индия), Центра космических исследований Польской академии наук (ЦКИ ПАН) (Польша).

Комплекс научной аппаратуры «Фотон» штатно функционировал на орбите и выполнял запланированную программу научных экспериментов в течение всего срока существования КА. В этих экспериментах получены уникальные данные по проявлениям солнечной активности и состоянию магнитосферы Земли в период аномально глубокого солнечного минимума; зарегистрированы космические транзиенты и гамма-всплески; исследовались радиационная обстановка и условия проведения экспериментов на орбите КА.

При определении времени начала эксперимента предполагалось, что 24-й солнечный 11-летний цикл начнётся в 2007 г. и КЭ КОРОНАС-ФОТОН должен частично захватить фазы роста и максимума солнечной активности (СА). Исследования высокоэнергичных излучений планировались вблизи максимума СА, так как в ранее проведённых измерениях на КА SMM, КОРОНАС-Ф, RHESSI излучения с $E\gamma > 300$ кэВ и солнечные нейтроны наблюдались в событиях классов М и X (по шкале КА GOES). Из-за длительной задержки начала 24-го цикла (примерно на два года) и преждевременного прекращения эксперимента СА в период наблюдений находилась в аномально глубоком минимуме. С 30 января 2009 г. по 30 ноября 2009 г. аппаратурой КА GOES было зарегистрировано всего около 15 солнечных событий класса С и ни одного события классов М и X. По этим причинам практически не было получено данных о высокоэнергичных излучениях и наблюдательные возможности некоторых приборов остались не реализованными.

В данном сборнике представлены отдельные научные и методические результаты измерений, выполненных приборами КНА «Фотон» при проведении космического эксперимента на КА «КОРОНАС-Фотон».

В. Н. Юров
главный конструктор КНА «Фотон»

**КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ
АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА
«КОРОНАС-ФОТОН». УРОКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В. Н. Юров, В. Г. Тышкевич

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Федерального агентства
по образованию РФ, Институт астрофизики (ИАФ), Москва*

Рассматриваются результаты функционирования космического аппарата (КА) «КОРОНАС-Фотон» на околоземной орбите с оценкой эффективности решений, принятых при создании комплекса научной аппаратуры и проведении космического эксперимента. Рассмотрены нештатные ситуации, возникшие на борту КА в период его функционирования, и проведенные мероприятия по их устранению. Сделаны выводы о причинах преждевременного прекращения эксперимента КОРОНАС-ФОТОН.

Ключевые слова: «КОРОНАС-Фотон», космический аппарат, комплекс научной аппаратуры, космический эксперимент, управление, контроль и передача данных, условия функционирования, нештатные ситуации, мероприятия по устранению, выводы и рекомендации.

Космический аппарат «КОРОНАС-Фотон» реализован на базе космического аппарата (КА) «Метеор-3М» разработки ФГУП «Научно-исследовательский институт электромеханики» (НИИЭМ), Истра Московской области (с 11.2009 г. — Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электромеханики» (ОАО «НИИЭМ»)). Головной организацией по созданию комплекса научной аппаратуры (КНА) «Фотон» являлся Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Соисполнителями были организации Российской академии наук, Министерства образования и науки РФ и зарубежные участники из Индии, Украины и Польши.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора, кандидат физико-математических наук, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

Тышкевич Владимир Георгиевич — доцент, e-mail: vladi@dozen.mephi.ru.

Основной задачей Программы научных исследований и экспериментов в космическом пространстве с КНА «Фотон» в составе КА «КОРОНАС-Фотон» было комплексное исследование проявлений активности в атмосфере Солнца в широком диапазоне электромагнитного излучения методами спектрометрии и изображающей техники.

Эксперимент должен был охватить весь период роста солнечной активности от минимума в 2009 г. до прогнозируемого максимума в 2013–2014 гг.

Выбор орбиты осуществлялся в условиях ограничений, накладываемых возможностями ракеты-носителя «Циклон-3» и космодрома Плесецк. В результате проведенного анализа был выбран следующий вариант: круговая орбита с высотой 550...500 км и наклоном 82,5°.

Космический аппарат «КОРОНАС-Фотон» был запущен 30 января 2009 г. и выведен на орбиту с заданными параметрами. До 25 февраля все научные приборы были включены и начали выполнять запланированную программу измерений. Функционирование КНА «Фотон» было прекращено 1 декабря 2009 г. из-за отказа служебных бортовых систем КА.

При создании КА «КОРОНАС-Фотон» было принято несколько нетривиальных решений по организации взаимодействия КНА со служебными системами и передаче данных:

- передавать в реальном масштабе времени информацию о состоянии контрольно-служебных параметров научных приборов, поступающую в бортовую аппаратуру телесигнализации (БАТС), в систему сбора и регистрации научной информации (ССРНИ) для последующей передачи на наземный пункт приёма вместе с научными данными;
- использовать для включения, отключения и приведения в исходное состояние приборов исключительно разовые команды;
- использовать при передаче данных на наземные приёмные комплексы (ПК-7 и ПК-2) помехоустойчивое кодирование и осуществлять одновременный приём на двух комплексах;
- ввести экспериментальный режим в системе ориентации и стабилизации (СОС) для стабилизации и ориентации поперечных осей КА по показаниям оптического (звёздного) датчика прибора ТЕСИС.

Все принятые решения положительно зарекомендовали себя во время проведения космического эксперимента. Вывод контрольно-служебных параметров вместе с научной информацией позволил:

- вести постоянный и непрерывный контроль температурных режимов приборов на орбите, устанавливать корреляции между изменениями параметров аппаратуры и колебаниями температуры и вносить необходимые изменения в режимы работы;
- проверять соответствие реакции приборов на поданные команды в реальном времени;
- по результатам сравнения с экспериментальными данными корректировать координаты зон повышенной радиации и правильность расчетов времени подачи команд при заходе и выходе КА из тени.

Возможность переключения режимов ВКЛ/ОТКЛ/ИСХ. СОСТ с помощью импульсных разовых команд позволила оперативно управлять работой аппаратуры при возникновении и ликвидации нескольких нештатных ситуаций, связанных со сбоями в функционировании бортовой управляющей машины.

При практическом выборе режима передачи данных по радиоканалу на наземные приемные пункты (во время проведения эксперимента были задействованы два приёмных комплекса — ПК-7 и ПК-2) в результате анализа было установлено, что в режиме «Без помехоустойчивого кодирования» ни ПК-7, ни ПК-2 Научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) не удовлетворяют требованиям по уровню сбоев. В режиме передачи «С помехоустойчивым кодированием» ситуация значительно лучше и при нормальной работе аппаратных средств приёмных комплексов уровень сбоев составляет около $1 \cdot 10^{-5}$.

Информация о качестве приёма данных представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики качества приёма данных с КНА «Фотон»

| Приёмный комплекс | Количество сеансов связи | | |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| | всего | с количеством ошибок $\leq 0,1\%$ | с количеством ошибок $> 0,1\%$ |
| ПК-7 | 1009 | 964 | 45 |
| ПК-2 | 1006 | 961 | 45 |
| ПК-7 или ПК-2 | 1014 | 987 | 27 |

Видно, что при приёме данных двумя комплексами и совместной обработке существенно (на 2,4 %) увеличивается число сеансов с минимальным количеством ошибок. Кроме того, на 2,5 % увеличивается объем принятых данных и уменьшается количество сбоев.

Так как получаемая научная информация уникальна, то улучшения в её количестве и качестве очень важны.

К сожалению, из-за досрочного прекращения измерений не удалось проверить эффективность работы СОС в экспериментальном режиме ориентации, который должен был обеспечить определенную ориентацию передающих антенн КА относительно приёмного комплекса при передаче данных.

Во время эксплуатации КНА «Фотон» на орбите был зарегистрирован ряд нештатных ситуаций в функционировании научных приборов и служебной бортовой аппаратуры. Далее приводятся их описание, установленные или вероятные причины и мероприятия по устранению. Весь период эксплуатации разбит на два этапа.

ЭТАП ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ, ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И НАСТРОЙКИ НАУЧНЫХ ПРИБОРОВ. 1 ФЕВРАЛЯ – 30 ИЮНЯ 2009 г.

Нештатные ситуации в функционировании служебных систем КА

30.01.09–12.02.09. Невключение бортовой управляющей машины (БУМ), вероятно, из-за замыкания соседних контактов в разъёме блока коммутационных автоматов (БКА) или в состыкованном с ним разъёме кабеля. Попытки включить БУМ командой результата не дали. На наземных стендах отработано нештатное включение при пониженных температуре и напряжении питания. Включение БУМ выполнено 12.02.09 при $T \sim 7^\circ\text{C}$ и $U = 26\text{ В}$.

20.02.09–22.02.09. Нарушено функционирование БУМ, прекращено выполнение циклограмм программного управления работой бортовой аппаратуры. Наиболее вероятной причиной отказа является единичный случайный сбой. Работоспособность БУМ восстановлена 22.02.09 перезагрузкой (отключением и последующим включением).

18.03.09. Отказ в бортовой аппаратуре командно-измерительной системы (БА КИС) «Компарус». Потеря сеансов связи на двух витках. Причиной отказа явился выход из строя первого полуконспекта вторичного источника питания.

Изменена конфигурация включённых узлов БА КИС «Компарус». Включён второй полуконспект вторичного источника питания.

12.02.09–01.12.09. Не выполнялся автоматический режим сверки и корректировки бортового времени.

Разработана и реализована методика режима сверки времени с точностью лучше 1,0 мс в сеансах управления. Разработчикам приборов выдавались данные о расхождении наземной (НШВ) и бортовой (БШВ) шкалы времени. Бортовая шкала времени корректируется с помощью командно-программной информации (КПИ) при $\Delta T > 0,5$ с.

Нештатные ситуации в функционировании приборов КНА

25.02.09–10.03.09. Нарушение функционирования спектрометрических модулей прибора «Наталья-2М» из-за высоких нагрузок при прохождении центральной зоны Южно-Атлантической аномалии (ЮАА), что приводило к выходу коэффициентов усиления фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) за пределы допустимого диапазона измерений и срыву работы системы стабилизации.

Проведена наземная отработка и полётная реализация командной циклограммы, восстанавливающей работоспособность системы стабилизации после прохождения ЮАА.

25.02.09–12.03.09. Несовпадение направлений оптических осей измерительных каналов прибора ТЕСИС с осью КА, ориентируемой на Солнце, из-за некорректно проведённой юстировки блока детекторов.

Проведена центровка направлений оптических осей трех телескопов аппаратуры ТЕСИС: 132, 171 и 304 Å. Остались ограниченно работоспособные каналы коронографа и спектрогелиометра.

25.02.09–01.12.09. Не регистрировались сигналы в оптических каналах 265, 340, 500, 650 и 850 нм прибора СОКОЛ (нормально функционировали каналы 1100 и 1550 нм) по причине неточной ориентации оптических осей каналов на центр диска Солнца или из-за завышения пороговых уровней сигналов. Корректировка направлений оптических каналов и изменение порогов в приборе «Сокол» не были предусмотрены.

25.02.09–01.12.09. Не реализовывался длительный режим измерений с временем накопления 1 мс в каналах интенсиметров в приборе БРМ. Продолжительность непрерывной работы прибора в этом режиме, ограничиваемая объёмом буферной памяти и скоростью передачи данных в ССРНИ, не превышает 30 с.

Работа прибора в основной моде осуществлялась с временем накопления данных 10 мс. Продолжительность измерений в режиме «1 мс» ограничивалась по времени.

15.03.09–17.03.09. Сбои в научной информации, переданной ССРНИ, из-за нарушений в узле формирования выходных кадров первого полукомплекта. Включен и до 01.12.09 бесперебойно работал второй полукомплект ССРНИ.

02.04.09–22.04.09. Температура блока СТЭП-ФД превысила 54 °С при выходе КА на бестеневые орбиты из-за увеличенного энергопотребления по сравнению с величиной, использовавшейся при выработке рекомендаций по применению средств обеспечения тепловых режимов.

По решению разработчиков питание прибора отключалось в периоды бестеневых орбит КА.

22.05.09–24.05.09. Сбой в структуре привода механики измерительного канала 171/304 прибора ТЕСИС. Причина сбоя — длительная работа в режиме сверхкоротких экспозиций 0,1 с (вместо планировавшихся 1...10 с) и значительная выработка ресурса.

Канал переведён в режим штатных экспозиций, обновлено программное обеспечение.

Для улучшения условий функционирования приборов на этом этапе был выполнен ряд организационно-технических мероприятий:

- В результате анализа работы приемных комплексов ПК-7 и ПК-2 в феврале-марте было установлено, что средняя суммарная продолжительность сбросов данных на двух соседних витках составляет примерно 15 мин и позволяет передавать за это время около 740 МБ кодированной целевой информации с незначительным количеством сбоев. На основании этого было принято решение об очистке памяти ССРНИ и перераспределении информационных квот приборов после каждого двух сбросов два раза в сутки. В результате увеличился допустимый объём передаваемых данных приблизительно в 1,4 раза до 1,4...1,5 ГБ/сут, и это позволило удовлетворить информационные запросы всех разработчиков приборов.

- Оптимизацией параметров СОС разработчикам КА удалось уменьшить время восстановления ориентации оси КА на Солнце после его выхода из тени с 8...10 до 1,5...2 мин и снизить мгновенные угловые скорости вращения КА относительно его осей с 5 до 1...1,5 угл. с/с. Эти величины позволяли реализовать возможности приборов ТЕСИС и RT-2 при построении изображений.

- Для улучшения работоспособности каналов коронографа и спектрогелиометра прибора ТЕСИС корректировалось положение оси Z КА относительно направления на центр диска Солнца. В результате отклонение оптической оси канала коронографа от направления на центр диска Солнца уменьшилось с 20,7 до 3,5 угл. мин, но при этом работоспособность каналов не улучшилась. В процес-

се дальнейшей эксплуатации выяснилось, что несовпадение оси Z КА с направлением его ориентации увеличивает интервал времен восстановления положения после выхода из тени с 1,5...2 до 1,5...10 мин, и коррекция была отменена.

По результатам проведённых работ на данном этапе сделано заключение о том, что к 1 июля 2009 г. КА «КОРОНАС-Фотон» был готов выполнять запланированную программу научных исследований.

**ЭТАП ВЫПОЛНЕНИЯ «ПРОГРАММЫ НАУЧНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ
В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ».
1 ИЮЛЯ – 1 ДЕКАБРЯ 2009 г.**

**Нештатные ситуации в функционировании
служебных систем КА**

23.07.09–24.07.09. Потеря ориентации оси Z КА на Солнце из-за сбоя в работе точного датчика Солнца СОС КА.

Ориентация восстановилась без постороннего вмешательства через полтора часа после сбоя.

24.07.09–25.07.09. Отключение автомата питания группы приборов научной аппаратуры в момент подачи питания на прибор СТЭП-Ф после завершения периода бестеневых орбит. Возможная причина — превышение максимально допустимого тока нагрузки.

В дальнейшем использовался порядок последовательного включения приборов в соответствии с потребляемой ими мощностью, начиная с максимальной. Операции по включению приборов проводились при нахождении КА на освещенной части орбиты.

26.07.09–30.07.09. Не выполнен сброс целевой научной и телеметрической информации из-за прекращения выдачи в бортовую аппаратуру из БУМ команд по циклограммам управления в автоматическом режиме. По данным телеметрической информации установлено, что наиболее вероятной причиной неработоспособности БУМ явилось отсутствие необходимых синхросигналов, выдаваемых блоком синхронизации времени и частоты (БСВЧ). Нештатное функционирование БСВЧ началось в результате сбоя под действием ионизирующего излучения конфигурационной памяти не менее чем в двух ПЛИС ХС 4010Е. Сбой был устранен перезапуском БСВЧ — снятием и последующей подачей питания. Принято решение о периодическом проведении операций по отключению и включению питания.

13.08.09–18.08.09. Отключение питания на шинах системы терморегулирования (СТР) и научной аппаратуры (НА). Причиной явился разряд основной батареи и неготовность резервной батареи принять нагрузку из-за недозарядки. Ток нагрузки на неосвещённой части витка при включённых электронагревателях СТР (потребление 15 А) составлял около 40 А, а в моменты работы передатчиков доходил до 45 А.

Внесены изменения в циклограмму работы СТР, разрешающие включение электронагревателей только на освещённой части орбиты.

07.09.09–07.09.09. Потеря ориентации оси Z КА на Солнце из-за нарушения в работе точного датчика Солнца (ТДС) СОС КА. Выполнен переход на работу со вторым комплектом ТДС.

11.10.09–15.10.09. Не установлена связь с БКУ КА из-за отключения питания первого комплекта БУМ (БУМ1), работающей в двухканальном режиме. Наиболее вероятная причина неработоспособности БУМ1 — отказ вторичного источника питания (ВИП) одного из каналов.

Выполнен переход на работу с БУМ2, которая также функционирует в двухканальном режиме и не выполняет процедуру сверки времени.

12.10.09–16.10.09. Отключение питания на шинах СТР и НА из-за срабатывания датчика рассогласования основной батареи и неготовности резервной батареи принять нагрузку из-за недозаряда.

КНА включён после дозарядки резервной батареи.

02.11.09–12.11.09. Отключение питания на шинах СТР и НА по тем же признакам. Срабатывание датчика рассогласования при напряжении питания выше 26 В указывает на заметный процесс деградации химических батарей.

Для уменьшения нагрузки на батареи принято решение об отказе от дальнейшего применения электронагревателей СТР и осуществлении регулировки теплового режима с использованием энерговыделения приборов в гермоотсеке и контура охлаждения СТР.

Комплекс научной аппаратуры включён после дозарядки резервной батареи. В период 13.11–19.11.09 был подобран оптимальный режим работы вентиляторов контура охлаждения: 10 витков — включены, 5 витков — отключены. В этом режиме максимальная потребляемая мощность от ЭЭС снизилась на 600 Вт, но увеличился диапазон изменения температуры блоков научных приборов в гермоконтейнере до 10...12 °С.

01.12.09. Отключение питания на шинах СТР и НА по тем же признакам в результате дальнейшей деградации химических батарей. В период с 01.12.09 по 10.12.09 проводились работы по восста-

новлению работоспособности КА при отключенном КНА. В результате очередного отказа в СЭС связь с КА была потеряна.

После многочисленных неудачных попыток восстановить управление КА 30 июня 2010 г. Государственной комиссией было принято решение о прекращении лётных испытаний космического комплекса «КОРОНАС-Фотон».

Нештатные ситуации в функционировании приборов КНА

30.09.09–28.10.09. Детекторный блок прибора СТЭП-Ф нагрелся до температуры 54 °С и затем охладился до 36 °С из-за уменьшения его энергопотребления вследствие выхода из строя источника вторичного питания одной из двух независимых систем регистрации, работавших параллельно.

Подано питание на работоспособную систему и проведена подстройка ее параметров. Прибор функционировал в рабочем режиме с уменьшенной светосилой.

В период с 1 июля по 1 декабря 2009 г. несколько раз корректировались информационные квоты приборов по результатам анализа их заполнения и из-за особенностей функционирования ПК-7 и ПК-2.

Так как антеннами ПК-2 и ПК-7 невозможно организовать слежение за местоположением КА при его нахождении в интервале зенитных углов 85...90°, возникают разрывы в приёме данных. По этой причине на орбитах, проходящих под такими зенитными углами, сеансы передачи данных не проводились, а осуществлялись на двух боковых витках. При этом уменьшалась их продолжительность и, соответственно, на 200...300 МБ сократился объём передаваемых с КА данных. Память ССРНИ высвобождалась не полностью и 21 сентября 2009 г. высокоинформативные приборы «Наталья-2М», БРМ, ТЕСИС исчерпали свои обязательные квоты, и прием данных с них был заблокирован. В результате проведенного анализа было подготовлено и реализовано решение о перераспределении максимальных и обязательных частей квот по цифровым источникам. В дальнейшем блокировок приема данных с приборов не было.

Выводы и рекомендации

1. Комплекс научной аппаратуры «Фотон» функционировал в штатном режиме в течение всего срока проведения космического эксперимента и выполнял запланированные задачи.

2. Единичные сбои и отказы на работоспособность комплекса не повлияли.

3. Принятые на этапе проектирования и создания аппаратуры технические решения по передаче контрольно-служебной телеметрической информации, управлению приборами и сбросу научных данных на наземные пункты приёма сыграли положительную роль при функционировании КА «КОРОНАС-Фотон» на орбите.

4. В процессе эксплуатации КНА «Фотон» на орбите выявились допущенные при проектировании научной аппаратуры просчёты:

- не было предусмотрено проведение сеансов сброса научных данных с помощью разовых команд без задействования БУМ, поэтому полностью работоспособный комплекс не мог выполнять свои задачи на начальном этапе в феврале 2009 г.;
- в измерительных каналах прибора СОКОЛ и части каналов прибора ТЕСИС, требующих особо точного наведения на Солнце, не была предусмотрена возможность полётной корректировки направления оптической оси;
- при проектировании ряда приборов были заложены недостаточные меры по их адаптации к условиям эксплуатации на орбите, а именно:
 - в приборе «Наталья-2М» был узкий диапазон понижения чувствительности детекторов при прохождении радиационных поясов;
 - в приборе СОКОЛ отсутствовала возможность регулировки порогов в измерительных каналах;
 - в приборе СТЭП-Ф отсутствовали отдельные команды на отключение любой из независимых систем регистрации.

5. В большинстве бортовых служебных систем КА: БУМ, БСВЧ, БА КИС «Компарус», СОС — в результате отказов был осуществлён переход на вторые комплекты отдельных узлов в течение первых шести месяцев эксплуатации. Это свидетельствует о снижении контроля качества серийной продукции, выпускаемой предприятиями-изготовителями.

6. При проектировании и эксплуатации системы электроснабжения КА были допущены серьёзные просчёты:

- энергетический баланс работы СЭС не позволял гарантировать штатное функционирование комплекса научной аппаратуры в течение трёх лет эксплуатации по следующим причинам:
 - 1) при одновременном включении на освещённой части орбиты системы терморегулирования (СТР) для поддержания температуры газа (потребляемая мощность 750 Вт), нагревателей системы регулирования температуры (СРТ) отдельных

блоков (350 Вт), комплекса научной аппаратуры (350 Вт), бортовой служебной аппаратуры (300 Вт), системы ориентации и стабилизации ($350 \times 0,2$ Вт) и передатчиков радиоканала ($240 \times 0,2$ Вт) потребляемая КА мощность будет составлять 1868 Вт, превышая мощность, вырабатываемую солнечными батареями, — 1650 Вт; даже при неполном включении обслуживающих систем (СТР, СРТ) химические батареи будут разряжаться в течение нескольких витков;

2) при работе бортовой аппаратуры на теневой части орбиты с максимальным энергопотреблением разряд батареи может превысить её ёмкость, которая будет уменьшаться со временем, и батарея будет отключена;

3) ввиду недозаряда резервной батареи переход на работу с ней будет невозможен и КА будет регулярно переводиться в режим с минимальным энергопотреблением;

- при включении аппаратуры на орбите по невыясненным причинам энергоотдача солнечных батарей оказалась меньше расчётной, что привело к дополнительному ухудшению энергобаланса;
- при проектировании не была предусмотрена возможность регулирования мощности нагревателя СТР и в конструкции выбранных химических батарей отсутствовала возможность шунтирования элементов, значительно изменивших свои параметры;
- при эксплуатации КА со значительным опозданием уже после устранения возникавших нештатных ситуаций принимались меры по снижению нагрузки на элементы СЭС (сначала запрет на включение нагревателей СТР на неосвещенной части витка, затем полный отказ от их использования).

По результатам эксплуатации комплекса научной аппаратуры КА «КОРОНАС-Фотон» можно сделать следующие рекомендации для разработчиков научной аппаратуры:

- в научной аппаратуре в максимальной степени должны быть предусмотрены элементы подстройки параметров измерительных каналов;
- на этапе подготовки эксперимента следует подробно рассмотреть проект системы энергоснабжения КА, а именно:
 - расчёты энергетического баланса на всех стадиях и во всех условиях проведения экспериментов;
 - качество и сертификацию комплектующих элементов;
 - система сбора и регистрации научной информации должна иметь узел управления и интерфейсы, обеспечивающие гибкость

в приёме научных данных с приборов для удовлетворения их информационных потребностей и максимально возможного заполнения памяти при любых режимах эксплуатации и реализующие доступную пропускную способность радиоканала и наземного приёмного комплекса;

- на начальном этапе космического эксперимента следует проводить совместный анализ эксплуатационных режимов функционирования научной аппаратуры и служебных бортовых систем с целью принятия решений и проведения организационных и технических действий для облегчения условий их работы.

**THE SCIENTIFIC EQUIPMENT COMPLEX
OF THE SATELLITE CORONAS-PHOTON.
SPACE FLIGHT EXPERIENCE**

V. N. Yurov, V. G. Tyshkevich

*National Research Nuclear University "MEPhI"
(NRNU MEPhI), Moscow*

In article results of maintenance of the satellite CORONAS-Photon in a near-earth orbit with a efficiently estimation of the decisions accepted at working out of a complex of scientific equipment and carrying out of space experiment are considered. Examine nonordinary situations arising onboard satellite in its functioning, and the carried out actions for their elimination. Conclusions are drawn on the reasons of stop before the appointed time CORONAS-Photon experiment.

Keywords: CORONAS-Photon, satellite, complex of scientific equipment, space experiment, management, control and data transmission, operating conditions, nonordinary situations, actions for elimination, conclusions and recommendations.

Yurov Vitaly Nikolaevich — deputy director, PhD, e-mail: VNYurov@mephi.ru.
Tyshkevich Vladimir Georgievich — senior lecturer, e-mail: vladi@dozen.mephi.ru.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ТЕЛЕСКОПА-СПЕКТРОМЕТРА НИЗКОЭНЕРГИЧНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ RT-2 НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «КОРОНАС-ФОТОН». РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

**А. Р. Рао¹, Д. П. Малкар¹, М. К. Хингар¹, В. К. Агравал¹,
С. К. Чакрабартти², А. Нанди³, Д. Дебнатх³,
Т. В. Коточ³, Р. Саркар³, Т. Р. Чидамбарам⁴, П. Винод⁴,
С. Шрикумар⁴, Ю. Д. Котов⁵, А. С. Буслов⁵,
В. Н. Юров⁵, В. Г. Тышкевич⁵, А. И. Архангельский⁵,
Р. А. Зяцьков⁵**

¹ Tata институт фундаментальных исследований
(TIFR), Мумбаи, Индия

² Национальный центр фундаментальной физики им. С. Р. Бозе,
Калькутта, Индия

³ Индийский центр космической физики, Калькутта, Индия

⁴ Космический центр им. Викрам Шарабхай,
Тируванантапурам, Индия

⁵ Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Федерального агентства
по образованию РФ, Институт астрофизики
(ИАФ), Москва, Россия

Эксперимент с прибором RT-2 на борту космического аппарата (КА) «КОРОНАС-Фотон» проводился с целью изучения спектральных, временных и пространственных характеристик солнечных вспышек в жёстком рентгеновском диапазоне 15...150 кэВ. В энергетическом диапазоне от 150 до 1000 кэВ прибор действует как всенаправленный детектор гамма-излучений и используется для изучения гамма-всплесков (GRB), ярких солнечных вспышек и рентгеновских пульсаров.

Рао Арикалла Рагурама — профессор, e-mail: arrao@mailhost.tifr.res.in.

Малкар Джайвант Пандуранг — инженер.

Хингар Махендра Кумар — менеджер, e-mail: nkhingar@mailhost.tifr.res.in.

Агравал Вивек Кумар — доктор философии по физике.

Чакрабартти Сандип Кумар — профессор.

Нанди Ануш — доктор философии по физике, e-mail: anuj@csp.res.in.

Дебнатх Дипак — доктор философии по физике.

Коточ Тилак Б. — аспирант.

Саркар Ритабрата — доктор философии по физике.

Чидамбарам Тирунавуккасу Р. — заместитель директора космического центра им. Викрам Шарабхай.

Композиция детекторов жёсткого рентгеновского излучения с различными полями зрения и кодирующими апертурами позволяет исследовать спектры космического диффузного рентгеновского фона. В статье описано функционирование детекторов прибора в период с февраля по ноябрь 2009 г. Кратко обсуждаются результаты наблюдения нескольких гамма-всплесков и солнечных вспышек.

Ключевые слова: космический эксперимент, «КОРОНАС-Фотон», солнечные вспышки, гамма-всплески, рентгеновский и гамма-спектрометр, CZT-детектор, фосвич-детектор, кодирующая апертурная маска, зональная пластина Френеля, CMOS-детектор.

Введение

Прибор RT-2 входит в состав комплекса научной аппаратуры проекта КОРОНАС-ФОТОН для исследования солнечной активности. Основная цель проекта [Kotov et al., 2008] — изучение Солнца в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения — от ультрафиолета до высокоэнергичного гамма-излучения. Спектрометр рентгеновского и низкоэнергичного гамма-излучения RT-2 работает в диапазоне энергий от 15 кэВ до 1 МэВ. Прибор RT-2 [Nandi et al., 2009] состоит из трёх детекторных блоков — RT-2/S, RT-2/G [Debnath et al., 2011], RT-2/CZT [Kotoch et al., 2011] — и блока электроники RT-2/E [Sreekumar et al., 2011]. В блоках RT-2/S и RT-2/G регистрация осуществляется сцинтилляторами NaI(Tl) и CsI(Na). В блоке RT-2/CZT установлены три Cadmium Zinc Telluride (CZT)-детектора и один Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) детектор. Блок окружен пассивной защитой и имеет угол зрения в диапазоне от 6 угл. мин до 6° [Nandi, et al., 2011].

Винод Падманабха — начальник отдела космического центра им. Викрам Шарабхай.

Шрикумар Санкараттил — доктор философии по физике.

Котов Юрий Дмитриевич — директор, кандидат физико-математических наук, e-mail: kotov@mephi.ru.

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

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора, кандидат физико-математических наук, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

Тышкевич Владимир Георгиевич — доцент, e-mail: vladi@dozen.mephi.ru.

Архангельский Андрей Игоревич — научный сотрудник, e-mail: angel1996@list.in.

Зятков Роман Александрович — инженер, e-mail: zyatkovra@gmail.com.

Прибор RT-2 с временным разрешением ~ 100 мс может выполнять быстрые спектральные исследования солнечных рентгеновских вспышек и получать изображения вспышек в жёстком рентгеновском диапазоне. Все три блока детекторов размещены вне гермоотсека спутника соосно направлению оси спутника, ориентированной на Солнце. К отличительным особенностям прибора следует отнести: метод получения изображений в жёстком рентгене с использованием зональной пластины Френеля (FZP); новое поколение детекторов рентгеновского излучения, таких как CZT и CMOS с лучшей позиционной чувствительностью для получения изображений в жёстком рентгеновском диапазоне (пиксели детектора CMOS имеют размер 50×50 мкм); процессор, реализованный в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС); бортовое программное обеспечение, которое может быть изменено командами с Земли; использование методики сжатия данных без потерь и т. д.

Детектор RT-2/S способен регистрировать до 20 000 событий/с, что дает возможность изучения солнечных вспышек до M-класса в энергетическом диапазоне 15...150 кэВ. Детектор RT-2/G имеет алюминиевый фильтр для блокировки низкоэнергичного рентгеновского излучения и, таким образом, при скорости счёта 20 000 событий/с способен регистрировать солнечные вспышки до класса X. Три детектора CZT имеют диапазон счёта до 100 000 событий/с. Характеристики детекторов RT-2 даны в [Котов и др., 2010].

CMOS-детектор с разрешением несколько угловых минут способен строить изображения мощных вспышек (с потоками более 10^3 фотон \cdot см $^{-2}$ с $^{-1}$ кэВ $^{-1}$ при энергии более 20 кэВ), происходящих примерно один раз в полгода во время солнечного максимума. Описаны элементы прибора, его функционирование на орбите и некоторые результаты, полученные в течение первых 10 мес наблюдений.

ДЕТЕКТОРЫ RT-2/S И RT-2/G

Функциональные характеристики обоих детекторов во многом идентичны. Основные различия заключаются в конструкции коллиматоров, обеспечивающих различные поля зрения ($4 \times 4^\circ$ для RT-2/S и $6 \times 6^\circ$ для RT-2/G), а также в том, что детекторы работают с различными энергетическими порогами (RT-2/G работает в диапазоне выше 25 кэВ, тогда как RT-2/S — выше 15 кэВ). Это обеспечивается алюминиевым фильтром толщиной 2 мм над коллиматором RT-2/G.

Фосвич-детекторы

Сцинтилляционные фосвич-детекторы хорошо подходят для спектроскопических исследований высокоэнергичного рентгеновского излучения от астрофизических объектов. В приборе RT-2 блоки RT-2/S и RT-2/G с такими детекторами состоят из сцинтилляторов NaI(Tl) и CsI(Na), собранных по схеме «фосвич», в герметичной упаковке с входным окном толщиной 0,2 мм Al для поглощения рентгеновского излучения с энергией ниже 15 кэВ.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) диаметром 76,2 мм соединён с кристаллом CsI(Na) через световод толщиной 10 мм. Кристаллы NaI(Tl) и CsI(Na) имеют одинаковый диаметр (116 мм) и толщину 3 и 25 мм, соответственно. Блоки изготовлены голландской фирмой M/S Scionix Holland BV. В данной сборке кристалл NaI(Tl) предназначен для детектирования жёсткого рентгеновского излучения с энергией до 150 кэВ, тогда как кристалл CsI(Na) более удобен для регистрации жёсткого рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне 30...1000 кэВ, а также фоновых заряженных частиц. Различные времена высвечивания в кристаллах NaI(Tl) (250 нс) и CsI(Na) (650 нс) позволяют отбирать события в кристалле NaI(Tl). Для калибровки в полёте используется радиоактивный источник ^{57}Co (122 кэВ) активностью 100 нКи. Активационная линия ^{121}I (58,5 кэВ) в кристалле NaI [Nandi et al., 2009] и линия эмиссии 122 кэВ в кристалле CsI используются для калибровки в полёте NaI и CsI, соответственно. Источник встроен в одну из пластин коллиматора. При наземной калибровке получено, что энергетическое разрешение для обоих детекторов приблизительно равно 18 % для 60 кэВ [Debnath et al., 2011].

Электроника

Световые вспышки (после взаимодействия рентгеновского излучения с веществом кристаллов) попадают на ФЭУ и преобразуются в электрические импульсы, которые обрабатываются узлами электроники каждого детектора. Узлы фронтальной электроники детекторов идентичны и содержат схемы (аналоговые и цифровые) для усиления электрических импульсов, измерения формы и амплитуды импульса. Реализованная на ПЛИС система сжатия и обработки данных используется для представления в цифровом виде импульсных сигналов с детекторов и служебной информации. Детальное описание системы электроники дано в [Debnath et al., 2011].

Каждый блок детекторов может взаимодействовать с системой сбора и регистрации научной информации (ССРНИ) через блок электроники [Sreekumar et al., 2011]. Блок RT-2/E управляет детекторами при получении команд от служебных систем спутника. Этот блок собирает также данные с детекторов, хранит их в памяти для дальнейшей обработки и передачи в ССРНИ и затем на наземный пункт приёма.

Эксплуатационные характеристики

Автономное функционирование детекторов RT-2 полностью управляется командами. От блока управления и соединений (БУС-ФМ) прибор получает питание 27_{-3}^{+7} В, которое поступает на низковольтные конвертеры (MDI DC-DC) RT-2/S и RT-2/G через блок электроники RT-2/E. Конвертеры MDI DC-DC преобразуют это напряжение в напряжения ± 15 и $+5$ В для питания электронных компонент каждого детектора. Напряжение $+15$ В на высоковольтном DC-DC-конвертере преобразуется в регулируемое напряжение (HV) в диапазоне 400...900 В для питания ФЭУ. Уровень высокого напряжения, необходимый для подстройки коэффициента усиления сигнала, устанавливается с помощью управляющих кодовых слов (УКС) с точностью до 4,5 В.

Сигналы от кристаллов NaI и CsI разделяются по форме импульсов (PSD). Напряжения порогов дискриминаторов нижнего (LLD) и высокого (ULD) уровня используются в предусилителях G1 и G2 для задания диапазона энергий от 15 до 1000 кэВ (15...100 кэВ для G1-NaI; 30...210 кэВ для G1-CsI; 210 кэВ – 1 МэВ для G2) и изменяются посредством УКС. Управляемый генератор (VCO) применяется в схемах контроля служебных параметров прибора, таких как величина напряжения на выходе источника питания $+5$ В, температура, HV и LLD [Debnath et al., 2011].

ДЕТЕКТОР RT-2/CZT

Блок RT-2/CZT — изображающий инструмент в жёстком рентгеновском диапазоне — состоит из двух типов различных изображающих детекторов, а именно, детекторов CZT и CMOS. Три детектора CZT и один детектор CMOS размещены в виде матрицы 2×2 . Используются два различных типа кодирующих коллиматоров: кодирующая апертурная маска (CAM) и зональная пластина Френеля (FZP) для создания тени от объекта наблюдений на небе в плоскости детектора. Блок RT-2/CZT позволяет исследовать источники жёсткого

рентгеновского излучения (например, область солнечных вспышек) с различными пространственными разрешающими способностями. Подробное описание блока (в различных комбинациях детекторов и кодирующих коллиматоров) и результатов моделирования дано в работе [Nandi et al., 2011].

Детекторные CZT-модули

Модуль CZT (Cadmium Zinc Telluride) является примесным полупроводниковым детектором рентгеновского излучения, имеющим широкую запрещённую зону (1,5...2,0 эВ), а также большой атомный номер (Z-50). Эти присущие CZT свойства позволяют работать при температуре, близкой к комнатной, в режиме регистрации жёсткого рентгеновского излучения. Этот детектор нового поколения имеет высокую эффективность детектирования (100 %) в диапазоне энергий 10...100 кэВ, а также хорошую разрешающую энергетическую способность (8 % для 60 кэВ) для жёсткого рентгеновского и гамма-излучения по сравнению с пропорциональным счетчиком и сцинтилляционными детекторами.

В блоке RT-2/CZT детекторные CZT-модули (OMS40G256) производства фирмы Orbotech Medical Solutions Ltd., Израиль, используются в качестве детекторов жёсткого рентгеновского излучения. Каждый такой модуль (размер 4,0×4,0 см) содержит 256 отдельных детекторов (размер пикселей 2,5×2,5 мм). Типичный CZT-модуль с толщиной кристалла 5 мм показан на рис. 1. Встроенная электроника модуля снабжена температурным датчиком, чтобы контролировать тепловыделение, и цифровым интерфейсом для уменьшения помех.

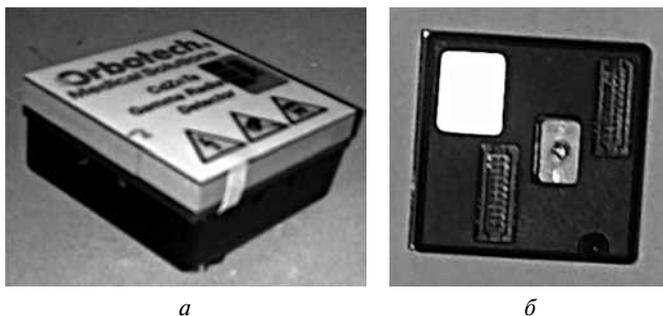


Рис. 1. Внешний вид CZT-модуля (OMS40G256):
a — вид сверху; *б* — вид снизу



Рис. 2. Внешний вид Rad-Eye1 CMOS-детекторной системы

Электрические и механические испытания модулей детектора CZT были проведены в лаборатории для проверки их работоспособности в различных условиях окружающей среды. Детальное описание процедуры испытаний и их результаты даны в [Kotoch et al., 2011]. В полётных образцах детекторов RT-2/CZT установлен нижний порог 20 кэВ (но этот порог может изменяться при помощи УКС).

CMOS-детектор

Детектор CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) является позиционно-чувствительным датчиком нового поколения, который используется для построения изображений в жёстком рентгеновском диапазоне 20...150 кэВ. Он обладает высоким координатным разрешением, и эта уникальная характеристика основана на использовании встроенных фотодиодных сенсоров с пикселями размером 48×48 мкм.

Высокоэнергичное рентгеновское излучение преобразуется в световые фотоны с помощью сцинтиллятора Gd_2O_2S , который находится в оптическом контакте с входным окном фотодиода. Rad-Eye1 CMOS-детектор размером 25×50 мм изготовлен американской фирмой Radicon Imaging Corp. (рис. 2).

Блок формирования изображений Rad-Eye1 CMOS-детектора выдает полностью дифференциальный высокоскоростной видео-сигнал, который оцифровывается и преобразуется для передачи на процессорное электронное устройство для дальнейшей обработки. CMOS работает в температурном диапазоне 0...50 °С с теньевым шумовым током 4000 электронов/с при комнатной температуре.

Функционирование электронных узлов блока RT-2/CZT

Импульсы напряжения, возникающие в CZT после взаимодействия рентгеновского излучения с кристаллами, подаются на предусилитель

и усилитель-формирователь. Усиленный сигнал оцифровывается 12-разрядным АЦП. Вся электроника реализована на специализированных ПЛИС, расположенных в модуле детектора. Неуправляемый источник используется для получения напряжения -600 В, необходимого для питания модулей CZT. Все три модуля CZT подключены к шине SPI, которая взаимодействует с ПЛИС. Видеосигнал на выходе CMOS оцифрован и поступает на ПЛИС для соответствующей обработки и построения изображения для каждого пиксела с разрешением по амплитуде в 1 бит. Детали электроники блока RT-2/CZT описаны в [Kotoch et al., 2011].

Так же, как и фосвич-детекторы (RT-2/S и RT-2/G), блок RT-2/CZT получает от блока управления аппаратурой (БУС-ФМ) питание 27_{-3}^{+7} В. Это напряжение на низковольтном MDI DC-DC-конвертере преобразуется до величин ± 15 и $+5$ В, используемых для питания модулей детектора и электронных компонент. Питание $+5$ В для CMOS-детектора получается от вывода $+15$ В MDI. Полная потребляемая мощность блока RT-2/CZT ограничена $7,5 \pm 0,5$ Вт. Аналогово-цифровой преобразователь используется для измерения контролируемых служебных параметров, таких как величина напряжения на выходе источника питания $+5$ В, температура, наличие/отсутствие высокого напряжения и напряжения питания ПЛИС и CMOS. Управление работой блока RT-2/CZT осуществляется блоком электроники RT-2/E, который посылает команды и получает данные от RT-2/CZT для дальнейшей обработки и передаёт их в ССРНИ.

Характеристики детекторов изображения в диапазоне жёсткого рентгеновского излучения

САМ — одинарный коллиматор

Кодирующая апертурная маска (САМ) является одинарным коллиматором, который представляет собой массив непрозрачных и прозрачных элементов заданной конфигурации, расположенных в одной плоскости. Маска создает тень от любого источника на небе, и эта тень проецируется на плоскость детектора, который регистрирует некоторую кодированную информацию об источнике. Различные методики восстановления использовались для выделения источника из проекции тени на плоскость детектора. В блоке RT-2/CZT использовались конфигурации элементов маски с максимально возможной прозрачностью 50 % для двух модулей CZT-детектора. Конфигурация маски для одного из модулей показана на



Рис. 3. Конфигурация маски САМ, используемой в модуле CZT. Методика генерации шаблона обсуждается в [Nandi et al., 2011]

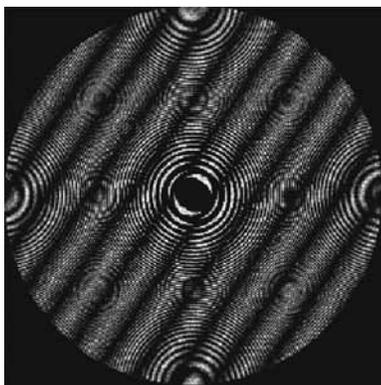


Рис. 4. Моделированное расположение интерференционных полос Муара

рис. 3. Разрешающая способность комбинации САМ-CZT составляет около 21 угл. мин [Kotoch et al., 2011].

FZP — двойной коллиматор

Зональная пластина Френеля (FZP) — это система концентрических круговых прозрачных и непрозрачных колец. В методике восстановления по тени используется сдвоенный плоский кодер с двумя зональными пластинами, разнесенными на определенное расстояние. Для двойных зональных пластин функция передачи, в основном, подобна части преобразования Фурье [Mertz, 1965] из источника в плоскость детектора. Рентгеновские кванты, проходя через кодер FZP, производят тень в плоскости датчика в форме системы полос, известных как система полос Муара. Расстояние между двумя смежными

полосами в изображении является мерой ориентации лучей, а, следовательно, положения источника на небесной сфере [Desai et al., 1998]. Система полос Муара для некоторого положения источника показана на рис. 4. Используя обратное фурье-преобразование фигуры тени, которая была создана в плоскости детектора, можно перейти к плоскости источника и, измеряя расстояние между полосами в изображении, локализовать его положение на небе. Моделирование всех комбинаций положения источника и его реконструкции SAM и FZP обсуждаются в [Chakrabarti et al., 2009; Nandi et al., 2011].

Разрешающая способность комбинации FZP-CMOS может достигать нескольких угловых секунд для интенсивных источников.

БЛОК ЭЛЕКТРОНИКИ RT-2/E

Режимы работы

Блок электроники RT-2/E работает в нескольких модах, определяемых как научными задачами, так и возможностями использования бортовой памяти. Программное обеспечение RT-2 позволяет решать такие задачи как обработка данных для различных режимов и форматов, обнаружение всплесков, сжатие данных и т. д. [Sreekumar et al., 2011].

Неблагоприятные условия — ВШИР. В этом режиме высоковольтное напряжение на всех детекторах понижается, для того чтобы предохранить детекторы от перегрузки в областях повышенной радиации (Южно-Атлантическая аномалия, Южная полярная шапка и Северная полярная шапка). В этом режиме каждые 100 с передаются только кадры с заголовком и статусом прибора.

Тестирование. В тестовой моде детектор передает данные только о событиях (солнечные всплески, гамма-всплески) вместе со служебной информацией каждую секунду. Данные передаются через RT-2/E в ССРНИ без какого-либо сжатия.

Отладка. В этом режиме научная информация (спектральные и временные данные) от детектора передается в ССРНИ по мере поступления в RT-2/E. Каждый кадр обрабатывается одну секунду.

Наблюдение спокойного Солнца — SQM. SQM — первичный режим накопления научных данных от детекторов. В этом режиме спектральные данные получают один раз в 100 с, данные по временному поведению — один раз в 1 с для фосвич-детекторов и детекторов CZT. Изображения с CZT и CMOS-детекторов получают один раз в 100 с.

Регистрация солнечных вспышек — SFM. Режим используется для получения данных с высоким временным и спектральным разрешением о солнечных вспышках, гамма-всплесках и т. п. В этом режиме спектральные данные с фосвич-детекторов накапливаются за 10 с, временное поведение интенсивности — за 0,1 с, тогда как накопление данных в CZT и CMOS-детекторах выполняется аналогично режиму SQM.

Работа в тени Земли — «Тень». Этот режим включается, когда спутник находится в тени Земли и Солнце не попадает в поле зрения детекторов. Данные со всех детекторов передаются каждые 100 с.

Форматы данных

По запросам от RT-2/E все детекторы каждую секунду отправляют данные в RT-2/E для дальнейшей обработки и упаковки.

Структура данных с фосвич-детекторов

Фосвич-детекторы обычно работают в режиме SQM, когда спектральные и временные данные накапливаются отдельно и каждую секунду передаются в блок RT-2/E. В этом режиме (первичный рабочий режим детекторов) в общей сложности 3248 слов из пространства памяти в блоке RT-2/E выделяются для данных с детекторов RT-2/S (RT-2/G): спектр NaI — 1024 слова; спектр CsI — 1024 слова; спектр G2 — 256 слов; спектр PSD — 128 слов; синхронизация — 800 слов; счетчик — 16 слов.

Кроме данных с детектора, служебная информация (НК) [Debnath et al., 2011] с детекторов также передается RT-2/E и кодируется с использованием управляемого генератора напряжения (VCO).

Структура данных с CZT и CMOS-детекторов

CZT-детекторы также работают в режиме SQM, в котором спектральные, временные данные и изображения накапливаются отдельно и каждую секунду передаются в блок RT-2/E. В этом режиме в общей сложности 5832 слова памяти в RT-2/E выделены для трех модулей CZT-детекторов: изображение — 3072 слова; спектр — 1536 слов; синхронизация — 1200 слов; счетчик — 24 слова.

В CMOS-детекторе все 512×1024 пикселей периодически считываются и центральные 512×512 пикселей используются для построения конечного изображения. Растровое изображение получается суммированием значений четырех смежных пикселей (2×2), так что

конечное изображение имеет размер 256×256 пикселей. Отдельно вычисляется сумма всех вертикальных (V_{sum}) и горизонтальных (H_{sum}) пикселей. Структура данных с CMOS-детектора следующая: изображение — 4096 слов; сумма (512 слов): V_{sum} (256 слов) + H_{sum} (256 слов).

Восемь специальных слов используются для передачи через служебную телеметрическую систему номера считанной строки CMOS, идентификационного слова, результата калибровки, а также данных о температуре, посланных командах, исполненных командах, номере события. Эта информация записывается в заголовке кадра.

Служебные данные с детекторов также передаются в блок RT-2/E с кодированием информации через аналого-цифровой преобразователь. Методы калибровки индивидуальных пикселей в CZT и в CMOS-детекторах обсуждаются в [Sreekumar et al., 2011].

Данные с детекторов упаковываются в RT-2/E в блоки по 64 слова в зависимости от режима обработки. Перед передачей на Землю данные сжимаются и передаются в ССРНИ в пакетах по 60 слов (59 слов научная информация и одно слово — заголовок пакета).

В SQM-режиме кадр данных с детекторов RT-2/S (RT-2/G) состоит из 57 пакетов. Первый из них — заголовок кадра, который содержит информацию о статусе, режимах работы, об идентификаторе детектора и т. д. В остальных 56 пакетах хранится научная информация со структурой, описанной выше.

Данные с детектора RT-2/CZT состоят из 218 пакетов, первый из которых — заголовок кадра — содержит информацию о статусе, режимах работы и т. д. Остальные 217 пакетов содержат научную информацию с детекторов CMOS и CZT.

Наблюдения и анализ

Прибор RT-2 на борту КА «КОРОНАС-Фотон» был включён 19 февраля 2009 г. Начиная с этого момента прибор зарегистрировал несколько солнечных вспышек и гамма-всплесков. Ниже будут представлены результаты этих наблюдений и анализ функционирования детекторов.

Все три блока детекторов проектировались таким образом, чтобы предотвратить искажение данных от наблюдаемых процессов фоновым космическим излучением. Это излучение всенаправленное и может вызвать увеличение шумов в детекторах. Авторами было проведено моделирование методом Монте-Карло для оценки как фоновых шумов, так и эффективности защиты детекторов тонкими экранами [Sarkar et al., 2011].

Для проведения анализа спектров использовались матрицы откликов детекторов RT-2/S и RT-2/G. Спектральные линии ~58,0 кэВ (в кристалле NaI(Tl) из-за распада ^{121}I) и 122 кэВ (в кристалле CsI(Na) от выносного источника ^{57}Co) используются для калибровки энергетической шкалы.

При работе в указанных режимах (кроме режимов ВШИР и SFM) спектры накапливались каждые 100 с и скорости счёта в восьми каналах (для каждого датчика) набирались каждую секунду. Во вспышечном режиме SFM в фосвич-детекторах данные накапливались в течение 10 с (для спектров) и за 0,1 с (для временных данных). Для спектрального анализа генерировались соответствующие матрицы отклика детекторов RT-2/S и RT-2/G.

Функционирование RT-2/S и RT-2/G: наблюдения солнечных вспышек

Полётная настройка обоих фосвич-детекторов была сделана в течение первых двух месяцев после включения прибора. Были подобраны напряжения питания ФЭУ и пороги дискриминаторов нижнего уровня LLD с помощью программных команд. В результате первоначальной настройки установлены энергетические диапазоны спектра NaI (Tl) (RT-2/S) в интервале от 15 до ~100 кэВ (нижний порог в RT-2/G — 25 кэВ) и спектра CsI (Na) в интервале от 30 до ~1000 кэВ.

Пульсации жёсткого рентгеновского излучения во время вспышки 5 июля 2009 г.

Детекторы RT-2/S и RT-2/G зарегистрировали солнечную вспышку класса C2.7, которая по данным спутниковой системы NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) имеет номер 11024, произошла вблизи центра диска (S27W12) и имела максимум интенсивности в 07:12 UT 5 июля 2009 г. На основании поведения интенсивности излучения в рентгеновском диапазоне было сделано заключение, что это компактная импульсная вспышка. Кривая светимости в рентгеновском диапазоне этой вспышки показана на рис. 5.

Подробный анализ временного профиля показал явное присутствие квазипериодических пульсаций (с периодами 12 и 15 с) и очень высокую достоверность последних на фазе роста [Rao et al., 2010]. Монте-Карло-модель применялась для расчётов эффективной площади и затем, с использованием функции отклика и фонового спектра, измеренного в отсутствие вспышки, были получены спектральные параметры вспышки. Спектр имеет степенной вид и хорошо

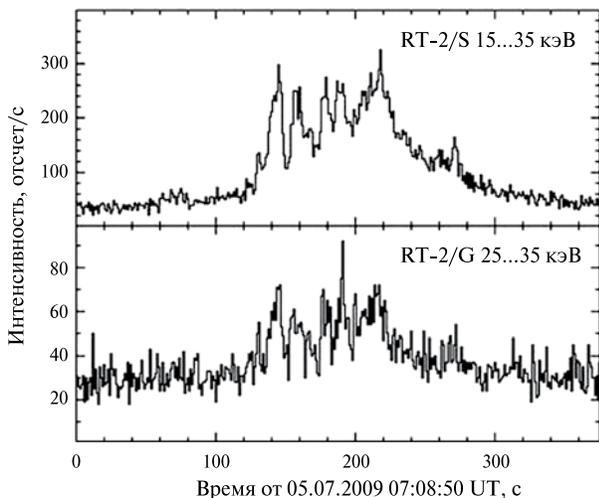


Рис. 5. Кривая светимости солнечной вспышки 5 июля 2009 г. $T_0 = 07:08:50$ UT

аппроксимируется моделью тормозного излучения с температурой $3,43 \pm 0,30$ кэВ [Rao et al., 2010]. Установлено, что этот спектр хорошо согласуется со спектром, полученным американским аппаратом RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) для этой вспышки.

Низкоэнергичные солнечные вспышки

Серия солнечных вспышек была зафиксирована прибором RT-2 в период активности, который имел место на Солнце с 22 октября по 2 ноября 2009 г. Большинство вспышек наблюдалось в области мягкого рентгеновского диапазона (ниже 25 кэВ). Очень слабая вспышка класса B1.0 была зарегистрирована детекторами RT-2 26 октября 2009 г. в 07:52 UT (T_p — время максимума). Вспышка была настолько слаба, что проявилась только в канале 1 детектора RT-2/S, который соответствует энергии измерения менее 20 кэВ. Кривая светимости вспышки с разрешением в 1 с показана на рис. 6.

Более мощная вспышка класса C1.3 также была зарегистрирована 26 октября 2009 г. в 22.48 UT (T_p) фович-детектором. Вспышка наблюдалась только в низкоэнергичном канале RT-2/S. Кривая светимости вспышки в канале с энергией ниже 20 кэВ с разрешением в 1 с показана на рис. 7.

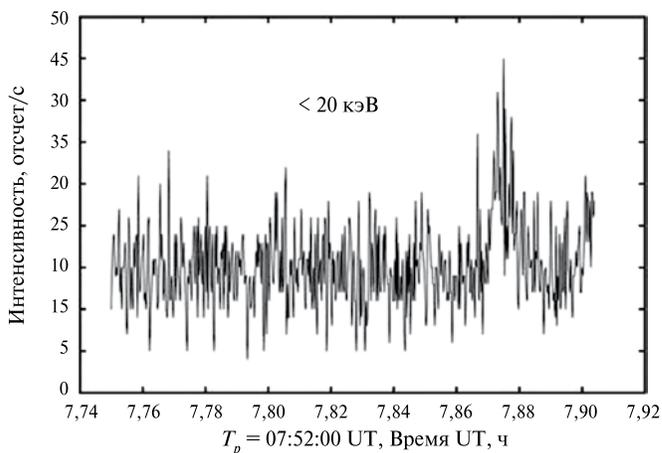


Рис. 6. Кривая светимости солнечной вспышки класса B1.0

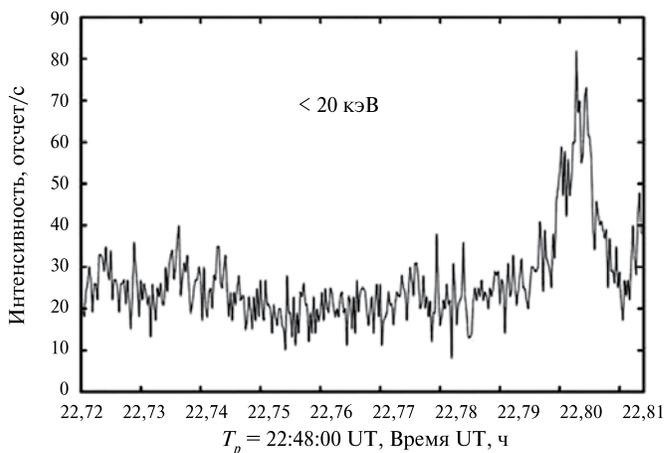


Рис. 7. Кривая светимости солнечной вспышки класса C1.3

Прибор RT-2 как всенаправленный детектор для изучения гамма-всплесков

Было проведено расширенное моделирование методом Монте-Карло для определения взаимодействия высокоэнергичного фонового излучения с элементами защиты детектора. Детальный анализ показал, что оба фосвич-детектора (RT-2/S и RT-2/G) могут быть

использованы как всенаправленные гамма-детекторы с порогом выше 100 кэВ [Sarkar et al., 2011]. В течение 10 мес работы прибор RT-2 зарегистрировал по крайней мере четыре гамма-всплеска (в энергетическом диапазоне от 15 до ~1000 кэВ), излучение от которых падало на детекторы, в основном, под большим углом (от 45 до 80°) к оси ориентации на Солнце. Результаты приведены в [Рао и др., 2011].

Функционирование детектора RT-2/CZT

При включении на CZT-модули подается высоковольтное напряжение смещения -600 В. Так как энергетический порог CZT может изменяться командами, то для этапа первоначальной настройки было установлено его значение 30 кэВ.

Фоновые спектры CZT-детекторов

Полётная калибровка CZT-детекторов была проведена с использованием калибровочного источника ^{57}Co . После анализа переданных данных со всех трёх модулей CZT было установлено, что пик калибровочного источника стабилен для всех точек орбиты спутника. Пик от ^{57}Co (122 кэВ) хорошо выделяется в фоновых спектрах всех модулей и на рис. 8 показан типичный спектр для детектора CZT-2 (время набора спектра 100 с).

Полученное при калибровке энергетическое разрешение детектора CZT-2 составляет примерно 5,6 % при 122 кэВ. Были также вычислены разрешения двух других CZT-модулей и получены следующие результаты — 7,32 % для CZT-1 и 5,97 % для CZT-3. Из-за малой площади и более высокого энергетического порога слабые солнечные вспышки не регистрировались RT-2/CZT, и, вследствие хорошей конструкционной защиты, гамма-всплески, находящиеся вне поля зрения детекторов, также не регистрировались. Изменения фонового счета CZT-детекторов в режимах «Свет» и «Тень» показаны на рис. 9. Можно заметить, что в условиях СРШИР детекторы функционировали стабильно. В отличие от фосвич-детекторов в CZT не применялись активные методы защиты и вследствие этого продолжительность СРШИР-области для них значительно меньше по сравнению с фосвич-детекторами.

CMOS-изображения

Тщательные полётные калибровки CMOS были проведены для определения фонового порога. Этот порог оценивался в режиме

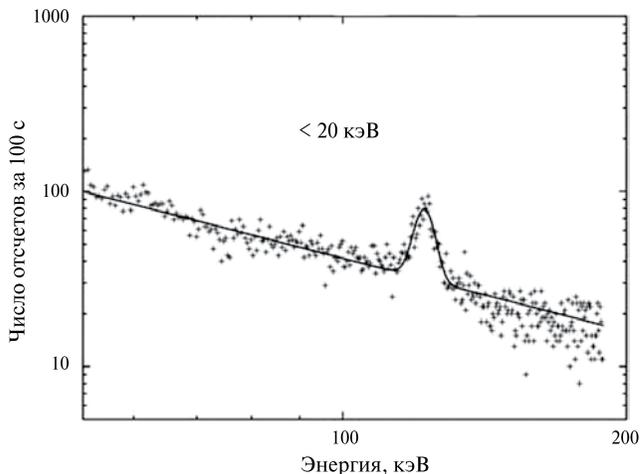


Рис. 8. Фоновый спектр детектора CZT-2

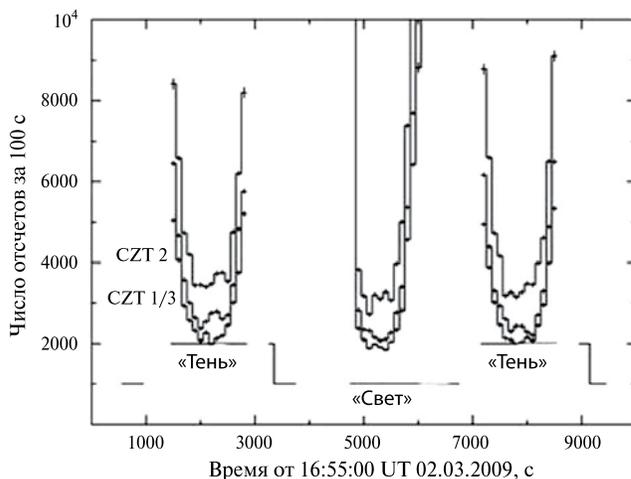


Рис. 9. Изменения фонового счета в детекторах CZT

«Тень» и его величина была установлена для CMOS до начала физических измерений. Первоначальная проверка функционирования CMOS была выполнена с различными фоновыми порогами, которые устанавливались по команде.

Было подсчитано полное количество событий, записанных CMOS-пикселями. Получено, что при минимальном пороге во всех пикселях изображения присутствуют отсчёты. Для более высоких пороговых значений количество записанных пикселей уменьшается с полного числа до 154. Эти величины являются функцией местоположения спутника, коррелируют с фоновым потоком заряженных частиц и дают возможность калибровать порог CMOS-детектора. Конечные фоновые CMOS-изображения при различных порогах показаны на рис. 10–12. Горизонтальная линия на рис. 11, 12 является собственной линией CMOS и проходит на уровне 112 и 113 пикселей.

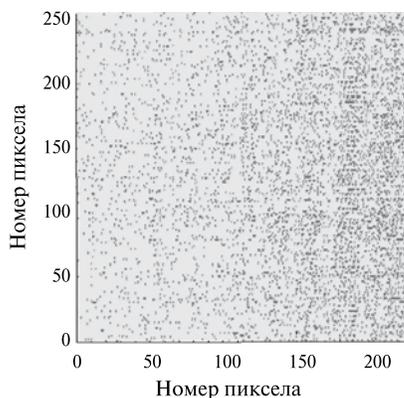


Рис. 10. Конечное фоновое CMOS-изображение (низкий порог)

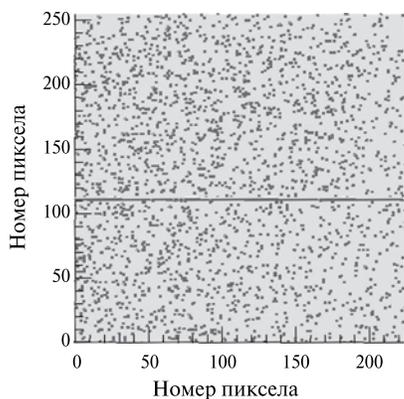


Рис. 11. Конечное фоновое CMOS-изображение в режиме «Тень» (средний порог)

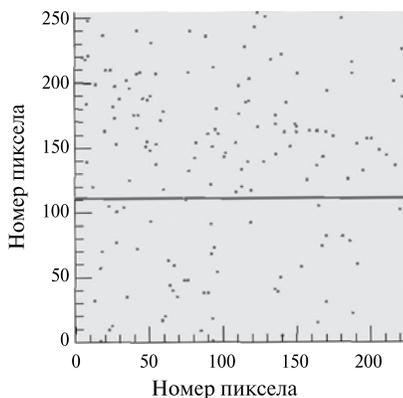


Рис. 12. Конечное фоновое CMOS-изображение в режиме «Тень» (высокий порог)

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все детекторы RT-2 функционировали нормально. Из-за минимума солнечной активности было зарегистрировано только 10 солнечных вспышек, и они оказались слишком слабыми, чтобы их смог зарегистрировать детектор RT-2/CZT (из-за малой площади и более высокого порога). Однако проводятся дополнительные методические исследования, чтобы получить данные по микровспышкам. Фосвич-детекторы, функционировавшие также как всенаправленные детекторы гамма-излучения, зарегистрировали четыре гамма-всплеска. Хорошее знание спектральной функции отклика детекторов позволило измерить рентгеновские/гамма-спектры излучения одной солнечной вспышки и нескольких гамма-всплесков.

Данная работа была частично профинансирована грантом Индийской организации космических исследований (ISRO). Авторы выражают искреннюю благодарность за поддержку Г. Мэдхэвну Нэйру (G. Madhavan Nair), исполнительному директору ISRO, одному из инициаторов проекта. Авторы также признательны ряду организаций, внесших существенный вклад в реализацию прибора.

Создание КА, его отработка и проведение экспериментов, включая прием и передачу информации в головные организации по отдельным экспериментам, финансировались Роскосмосом в соответствии с Федеральной космической программой РФ.

Литература

- [Котов и др., 2010] *Котов Ю. Д., Рао А. Р., Чакрабарти С. К.* и др. Функционирование гамма-спектрометра RT-2 комплекса научной аппаратуры космического аппарата «КОРОНАС-ФОТОН» на первых этапах лётных испытаний // Первые этапы лётных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту КОРОНАС-ФОТОН: Тр. рабочего совещания. Россия, Таруса. 22–24 апр. 2009. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 183–195 (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Рао и др., 2011] *Рао А. Р., Малкар Д. П., Хингар М. К., Агравал В. К.* и др. Эксперимент с прибором RT-2 на борту КА «КОРОНАС-Фотон» // *Астрон. вест.* 2011. Т. 45. № 2. С. 128–138.
- [Chakrabarti et al., 2009] *Chakrabarti S. K., Palit S., Debnath D., Nandi A.* et al. Fresnel Zone Plate Telescope for X-Ray Imaging I: Experiments with a Quasi-Parallel Beam // *Experimental Astronomy.* 2009. V. 24. Iss. 1–3. P. 109–126.
- [Debnath et al., 2011] *Debnath D., Nandi A., Rao A.P., Malkar J.P.* et al. Instruments of RT-2 Experiments Onboard CORONAS-Photon and their Test and Evaluation I: RT-2/S and RT-2/G Payloads // *Experimental Astronomy.* 2011. V. 29. Iss. 1–2. P. 1–25.
- [Desai et al., 1998] *Desai U., Orwig L. E., Piquet L., Gaither C. C.* X-ray Telescope for Small Satellites // *Proc. SPIE.* 1998. V. 3442. P. 94. Missions to the Sun II / Ed. Clarence M. Korendyke.
- [Kotoch et al., 2011] *Kotoch T., Nandi A., Rao A.P., Malkar J.P.* et al. Instruments of RT-2 Experiments Onboard CORONAS-Photon and their Test and Evaluation II: RT-2/CZT Payloads // *Experimental Astronomy.* 2011. V. 29. Iss. 1–2. P. 27–54.
- [Kotov et al., 2008] *Kotov Y., Kochemasov A., Kuzin S., Kuznetsov V.* et al. Set of Instruments for Solar EUV and Soft X-Ray Monitoring Onboard Satellite CORONAS-Photon // *Proc. of the 37th COSPAR Scientific Assembly.* 2008. Montréal, Canada. P. 1596.
- [Mertz, 1965] Mertz L. *Transformation in Optics.* N. Y.: Wiley, 1965. 116 p.
- [Nandi et al., 2009] *Nandi A., Rao A. R., Chakrabarti S. K., Malkar J.P.* et al. Indian Payloads (RT-2 Experiment) Onboard CORONAS-Photon Mission // *Proc. Intern. Conf. on Space Technology. Greece / Eds. G. Lampropoulos, M. Petrou.* 2009. P. 4.
- [Nandi et al., 2011] *Nandi A., Palit S., Debnath D., Chakrabarti S.* et al. Instruments of RT-2 Experiments Onboard CORONAS-Photon and their Test and Evaluation III: Coded Aperture Mask and Fresnel Zone Plates in RT-2/CZT Payloads // *Experimental Astronomy.* 2011. V. 29. Iss. 1–2. P. 55–84.
- [Sarkar et al., 2011] *Sarkar R., Mandal S., Debnath D., Kotoch T.* et al. Instruments of RT-2 Experiments Onboard CORONAS-Photon and their Test and Evaluation IV: Background Simulations using GEANT-4 Toolkit // *Experimental Astronomy.* 2011. V. 29. Iss. 1–2. P. 85–107.
- [Sreekumar et al., 2011] *Sreekumar S., Vinod P., Samuel E., Malkar J.P.* et al. Instruments of RT-2 Experiments Onboard CORONAS-Photon and their Test

- and Evaluation V: Onboard Software, Data Structure, Telemetry and Telecommand // *Experimental Astronomy*. 2011. V. 29. Iss. 1–2. P. 109–133.
- [Rao et al., 2010] Rao A. R., Malkar J. P., Hingar M. K., Agrawal V. K. et al. RT-2 Detection of Quasi-Periodic Pulsations in the 2009 July 5 Solar Hard X-ray Flare // *Astrophysical J.* 2010. V. 714. N. 2. P. 1142–1148.

RT-2 PERFORMANCE ONBOARD THE CORONAS-PHOTON SATELLITE. RESULTS OF EXPERIMENT

A. R. Rao¹, J. P. Malkar¹, M. K. Hingar¹, V. K. Agrawal¹,
S. K. Chakrabarti², A. Nandi³, D. Debnath³, T. B. Kotoch³,
R. Sarkar³, T. R. Chidambaram⁴, P. Vinod⁴, S. Sreekumar⁴,
Yu. D. Kotov⁵, A. S. Buslov⁵, V. N. Yurov⁵, V. G. Tyshkevich⁵,
A. I. Arkhangelskiy⁵, R. A. Zyatkov⁵

¹ *Tata Institute of Fundamental Research (TIFR), Mumbai, India*

² *S. N. Bose National Centre for Basic Sciences, Kolkata, India*

³ *India Centre for Space Physics, Kolkata, India*

⁴ *Vikram Sarabhai Space Center, Thiruvananthapuram, India*

⁵ *National Research Nuclear University “MEPhI”
(NRNU MEPhI), Moscow, Russia*

The RT-2 Experiment onboard the CORONAS–Photon satellite is designed to study the spectral, temporal, and spatial details of solar hard X-ray flares in the 15...150 keV range. Above this energy (and up to 1000 keV), it also acts as an omni-directional gamma-ray detector with a capability to study gamma-ray bursts (GRB), bright solar flares, and X-ray pulsars. With an ensemble of hard X-ray detectors with different fields of view and coding devices, it also has the capability to investigate the spectrum of Cosmic Diffuse X-ray Background. The performance of the detectors from 2009 February to November is described in this paper. Results obtained on a few GRBs and solar flares are also briefly discussed.

Keywords: space experiment, CORONAS-Photon, solar flares, X-ray and gamma-ray bursts, gamma-ray spectrometer, CZT-detector, phoswich detector, coded aperture mask, Fresnel zone plate, CMOS-detector.

Rao Arikkala Raghurama — professor, e-mail: arrao@mailhost.tifr.res.in.

Malkar Jaywant Pandurang — project engineer.

Hingar Mahendra Kumar — manager, e-mail: nkHINGAR@mailhost.tifr.res.in.

Agrawal Vivek Kumar — PhD in physics.

Chakrabarti Sandip Kumar — professor.

Nandi Anuj — PhD in physics, e-mail: anuj@csp.res.in.

Debnath Dipak — PhD in physics.

Kotoch Tilak B. — PhD student.

Sarkar Ritabrata — PhD in physics.

Chidambaram Thirunavukkarasu R. — deputy director.

Vinod Padmanabha — division head.

Sreekumar Sankarattil — PhD in physics.

Kotov Yury Dmitrievich — director, PhD in physics, e-mail: kotov@mephi.ru.

Buslov Anton Sergeevich — engineer, e-mail: ASBuslov@mephi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — deputy director, PhD in physics, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

Tyshkevich Vladimir Georgievich — senior lecturer, e-mail: vladi@dozen.mephi.ru.

Arkhangelskiy Andrey Igorevich — scientist, e-mail: angel1996@list.in.

Zyatkov Roman Aleksandrovich — engineer, e-mail: zyatkovra@gmail.com.

ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕСИС КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «КОРОНАС-ФОТОН»

С. В. Кузин¹, И. А. Житник¹, С. В. Шестов¹,
С. А. Богачев¹, О. И. Бугаенко², А. П. Игнатьев¹,
А. А. Перцов¹, А. С. Ульянов¹, А. А. Рева¹,
В. А. Слемзин¹, Н. К. Суходрев¹, Ю. С. Иванов¹,
Л. А. Гончаров¹, А. В. Митрофанов¹, С. Г. Попова¹,
Т. А. Шергина¹, В. А. Соловьев¹, С. Н. Опарин¹,
М. С. Зыков¹, В. И. Лучин³, В. Н. Полковников³,
Н. Н. Салашенко³, Н. Н. Цыбин³

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

² Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга МГУ имени М. В. Ломоносова
(ГАИШ), Москва

³ Учреждение Российской академии наук Институт физики
микроструктур РАН (ИФМ РАН), Нижний Новгород

В январе 2009 г. произведен успешный запуск спутника «КОРОНАС-Фотон». В состав научной аппаратуры спутника входил комплекс телескопов и спектрогелиографов ТЕСИС. Аппаратура ТЕСИС предназначена для получения изображений короны Солнца в мягкой рентгеновской и вакуумной ультрафиолетовой областях спектра с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением на высотах от переходного слоя до трех солнечных радиусов. Приводится описание основных характеристик аппаратуры, даны основные результаты наблюдений.

Кузин Сергей Вадимович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, e-mail: kuzin@sci.lebedev.ru.

Житник Игорь Александрович — главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: zhitnik@sci.lebedev.ru.

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

Богачев Сергей Александрович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: bogachev@sci.lebedev.ru.

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

Игнатьев Александр Петрович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: ignatyev@sci.lebedev.ru.

Перцов Андрей Александрович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: perzov@sci.lebedev.ru.

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

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

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

Ключевые слова: корона Солнца, вакуумный ультрафиолет, мягкий рентген, коротковолновое излучение солнечной короны, космические телескопы.

Введение

Исследование солнечной короны является актуальной задачей физики Солнца и астрофизики в целом. Многие фундаментальные вопросы, такие как механизм солнечных вспышек, физика нагрева короны, происхождение корональных выбросов массы, до сих пор остаются без ответа. Регистрируемые в короне проявления солнечной активности влияют на состояние межпланетной среды, на внешнюю ионосферу и магнитосферу Земли, т. е. обуславливают космическую погоду. Поэтому исследования солнечной короны и проявлений солнечной активности имеют не только фундаментальное, но и прикладное значение.

Слемзин Владимир Алексеевич — главный научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: slem@sci.lebedev.ru.

Суходрев Нина Кузьминична — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: suhodrev@sci.lebedev.ru.

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

Гончаров Александр Леонидович — инженер первой категории.

Митрофанов Александр Викторович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: mitrofa@sci.lebedev.ru.

Попова Светлана Геннадиевна — инженер второй категории, e-mail: pgss@mail.ru.

Шергина Татьяна Алексеевна — техник первой категории.

Соловьев Владимир Алексеевич — ведущий электроник.

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

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

Лучин Валерий Иванович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук.

Полковников Владимир Николаевич — младший научный сотрудник, e-mail: kiniokop@rambler.ru.

Салашенко Николай Николаевич — заведующий отделом, доктор физико-математических наук, член — корреспондент РАН, e-mail: salashch@ipm.sci-nnov.ru.

Цыбин Николай Николаевич — младший научный сотрудник, e-mail: tsybin@mail.ru.

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

Спутник «КОРОНАС-И» [Собельман и др., 1996], первый спутник этой программы, был запущен летом 1994 г. и проработал на орбите несколько месяцев. Второй спутник, «КОРОНАС-Ф», был запущен летом 2001 г. [Ораевский, Собельман, 2002] и успешно работал до конца 2005 г.

Третий спутник программы КОРОНАС — «КОРОНАС-Фотон» — был выведен на орбиту Земли 30 января 2009 г. [Kotov, 2004]. На борту космического аппарата находились 12 приборов, предназначенных для исследования различных проявлений активности Солнца в широком спектральном и энергетическом диапазоне. Научное руководство проектом КОРОНАС-ФОТОН осуществлялось Институтом астрофизики (ИАФ) «Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕСИС

Для спутника «КОРОНАС-Фотон» в ФИАН был разработан новый комплекс космических телескопов и спектрометров ТЕСИС. Основная цель эксперимента ТЕСИС — исследование короны Солнца в широком диапазоне высот и температур. В аппаратуре реализовывался апробированный ранее на предыдущих спутниках серии «КОРОНАС» метод изображающей спектроскопии Солнца. Этот метод заключается в регистрации изображений полного диска с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением в коротковолновой области спектра — мягком рентгеновском (МР) и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазонах длин волн.

Принципиальным в методе изображающей спектроскопии является регистрация изображений в узких спектральных интервалах, в идеале — отдельных монохроматических линиях, что позволяет определять параметры плазмы (температуру, плотность, обилия элементов и др.) солнечной короны с высокой точностью, характерной для спектральных методов исследования.

Среди задач эксперимента ТЕСИС — исследование механизмов накопления и высвобождения энергии в атмосфере Солнца, изучение активных солнечных процессов (вспышек и выбросов массы),

диагностика физических условий в корональной и вспышечной плазме. Комплекс приборов ТЕСИС имел высокое пространственное (до 1,7 угл. с) и временное (до 1 с) разрешение, позволял проводить наблюдения как в нижней атмосфере Солнца, так и на больших расстояниях от его поверхности (до трех радиусов), а также исследовать плазму в широком спектральном диапазоне с высоким разрешением (до 0,01 Å).

Научная аппаратура ТЕСИС включала шесть независимых каналов регистрации — телескопы ВУФ-диапазона, спектрогелиографы МР- и ВУФ-диапазонов и спектрометр-фотометр «Сфинкс» рентгеновского диапазона [Sylwester et al., 2008]. Основные характеристики каналов регистрации ТЕСИС приведены в таблице.

Конструктивно аппаратура ТЕСИС состояла из трех блоков: блока датчиков (БД), блока электроники (БЭ) и блока оптических датчиков (ОД). Блок датчиков (рис. 1) являлся основным блоком, содержащим научную аппаратуру для регистрации солнечных излучений и спектров.

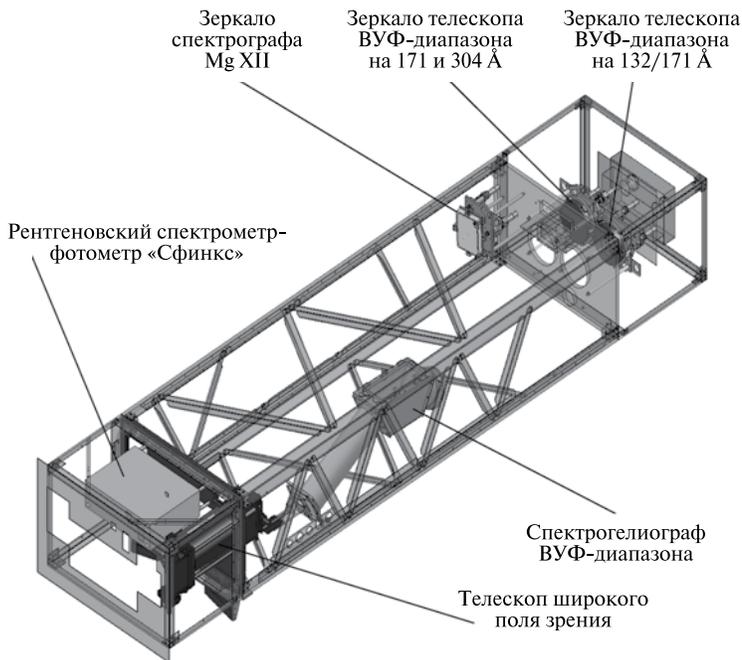


Рис. 1. Схема БД ТЕСИС

Характеристики аппаратуры ТЕСИС

| Канал регистрации/длины волны, Å | Наименование прибора, оптическая схема | Фокусное расстояние телескопов F , мм | Угловой размер пиксела, угл. с | Поле зрения, угл. град | Селективность, Å/Δλ | Доминирующие ионы | Форма поверхности зеркала | Размер зеркала, мм |
|----------------------------------|---|---|----------------------------------|------------------------|---|--|---------------------------|--|
| 132/171 | Телескоп высокого разрешения по оптической схеме Гершеля | 1630 | 1,71 | 1 | ~26 (132 Å) ~28 (171 Å) | Fe XIX, Fe XX, Fe XXIII (132 Å) Fe IX (171 Å) | Внеосевая парабола | Ø100 |
| 171/304 | То же | 1630 | 1,71 | 1 | ~28 (171 Å) ~30 для (304 Å) | Fe IX (171 Å) He II, Si XI (304 Å) | То же | Ø100 |
| 280...330 | Спектрогелиограф ВУФ-диапазона | 600 | 4,6 (в направлении дисперсии) | 2 | ~7 дисперсия ~0,0285 Å/пиксел | Fe XV, Ni XVIII, Si IX, Ca XVIII, Si XI, He II, Mg VIII и др. | Осевая парабола | Ø80 |
| 304 | Телескоп-коронграф широкого поля зрения по оптической схеме Ричи – Кретьена | 600 | 4,6 | 2 | ~7 | He II, Si XI | То же | Первичное зеркало — 80/20, вторичное зеркало — 40 |
| 8,42 | Спектрогелиограф Mg XII | 1200 | 2,3 | 1,3 | ~210, дисперсия ~3,8·10 ⁻⁴ Å/пиксел | Mg XII | Сфера | 120×80 |
| «Сфинкс» | Твердотельный Si-спектрометр, 0,5...15 кэВ | | | | | | | |

Блок электроники содержал центральный процессор, оперативную память и электронные интерфейсы для подключения БД и ОД, а также связи со служебными системами спутника. Блок оптических датчиков представлял собой два соосных противонаправленных телескопа с осью визирования, перпендикулярной оси на Солнце, и служил для определения текущей ориентации аппаратуры ТЕСИС и спутника «КОРОНАС-Фотон».

ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ АППАРАТУРЫ ТЕСИС

Регистрация изображений солнечной короны в коротковолновой области спектра требовала, с одной стороны, применения высокоэффективной питающей оптики и чувствительных детекторов изображений, с другой — высокую степень блокировки мощного солнечного излучения видимого диапазона. В качестве фокусирующих элементов в аппаратуре ТЕСИС использовались многослойные зеркала нормального падения (на диапазоны вблизи 132, 171 и 304 Å) и кристаллическое фокусирующее зеркало нормального падения (на диапазон 8,42 Å). Детекторы изображений аппаратуры ТЕСИС выполнены на основе backside ПЗС-матриц, форматом 2048×2048 пикселов. Блокировка излучения видимого диапазона осуществлялась двойной системой фильтрации на основе многослойных тонкопленочных фильтров.

Многослойные зеркала ВУФ-диапазона были изготовлены методом магнетронного напыления в Институте физики микроструктур РАН (ИФМ РАН) (Нижний Новгород). Для этого были разработаны технологии многослойных покрытий, обеспечивающих требуемые характеристики по пиковому коэффициенту отражения и спектральной селективности. Покрытие для диапазона вблизи 132 Å было выполнено на основе многослойной Mo/Si-структуры, измерение характеристик которой дало следующие результаты: $R \approx 64 \%$, $\lambda/\Delta\lambda \approx 26$. Покрытие для диапазона вблизи 171 Å представляло собой многослойную Al/Zr-структуру, пиковый коэффициент отражения и спектральная селективность которой составили $R \approx 56 \%$ и $\lambda/\Delta\lambda \approx 28$, соответственно.

Для диапазона вблизи 304 Å изготовлены как широкополосные зеркала на основе Mo/Si-структур ($\lambda/\Delta\lambda \approx 10$), так и узкополосные зеркала на основе структуры Si/Cr/Mg/B₄C, для которой измеренные характеристики пикового коэффициента отражения и спектральной селективности составили $R \approx 30 \%$ и $\lambda/\Delta\lambda \approx 30$, соответственно.

Точные спектральные характеристики полученных покрытий необходимы для проведения спектроскопической диагностики плазмы солнечной короны по наблюдениям телескопов. Измерение этих параметров было проведено в ФИАН [Вишняков и др., 2009]. Измеренные спектральные характеристики зеркал приведены на рис. 2.

В двух телескопических каналах ТЕСИС многослойная структура использовалась для придания зеркалам асферической формы. Для этого на поверхность подложки зеркала методом магнетронного напыления нанесено многослойное покрытие Cr/Sc с заданным распределением толщины по апертуре [Зуев и др., 2008б].

Для формирования изображений на длине волны $\lambda = 8,42 \text{ \AA}$ в аппаратуре ТЕСИС использовалось кристаллическое фокусирующее зеркало прямоугольной формы $80 \times 100 \text{ мм}$, представляющее собой тонкую (толщиной $0,4 \text{ мм}$) пластину из кристаллического кварца, закрепленную методом оптического контакта на сферической подложке с радиусом кривизны 2700 мм . Пластина кристаллического кварца изготовлена таким образом, что ее рабочая кристаллографическая плоскость $[10.0]$ с $2d = 8,501 \text{ \AA}$ параллельна геометрической поверхности кристалла с высокой точностью (локальное расхождение $\sim 5 \text{ угл.с}$). Подложка зеркала и рабочий кристалл были изготовлены в ФИАН, нанесение кристалла на подложку выполнено в Институте физики микроструктур РАН (ИФМ РАН).

Эффективность отражения зеркала на рабочей длине волны была измерена на синхротронном источнике в Пекине (Китай) [Кузин и др., 2009]. Пиковый коэффициент отражения составил 10% , эффективная площадь зеркала — $2,5 \text{ см}^2$.

Детекторы изображений аппаратуры ТЕСИС изготовлены на основе backside ПЗС-матриц форматом 2048×2048 пикселей. Использовались ПЗС-матрицы ССD42-40 производства фирмы e2v (Англия). Размер одного пикселя ПЗС-матриц составляет $13,5 \text{ мкм}$, размер рабочей поверхности $27,5 \times 27,5 \text{ мм}$. Детекторы, оснащенные 14-битным АЦП, работали в малокадровом режиме. Время накопления изображения (задавалось с Земли) варьировалось от $0,1$ до 600 с . Время считывания изображений определялось скоростью считывания первого пикселя ($\sim 2 \text{ мкс}$) и размером считываемого изображения (для «полных» изображений форматом 2048×2048 пикселей оно составляет $\sim 8 \text{ с}$). Предусматривался режим считывания только части кадра, при котором время считывания уменьшалось пропорционально используемой площади ПЗС.

Детекторы изображений аппаратуры ТЕСИС оснащены однокасадными пельтье-холодильниками. Отвод тепла от детекторов осуществлялся на радиаторы, практически не освещаемые Солнцем.

Измерения абсолютной чувствительности детекторов на рабочих длинах волн были необходимы для точной физической интерпретации регистрируемых изображений и спектров. Такие измерения для длины волны $\lambda = 8,42 \text{ \AA}$ были проведены на синхротронном источнике в Пекине (Китай) [Кузин и др., 2009] и для ВУФ-диапазона 132...304 \AA — на синхротронном источнике в Хэфэе (Китай) [Кузин и др., 2008]. Чувствительность для длины волны $\lambda = 8,42 \text{ \AA}$ составила 31 ед.АЦП/фотон, для ВУФ-диапазона — от 0,01 до 0,1 ед.АЦП/фотон.

В аппаратуре ТЕСИС блокировка мощного видимого света осуществлялась системой входных фильтров и фильтров детекторов. Входные фильтры представляли собой многослойные структуры (Al для диапазонов вблизи 171 и 304 \AA и Zr/Si для 132 \AA , соответственно), нанесенные на поддерживающие сетки. Фильтры детекторов были нанесены непосредственно на рабочие поверхности ПЗС-матриц. Все многослойные фильтры были изготовлены в ИФМ РАН [Зуев и др., 2008a].

Входной фильтр канала на длину волны 8,42 \AA , представляющий собой алюминированный лавсан толщиной 3,8 мкм, был изготовлен в ФИАН.

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

НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО АППАРАТУРЫ ТЕСИС

Телескопы высокого разрешения были предназначены для регистрации изображений солнечной короны в отдельных интервалах ВУФ-диапазона спектра. Спектральные диапазоны подобраны специально для наблюдения структур солнечной атмосферы в широком интервале температур: от переходного слоя (50 тыс. К, линия He II $\lambda \approx 304 \text{ \AA}$) до «спокойной» короны (~ 1 млн К, линия Fe IX $\lambda \approx 171 \text{ \AA}$) и горячей вспышечной плазмы (10...20 млн К, линии Fe XX, XXI, XXIII $\lambda \approx 132 \text{ \AA}$).

В аппаратуре ТЕСИС использовались два независимых канала: первый на длины волн 132 и 171 \AA , второй — 171 и 304 \AA . В первом канале изображение формировалось *одновременно* в двух участках спектра, во втором канале выбор спектрального участка осуществлялся поворотом дополнительной диафрагмы.

Оба телескопа построены по оптической схеме Гершеля, с внеосевыми асферическими зеркалами большой апертуры. Асферизация

зеркал выполнена нанесением на сферические подложки многослойного покрытия с заданным профилем. Сверху на асферизирующие покрытия нанесены многослойные покрытия, селективно отражающие падающее на них излучение в отдельных интервалах ВУФ-диапазона. Принципиальная схема телескопических каналов аппаратуры ТЕСИС приведена на рис. 3.

Первый канал телескопа с диапазонами 132 и 171 Å был предназначен, в основном, для изучения мелкомасштабной структуры и динамики горячей вспышечной плазмы (10...20 млн К) по изображениям в линиях железа Fe XX, XXI, XXIII вблизи $\lambda \approx 132$ Å. Поскольку такая плазма присутствует не на всем диске Солнца, а только в отдельных компактных областях [Zhitnik et al., 2003], то для определения ее положения на солнечном диске использовалось изображение «спокойной» короны, полученное в линиях холодного железа Fe IX вблизи $\lambda \approx 171$ Å.

Второй канал телескопа был предназначен для наблюдения мелкомасштабной структуры и динамики «спокойной» короны (линия Fe IX $\lambda \approx 171$ Å) и переходного слоя (линия He II $\lambda \approx 304$ Å).

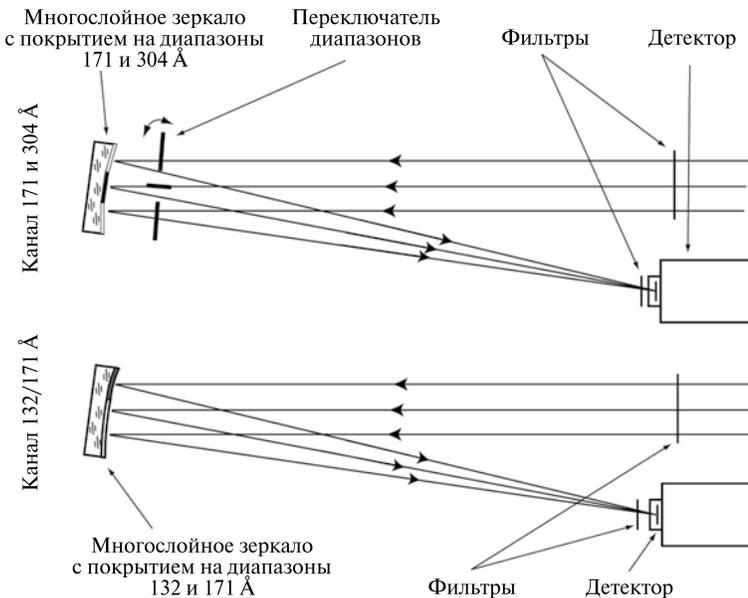


Рис. 3. Оптическая схема телескопов в каналах 132/171 Å; 171 и 304 Å

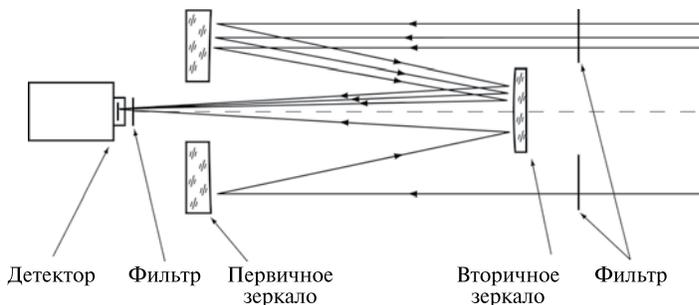


Рис. 4. Оптическая схема телескопа-коронаграфа

В телескопах использовались зеркала нормального падения с апертурой $D = 100$ мм, внеосевой вынос зеркал составлял $h = 110$ мм, фокусное расстояние телескопов — $F = 1630$ мм. Угловой размер одного пиксела составлял $\sim 1,707$ угл. с.

Телескоп-коронаграф широкого поля зрения был предназначен для наблюдения дальней короны Солнца в ВУФ-диапазоне. Телескоп построен по оптической схеме Ричи – Кретьена (рис. 4), с двумя асферическими многослойными зеркалами и детектором изображений на основе backside ПЗС-матрицы. Телескоп имеет поле зрения 2° , первичное зеркало диаметром $D_p = 80/20$ мм (внешний/внутренний диаметр), вторичное зеркало диаметром $D_s = 40$ мм, расстояние между вершинами зеркал $l = 225$ мм, рабочий отрезок $\Delta = 30$ мм (вынос плоскости детектора от первичного зеркала). При такой оптической схеме эффективное фокусное расстояние составляет $F = 600$ мм, угловой размер одного пиксела равняется $4,6$ угл. с.

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

Спектрогелиограф Mg XII был предназначен для регистрации монохроматических изображений солнечной короны в спектральной линии водородоподобного иона Mg XII $\lambda = 8,42 \text{ \AA}$. Излучение этой линии происходит в достаточно горячей (даже по солнечным меркам) плазме с $T > 5$ млн К. Таким образом, монохроматические

изображения позволяют напрямую наблюдать морфологию и динамику горячей плазмы, без введения каких-либо дополнительных предположений об ее локализации и структуре.

Спектрогелиограф Mg XII аппаратуры ТЕСИС является улучшенным аналогом рентгеновского спектрогелиографа спутника «КОРОНАС-Ф», данные которого успешно использовались для исследования вспышечных процессов [Zhitnik et al., 2003; Урнов и др., 2007; Шестов и др., 2010].

Принципиальная оптическая схема спектрогелиографа Mg XII приведена на рис. 5. Входящее излучение проходит предфильтр и попадает на сферически изогнутое кристаллическое зеркало. Падающее излучение дифрагирует на зеркале по закону Брэгга – Вульфа и фокусируется на детекторе. Детектором изображений служит ПЗС-матрица с обратной засветкой. Радиус кривизны зеркала составляет $R_3 = 2710$ мм, рабочая длина волны $\lambda = 8,42$ Å, удвоенное межплоскостное расстояние кристаллического зеркала, $2d$, равно $8,501$ Å. Угол падения в такой схеме составляет $8,2^\circ$, при этом угловой размер одного пиксела составляет $2,1$ угл. с.

По условию дифракции Брэгга – Вульфа, отражение параллельного пучка происходит не на всей поверхности зеркала, а на отдельной полосе, положение и размер которой определяются углом падения пучка и его спектральным составом. Сферическая aberrация, присущая такой схеме, приводит к тому, что фокусировка линий дублета Mg XII $\lambda = 8,419$ и $\lambda = 8,426$ Å происходит в разных точках, что дает возможность разрешать дублет и измерять характеристики отдельных его компонент.

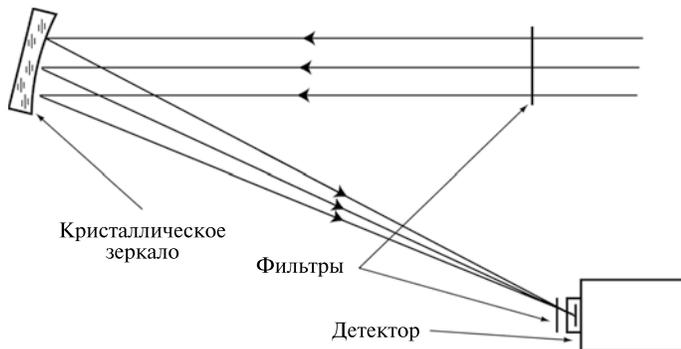


Рис. 5. Оптическая схема спектрогелиографа Mg XII

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

Спектрогелиограф реализован по бесщелевой схеме с дифракционной решеткой скользящего падения (рис. 6). Падающее излучение проходит предфильтр, попадает под малым углом скольжения ($\sim 1,5^\circ$) на дифракционную решетку, дифрагирует, попадет на многослойное Mo/Si-зеркало и фокусируется на детекторе — ПЗС-матрице с фильтром. При такой оптической схеме на детекторе строится последовательность монохроматических изображений Солнца в отдельных спектральных линиях рабочего диапазона, смещенных вдоль направления дисперсии и сжатых в этом направлении (см. рис. 6). В спектрогелиографе использовались дифракционная решетка с плотностью штрихов 3600 линий/мм размерами 80×210 мм, многослойное асферическое зеркало с $F = 600$ мм и световым диаметром $D = 80$ мм. Спектрогелиограф предназначен для работы в диапазоне длин волн $\lambda \sim 280...330$ Å, дисперсия составляет 0,0285 Å/пиксел.

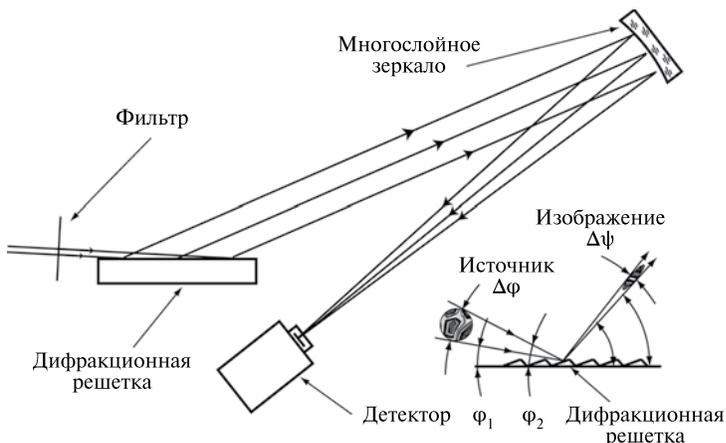


Рис. 6. Оптическая схема спектрогелиографа ВУФ-диапазона. Во врезке справа снизу: ϕ — угол скольжения (дополняет угол падения до 90°), ψ — угол дифракции

ВУФ-спектрогелиограф аппаратуры ТЕСИС является улучшенным вариантом спектрогелиографа 280...330 Å, работавшего на спутнике «КОРОНАС-Ф» [Бейгман и др., 2005]. Благодаря оригинальной оптической схеме спектрогелиографов и программам наблюдений, спектрогелиографами на спутнике «КОРОНАС-Ф» было зарегистрировано более 100 спектров вспышек, в том числе более 30 спектров мощнейших солнечных вспышек балла X. Эти наблюдения использовались для составления каталогов спектральных линий [Бейгман и др., 2005; Шестов и др., 2008], определения плотности плазмы и температурного состава в активных областях и вспышках [Шестов и др., 2009; Шестов и др., 2010].

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

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

Ниже на примере конкретных наблюдений демонстрируются возможности научной аппаратуры ТЕСИС.

На рис. 7 приведен фрагмент изображения телескопа на 171 Å, зарегистрированного 5 марта 2009 г. в 17:32 UT с временем экспозиции $t = 10$ с. На изображении видны структуры, отстоящие друг от друга на расстояние ~ 3 пиксела.

Временное разрешение телескопов определялось системой считывания изображений с ПЗС-матриц. При регистрации полного кадра 2048×2048 пикселей время считывания данных составляло ~ 8 с. Предусматривалась работа аппаратуры в режиме регистрации выбранной части кадра. При этом временное разрешение сокращалось пропорционально площади считываемого кадра. Такие режимы работы обычно используются во время проведения целевых наблюдений — наблюдений отдельных локальных структур (активных областей, корональных дыр, спикул в полярных областях и др.). Были проведены серии «быстрых» наблюдений, с временным разрешением около 4 с и длительностью одной серии около 1 ч. На рис. 8а приведено изображение Солнца, на котором отмечены две яркие области, наблюдавшиеся 2 октября 2009 г. с большим временным разрешением в рамках целевой программы. На рис. 8б приведен вре-

менной профиль интенсивностей этих областей, измеренный с 13:58 до 14:15 UT.

Высокая чувствительность телескопов, обусловленная применением зеркал большой апертуры, высокоэффективных многослойных покрытий и детекторов с большой чувствительностью, позволила впервые наблюдать корональные структуры на больших ($R > 1$) расстояниях от поверхности Солнца. На рис. 9 показано изображение солнечной короны каналом 171 \AA , составленное из трех изображений с временами экспозиции 1; 3 и 100 с. Изображения были зарегистрированы 5 мая 2009 г. около 01:40 UT. На составном изображении виден выброс корональной массы на расстоянии $\sim 1R$.

На рис. 10 (слева) приведен пример изображения, зарегистрированного спектрогелиографом Mg XII 9 мая 2009 г. в 13:58 с временем экспозиции 100 с. На этом же рисунке (справа) приведено изображение, зарегистрированное ВУФ-телескопом 132/171 \AA аппаратуры ТЕСИС в это же время, с временем экспозиции 1 с. На телескопическом изображении присутствуют две области с повышенной активностью. Излучение линии Mg XII $\lambda = 8,42 \text{ \AA}$ происходит только в одной области, что свидетельствует о существенном отличии плазмы в ярких областях. Яркая область, присутствующая на изображении Mg XII, содержит большое количество горячей плазмы ($T \sim 10 \text{ MK}$).

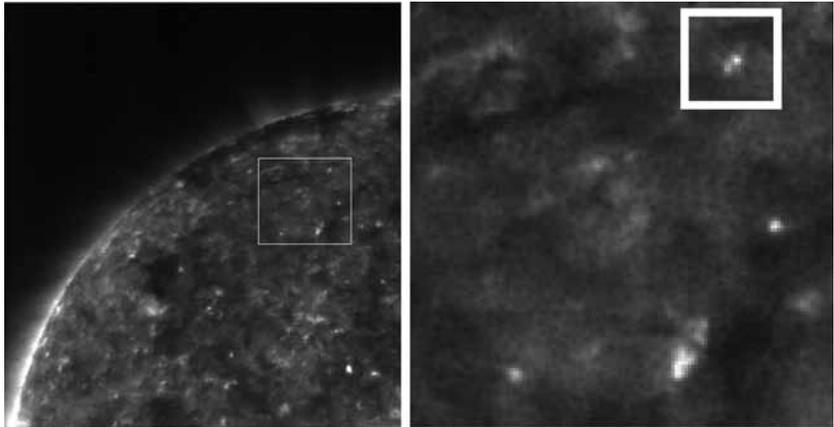


Рис. 7. Фрагмент изображения Солнца, полученного каналом 171 \AA прибора ТЕСИС, демонстрирующий пространственное разрешение аппаратуры. Слева — фрагмент полного изображения Солнца. Выделенная квадратная область приведена справа. На ней отмечены хорошо различимые две яркие точки, отстоящие друг от друга на расстояние 3,6 пикселей (6 угл. с)

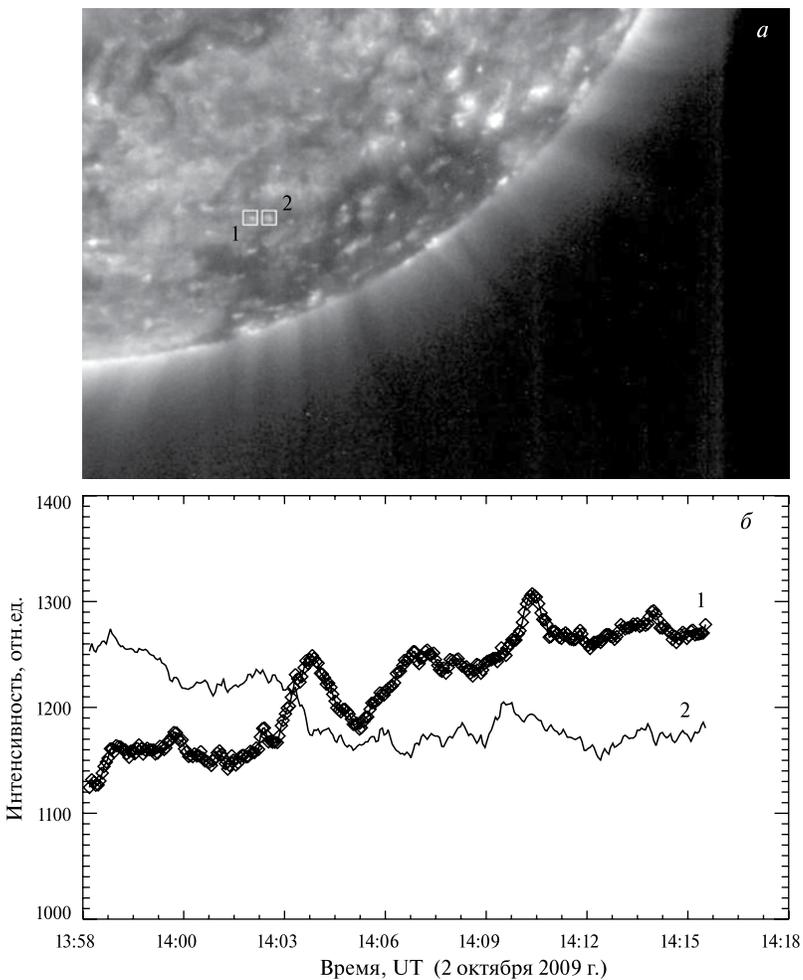


Рис. 8. Изображение Солнца, полученное каналом 171 \AA аппаратуры ТЕСИС в ходе программы наблюдений 2 октября 2009 г. ярких областей с большим временным разрешением. Отмечены исследовавшиеся яркие области 1 и 2 (а); временные профили интенсивности области 1 (линия 1) и области 2 (линия 2) (б)

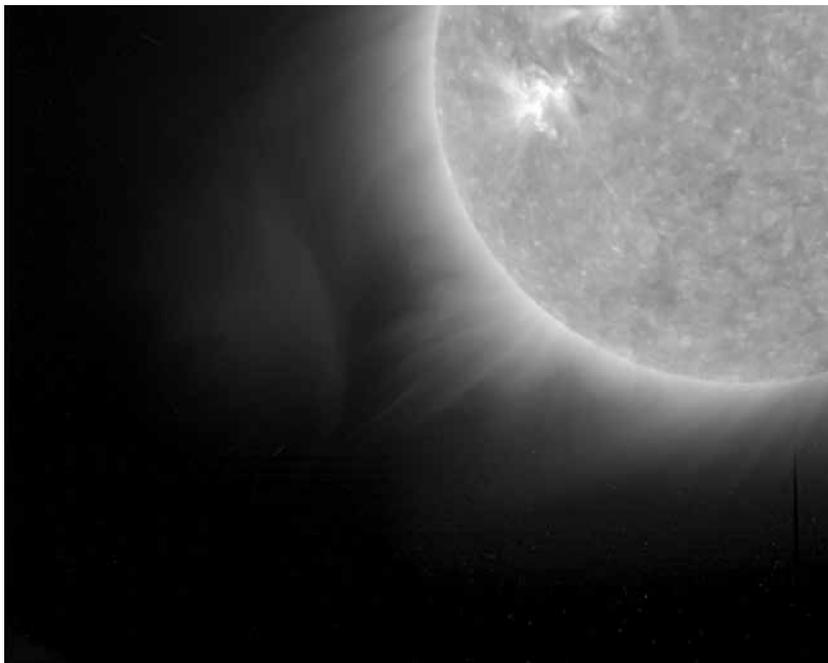


Рис. 9. Составное изображение солнечной короны вблизи 171 \AA , созданное на основе трех изображений с экспозициями 1, 3 и 100 с (по данным наблюдений канала 171 \AA прибора ТЕСИС 5 мая 2009 г.)

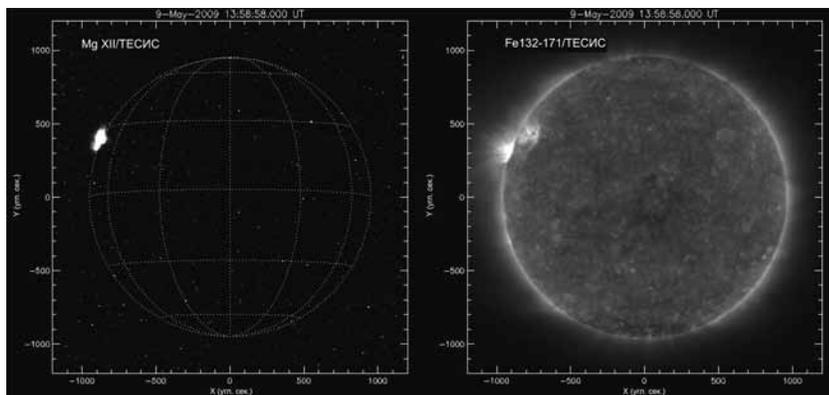


Рис. 10. Изображение солнечной короны в линии $\lambda \approx 8,42 \text{ \AA}$, полученное спектрогелиографом Mg XII (слева) и ВУФ-телескопом 132/171 Å (справа)

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

Литература

- [Бейгман и др., 2005] *Бейгман И. Л., Боженков С. А., Житник И. А., Кузин С. В.* и др. Солнечные спектры крайнего ВУФ-диапазона, полученные в ходе эксперимента СПИРИТ на борту ОС «КОРОНАС-Ф». Каталог линий в области 280–330 Å // Письма в Астроном. журн. 2005. Т. 31. № 1. С. 39–58.
- [Вишняков и др., 2009] *Вишняков Е. А., Медников К. Н., Рагозин Е. Н., Рева А. А.* и др. Измерение спектров отражения многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области спектра при помощи широкополосного лазерно-плазменного источника излучения // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 5. С. 474–480.
- [Зуев и др., 2008а] *Зуев С. Ю., Клюенков Е. Б., Кожевникова З. Л., Лопатин А. Я.* и др. Многослойные тонкопленочные фильтры экстремально-ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов // Рабочее совещание «Рентгеновская оптика – 2008». Черногоровка, 2008: Сб. тез. докл. Черногоровка, 2008. С. 47–49.
- [Зуев и др., 2008б] *Зуев С. Ю., Кузин С. В., Лопатин А. Я., Лучин В. И.* и др. Многослойная оптика для рентгеновской астрофизики в рамках эксперимента ТЕСИС // Рабочее совещание «Рентгеновская оптика – 2008». Черногоровка, 2008: Сб. тез. докл. Черногоровка, 2008. С. 50–52.
- [Кузин и др., 2008] *Кузин С. В., Шестов С. В., Перцов А. А., Рева А. А.* и др. Спектральные калибровки фильтров и детекторов солнечного телескопа на диапазон 13,2 нм проекта ТЕСИС // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008. № 7. С. 19–23.
- [Кузин и др., 2009] *Кузин С. В., Шестов С. В., Перцов А. А., Рева А. А.* и др. Калибровки рентгеновского спектрогелиографа на длину волны 0,84 нм проекта ТЕСИС // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 7. С. 51–54.
- [Ораевский, Собельман, 2002] *Ораевский В. Н., Собельман И. И.* Комплексные исследования активности Солнца на спутнике «КОРОНАС-Ф» // Письма в Астроном. журн. 2002. Т. 28. № 6. С. 457–467.
- [Собельман и др., 1996] *Собельман И. И., Житник И. А., Игнатьев А. П., Корнеев В. В.* и др. Рентгеновская спектроскопия Солнца в области 0,84...30,4 нм в экспериментах ТЕРЕК-К и РЕС-К на спутнике «КОРОНАС-И» // Астроном. журн. 1996. № 7. С. 604–619.
- [Урнов и др., 2007] *Урнов А. М., Шестов С. В., Богачев С. А., Горяев Ф. Ф.* и др. О пространственно-временных характеристиках и механизмах образования мягкого рентгеновского излучения в солнечной короне // Письма в Астроном. журн. 2007. Т. 33. № 6. С. 446–462.

- [Шестов и др., 2008] *Шестов С. В., Боженков С. А., Житник И. А., Кузин С. В.* и др. Солнечные спектры крайнего ВУФ-диапазона, полученные в ходе эксперимента СПИРИТ на борту ОС «КОРОНАС-Ф». Каталог линий в области 176...207 Å // Письма в Астроном. журн. 2008. Т. 34. № 1. С. 38–57.
- [Шестов и др., 2009] *Шестов С. В., Урнов А. М., Кузин С. В., Житник И. А.* и др. Диагностика электронной плотности плазмы структур солнечной короны по линиям ионов Fe XI – Fe XIII диапазона 176...207 Å в эксперименте СПИРИТ/«КОРОНАС-Ф» // Письма в Астроном. журн. 2009. Т. 35. № 1. С. 50–62.
- [Шестов и др., 2010] *Шестов С. В., Кузин С. В., Урнов А. М., Ульянов А. С.* и др. Диагностика температуры солнечной плазмы во вспышках и активных областях по линиям спектрального диапазона 280...330 Å в эксперименте СПИРИТ/ «КОРОНАС-Ф» // Письма в Астроном. журн. 2010. Т. 36. № 1. С. 46–60.
- [Kotov, 2004] *Kotov Yu. D.* Satellite project CORONAS-PHOTON for study of solar hard radiation // 35th COSPAR scientific assembly. Held 18–25 July, 2004. Paris, France. P. 1283.
- [Sylwester et al., 2008] *Sylwester J., Kuzin S. V., Kotov Yu. D., Farnik F. Reale F.* SphinX: A Fast Solar Photometer in X-rays // J. Astrophysics and Astronomy. 2008. V. 29. P. 339–343.
- [Zhitnik et al., 2003] *Zhitnik I. A., Bugaenko O. I., Ignat'ev A. P., Krutov V. V.* et al. // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2003. V. 338. P. 67–71.

**TESIS EXPERIMENT ABOARD
CORONAS-PHOTON SATELLITE**

**S. V. Kuzin¹, I. A. Zhitnik¹, S. V. Shestov¹, S. A. Bogachev¹,
O. I. Bugaenko², A. P. Ignatiev¹, A. A. Perzov¹, A. S. Ulianov¹,
A. A. Reva¹, V. A. Slemzin¹, N. K. Suhodrev¹, Yu. S. Ivanov¹,
A. L. Goncharov¹, A. V. Mitrofanov¹, S. G. Popova¹,
T. A. Shergina¹, V. A. Soloviev¹, S. N. Oparin¹, M. S. Zykov¹,
V. I. Luchin³, V. N. Polkovnikov³, N. N. Salaschenko³,
N. N. Tsibin³**

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

² *P. K. Sternberg State Astronomical Institute MSU, Moscow*

³ *Institute for Physics of Microstructures
of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

In January 2009 Russian scientific satellite CORONAS-Photon has been successfully launched. Among the scientific instrumentation

there was a complex of instrumentation TESIS. TESIS incorporates telescopes and spectroheliographs for the X-ray and EUV observation of solar corona with high spatial, spectral and temporal resolutions for the heights from transition region up to 3 solar radii. In the present paper main characteristics and results of the observations are given.

Keywords: solar corona, extreme ultraviolet, soft X-ray, EUV emission of the solar corona, space-born instrumentation.

-
- Kuzin Sergey Vadimovich** — head of laboratory, PhD, e-mail: kuzin@sci.lebedev.ru.
Zhitnik Igor Alexandrovich — chief researcher, PhD, e-mail: zhitnik@sci.lebedev.ru.
Shestov Sergey Viktorovich — associate researcher, e-mail: sshestov@dgap.mipt.ru.
Bogachev Sergey Alexandrovich — senior researcher, PhD, e-mail: bogachev@sci.lebedev.ru.
Bugaenko Oleg Illarionovich — senior designer, e-mail: bugaenko@sci.lebedev.ru.
Ignatiev Alexander Petrovich — senior researcher, PhD, e-mail: ignatyev@sci.lebedev.ru.
Perzov Andrey Alexandrovich — senior researcher, PhD, e-mail: perzov@sci.lebedev.ru.
Ulianov Artem Sergeevich — student, e-mail: ikiru@inbox.ru.
Reva Anton Alexandrovich — student, e-mail: antonreva@gmail.com.
Slemzin Vladimir Alexeevich — chief researcher, PhD, e-mail: slem@sci.lebedev.ru.
Suhodrev Nina Kuzminichna — senior researcher, PhD, e-mail: suhodrev@sci.lebedev.ru.
Ivanov Yuri Sergeevich — senior designer, e-mail: yivanov@sci.lebedev.ru.
Goncharov Alexander Leonidovich — engineer.
Mitrofanov Alexander Viktorovich — senior researcher, PhD, e-mail: mitrofa@sci.lebedev.ru.
Popova Svetlana Gennadievna — engineer, e-mail: pgss@mail.ru.
Shergina Tatyana Alexeevna — technician.
Soloviev Vladimir Alexeevich — leading electronics.
Oparin Sergey Nikolaevich — researcher, e-mail: oparin@sci.lebedev.ru.
Zykov Mihail Sergeevich — postgraduate student, e-mail: zmsmihail@gmail.com.
Luchin Valerii Ivanovich — chief researcher, PhD.
Polkovnikov Vladimir Nikolaevich — junior researcher, e-mail: kiniokop@rambler.ru.
Salaschenko Nikolai Nikolaevich — head of department, PhD, corresponding member of RAS, e-mail: salashch@ipm.sci-nnov.ru.
Tsibin Nikolai Nikolaevich — junior researcher, e-mail: tsybinl@mail.ru.

**РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ТЕСИС НА СПУТНИКЕ
«КОРОНАС-ФОТОН»**

**С. В. Кузин, С. В. Шестов, С. А. Богачев, А. А. Перцов,
А. С. Ульянов, А. А. Рева**

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

В январе 2009 г. произведен успешный запуск космического аппарата «КОРОНАС-Фотон». В его состав входил комплекс аппаратуры ТЕСИС, предназначенный для получения изображений и спектрогелиограмм солнечной короны в мягком рентгеновском и вакуумном ультрафиолетовом диапазонах спектра. Приводится описание системы электроники аппаратуры ТЕСИС, обсуждаются принципы составления программ управления аппаратурой, описываются особенности регистрируемых изображений и алгоритмы для их первичной обработки.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ (проекты № 08-02-01301-а и 08-02-13633-офи_ц), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН (№ 16, часть 3), Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Плазменные процессы в Солнечной системе», гранта № 218816 (проект SOTERIA, www.soteria.eu) седьмой рамочной программы Европейского Союза (FP07/2007-2013).

Ключевые слова: корона Солнца, вакуумный ультрафиолет, мягкий рентген, коротковолновое излучение солнечной короны, космические телескопы, изображения короны Солнца.

Введение

Исследование солнечной короны чрезвычайно важно с точки зрения решения фундаментальных задач физики Солнца и астрофизики.

Кузин Сергей Владимирович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук. E-mail: kuzin@sci.lebedev.ru

Шестов Сергей Викторович — старший научный сотрудник, e-mail: sshestov@gmail.ru

Богачев Сергей Александрович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: bogachev@sci.lebedev.ru

Перцов Андрей Александрович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: perzov@sci.lebedev.ru

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

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

Ключевые проблемы — нагрев короны, механизмы солнечных вспышек, формирование и ускорение солнечного ветра — до сих пор не решены. Кроме того, межпланетная среда в основном формируется за счет процессов, происходящих в солнечной короне, поэтому их изучение важно и с прикладной точки зрения. Солнечные вспышки и сопровождающие их повышенные потоки ионизирующего излучения и заряженных частиц, выбросы коронального вещества, потоки солнечного ветра — все эти явления обуславливают космическую погоду в околоземном пространстве.

Для решения этих задач в начале 1990-х гг. была сформирована программа исследования солнечной активности с борта спутников «КОРОНАС». В 1994 г. был выведен на орбиту первый спутник этой серии — «КОРОНАС-И» [Собельман и др., 1996], а в 2001 г. — «КОРОНАС-Ф» [Ораевский, Собельман, 2002]. 30 января 2009 г. на орбиту Земли был выведен третий спутник программы КОРОНАС — космический аппарат «КОРОНАС-Фотон» [Kotov, 2004]. Для космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» в ФИАН был разработан новый комплекс космических телескопов и спектрометров ТЕСИС [Кузин и др., 2010]. В аппаратуре ТЕСИС реализовывался апробированный на предыдущих спутниках серии «КОРОНАС» метод изображающей спектроскопии Солнца, который заключался в регистрации полного диска Солнца с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением.

За время проведения эксперимента ТЕСИС был получен огромный наблюдательный материал — изображения и спектрогелиограммы Солнца в мягкой рентгеновской (МР) и вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) областях спектра. Получены уникальные данные о состоянии короны Солнца и ее активных процессах в период глубокого минимума солнечной активности — весна-осень 2009 г.

Подробное описание аппаратуры ТЕСИС и основные результаты наблюдений приведены в статье Кузин С. В. и др. «Эксперимент ТЕСИС космического аппарата „КОРОНАС-Фотон”» настоящего сборника. В данной статье рассматриваются система электроники аппаратуры, принципы составления программ управления аппаратурой, режимы работы и описываются особенности изображений, регистрировавшихся телескопами и спектрогелиографами ТЕСИС.

АППАРАТУРА ТЕСИС

Комплекс телескопов и спектрогелиографов ТЕСИС [Кузин и др., 2010, 2011] разработан в ФИАН для спутника «КОРОНАС-Фотон».

В задачи эксперимента ТЕСИС входили: исследование плазмы солнечной короны — ее мелкомасштабной структуры, динамики, физических условий в плазме (температуры, плотности); изучение локальных и глобальных явлений и структур: вспышек, горячих облаков, активных областей, выбросов корональной массы и т. д. Комплекс приборов ТЕСИС состоял из телескопов и изображающих спектрографов — спектрогелиографов, и позволил проводить наблюдения солнечной короны различных типов: наблюдать мелкомасштабную структуру (с пространственным разрешением до 1,7 угл. с) плазмы, динамику с временным (до 1 с) разрешением, крупномасштабные структуры на больших расстояниях от поверхности Солнца (до трех радиусов), проводить наблюдения отдельных структур с высоким спектральным разрешением (до 0,01 Å) в широком спектральном диапазоне и наблюдения других типов.

В состав аппаратуры входили шесть независимых приборов (каналов регистрации), предназначенных для телескопических и спектроскопических наблюдений солнечной короны в МР- и ВУФ-диапазонах спектра.

Конструктивно аппаратура ТЕСИС состояла из трех блоков: блока датчиков (БД), блока электроники (БЭ) и блока оптических датчиков (ОД). Блок датчиков являлся основным блоком, содержащим научную аппаратуру для регистрации солнечных изображений и спектров. Блок электроники включал бортовой компьютер и электронные интерфейсы для подключения БД и ОД, а также связи со служебными системами спутника. Блок оптических датчиков представлял собой два соосных противонаправленных телескопа, с осью визирования, перпендикулярной оси на Солнце, и служил для определения текущей ориентации аппаратуры ТЕСИС и спутника «КОРОНАС-Фотон».

Управление комплексом приборов ТЕСИС осуществлялось по программам, передаваемым с Земли. Программы управления содержали последовательность команд — указаний зарегистрировать кадр в том или ином канале регистрации ТЕСИС в заданное время с заданным временем экспозиции. Зарегистрированные изображения упаковывались в файлы телеметрии и передавались на Землю во время сеансов связи. После поступления наблюдательных данных в ФИАН файлы телеметрии распаковывались и изображения сохранялись в базе данных эксперимента ТЕСИС. Каждый файл содержал одно изображение. Такие файлы называются файлами нулевого уровня — кроме распаковки они не подвергаются никакой дополнительной обработке. К первичной обработке можно отнести учет фона на изображениях, коррекцию функции белого поля, точное определение сетки солнечных координат и др.

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОНИКИ АППАРАТУРЫ ТЕСИС

Аппаратура ТЕСИС включала комплексную систему электроники, куда входили бортовой компьютер, контроллеры детекторов и двигателей, интерфейсы для коммутации со служебными системами спутника, вторичные источники питания и др. Бортовой компьютер, основными элементами которого являются центральный процессор, оперативная память и интерфейсы коммутации, располагался в БЭ ТЕСИС и находился в гермоотсеке спутника. Блок датчиков и оптические датчики аппаратуры ТЕСИС содержали детекторы изображений вместе с контроллерами, контроллеры приводов и датчики температуры.

Бортовой компьютер ТЕСИС предназначался для управления каналами регистрации, механикой и приводами ТЕСИС, обработки, временного хранения и передачи на ССРНИ (Система сбора и регистрации научной информации) полученной информации. В качестве его основного процессора применялся цифровой сигнальный процессор (DSP) ADSP2185 фирмы AnalogDevices с быстродействием 64 Mips. Однократно программируемое ПЗУ емкостью 2 КБ содержало так называемый VOIS — минимальный набор системного программного обеспечения (ПО), предназначенного для взаимодействия с бортовыми системами. Для программ оперативного управления в аппаратуре ТЕСИС использовалось многократно программируемое ПЗУ емкостью 128 КБ. Большой объем ПЗУ позволял хранить в памяти четыре копии программного обеспечения или даже четыре различных экземпляра рабочих программ, которые могут быть выбраны по команде с Земли. Основная память ТЕСИС, объемом 256 МБ, предназначена для приема информации с ПЗС-матриц и детекторов канала «Сфинкс» и обработки полученной информации, а также может служить буфером при передаче накопленных данных в ССРНИ.

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

Связь между бортовым компьютером ТЕСИС и периферией, расположенной в БД и ОД, осуществлялась по последовательным каналам связи с пропускной способностью 8 МБ/с. Быстродействие центрального процессора ТЕСИС и использованная архитектура позволяли работать одновременно и независимо всем периферийным устройствам (детекторам, двигателям и др.).

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

УПРАВЛЕНИЕ ПРИБОРОМ ТЕСИС

Управление прибором ТЕСИС осуществлялось командами, поступающими с Земли на борт во время сеансов связи. Передаваемые в прибор команды организовывались в виде последовательности, которая образовывала законченную программу — циклограмму. Отдельно взятая команда представляла собой набор байтов (число от 0 до 255), исполняемых последовательно. В зависимости от назначения команды, она могла иметь произвольную длину. В целом алфавит команд ТЕСИС был организован так, чтобы наиболее употребляемые команды состояли всего из 1 байта. Так, для формирования изображения в канале 304 Å с экспозицией 1 с достаточно было передать в прибор одно шестнадцатеричное число '4A'. Это позволяло значительно сократить объем команд управления.

Переданная циклограмма могла быть исполнена сразу после поступления с Земли либо передана в прибор с задержкой в несколько часов и даже дней. Буфером, в котором циклограмма хранилась до выдачи в прибор, служила бортовая управляющая машина спутника. На практике основным режимом для научных программ наблюдения являлась выдача циклограммы в заданное время. Режим прямой передачи команд в прибор применялся при перепрограммировании прибора. Поскольку бортовая машина выдавала в ТЕСИС в заданное время сразу всю хранящуюся в памяти циклограмму, возникала проблема организации команд по времени внутри самого прибора. Для этого в ТЕСИС использовались команды разметки времени: «исполнить следующую команду через заданное время после предыдущей» и «исполнить следующую команду в заданное время». Время ожидания в командах первого типа — в диапазоне от 0,1 с до 255 мин; время исполнения в командах второго типа — в пределах одного месяца. Также предусмотрены, но практически редко использовались, команды «исполнить следующую команду через заданное время после сигнала СВЕТ» и «исполнить следующую команду через заданное время после сигнала ВШИР». Сигнал СВЕТ поступал в прибор при выходе спутника на освещенный участок орбиты, а сигнал ВШИР — при заходе спутника в радиационные пояса Земли. В целом, существующий набор разметки по времени позволял сформировать любой график исполнения команд.

Кроме основных управляющих команд, в алфавит команд ТЕСИС также входили команды организации циклов (LOOP, ENDLOOP). Число повторов цикла — от 1 до 255, а допустимый уровень вложенности циклов друг в друга — 8. Внутренняя память ТЕСИС позволяла хранить на борту до 128 циклограмм объемом до 256 байт каждая. Циклограммы вызывались специальной командой из алфавита ТЕСИС, после чего исполнялись таким же образом, что и программы, поступившие с Земли. На практике было задействовано около 30 готовых бортовых циклограмм.

Частота управления ТЕСИС составляла в среднем один сеанс связи за двое суток. Так, за первый год работы прибора ТЕСИС — с 20 февраля по 1 декабря 2009 г. — было использовано 165 сеансов связи, в которых на борт было передано около 700 программ управления. В целом, потребность комплекса телескопов в управлении можно оценить как весьма высокую.

По состоянию на январь 2010 г. алфавит ТЕСИС включал 71 команду, позволяющую контролировать все режимы работы аппаратуры. Из них 68 команд присутствовали на момент запуска, а три было добавлено в ходе первого года эксперимента.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТЕСИС

Режим работы аппаратуры ТЕСИС определялся следующими основными факторами: выбранные каналы регистрации изображений, частота получения изображений, формат изображения и метод сжатия изображения. Очевидно, что оптимальным является режим работы прибора, когда все его каналы работают с максимальной частотой и получают изображения полного формата с наилучшим пространственным разрешением. Однако такая идеализированная ситуация невозможна на практике, прежде всего из-за ограничений на телеметрию.

С точки зрения выбора каналов регистрации изображений режимы работы ТЕСИС делились на синоптические и научные. В синоптическом режиме работы задействовалось максимальное число каналов, но с ограниченной частотой съемки. С учетом ограничений на ежедневный объем телеметрии (~0,5 ГБ), временное разрешение синоптических программ ТЕСИС составляло около 5...10 мин. Целью синоптических программ являлся мониторинг атмосферы Солнца (главным образом, вспышечных и взрывных процессов).

Альтернативой синоптическим являлись целевые научные программы наблюдений, когда основное наблюдение осуществлялось в 1–2 каналах ТЕСИС. Выбор каналов зависел от конкретной научной задачи. В частности, в программе исследования высокотем-

пературной плазмы были задействованы каналы ТЕСИС Fe XXIII 132 Å и Mg XII 8,42 Å, изображение в которых формировалось при температурах плазмы 5...20 МК. Использование ограниченного числа каналов позволяет улучшить временное разрешение наблюдений до 1...5 мин.

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

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

С точки зрения формата изображения, в ходе эксперимента ТЕСИС применялись два основных режима: получения полного кадра и частичного кадра. Во втором случае, благодаря уменьшению объема получаемых изображений, удавалось существенно увеличить количество регистрируемых кадров и уменьшить время, требуемое для регистрации одного кадра.

Режим наблюдения полного диска Солнца являлся основным режимом синоптических программ наблюдения, а также применялся при исследовании выбросов массы, гигантских эруптивных протуберанцев и других явлений, имеющих глобальный характер. Режим наблюдения частичного кадра позволял значительно увеличить число получаемых изображений (в рамках заданного лимита телеметрии), поэтому активно применялся в целевых научных программах. Кроме того, в режиме частичного кадра значительно ускорялось время обработки изображения, что позволяло достигать высокого и сверхвысокого временного разрешения. Основные цели исследования в этом режиме ТЕСИС — объекты и явления на Солнце, размер которых порядка и меньше одного радиуса Солнца: солнечные активные области и группы областей, вспышки, яркие точки, системы корональных петель, спиккулы и высокотемпературные источники излучения.

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Как указывалось выше, во время подготовки эксперимента ТЕСИС в бортовое программное обеспечение аппаратуры было заложено два

метода регистрации изображений: регистрация полного кадра и частичного кадра. Оба варианта предполагали использование входных шторок телескопов. В этих режимах при регистрации выполнялось открытие шторок, затем происходила чистка матрицы, проводилась нужная экспозиция, шторки закрывались и изображение считывалось с ПЗС-матрицы.

Основные особенности регистрации полного кадра заключались в следующем: во время чистки изображение построчно сдвигалось вверх в сторону выходной строки. Вновь образующиеся нижние строки не имели полезного светового сигнала (за исключением так называемого смаза, рассматриваемого далее) — т. е. очищались. При считывании данных с ПЗС-матрицы изображение построчно сдвигалось в выходную строку, откуда каждая строка сдвигалась по пиксельно в выходной регистр, где происходила оцифровка сигнала (рис. 1а). Скорость сдвига строки составляла 150 мкс, время сдвига и чтения одного пиксела — 2 мкс.

Регистрация частичного кадра $[X_0:X_1, Y_0:Y_1]$ (рис. 1б) выполнялась, в целом, аналогично полному кадру, отличие заключалось в том, что не происходило считывания данных из строк матрицы с номерами менее Y_0 и более Y_1 . Так как построчный сдвиг выполнялся существенно быстрее попиксельного считывания (150 мкс при сдвиге строки против $150+4096$ мкс при чтении строки), регистрация частичного кадра обычно проходила существенно быстрее полного за счет отбрасывания «ненужных» строк.

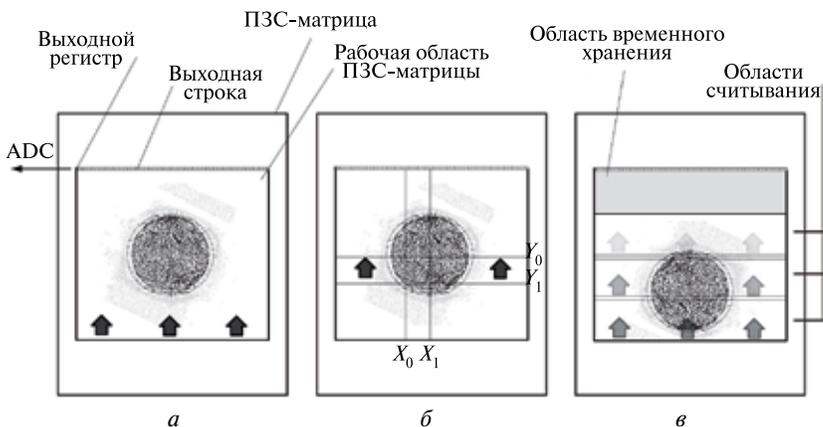


Рис. 1. Методы регистрации изображений аппаратурой ТЕСИС: а — полный кадр целиком; б — частичный кадр; в — полный кадр по частям

В ходе проведения эксперимента ТЕСИС в целях сохранения ресурса входных шторок был предложен и отработан метод регистрации полных изображений по частям. Изображение Солнца перефокусировкой зеркала сдвигалось к дальнему относительно выходной строки краю матрицы (рис. 1в). При такой конфигурации зона матрицы, прилегающая к выходной строке, практически не засвечивалась излучением Солнца и могла использоваться как буфер считывания. Входные шторки аппаратуры были постоянно открыты. При регистрации полного кадра по частям последовательно проводились экспозиции и регистрировались отдельные участки матрицы, обозначенные на рис. 1в прямоугольниками. При считывании отдельно взятой прямоугольной области она сначала быстро сдвигалась вверх в область временного хранения и затем медленно считывалось изображение этой области (алгоритм полностью соответствует частичному кадру). Зарегистрированные таким образом изображения после передачи на Землю сшивались. В режиме регистрации полных кадров по частям аппаратура ТЕСИС работала с июля 2009 г. Области считывания для последующего совмещения полученных частей перекладывались между собой.

ОСОБЕННОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕСИС

Всем изображениям, получаемым ТЕСИС, присущ ряд артефактов. Сюда входят темновой ток, белое поле, смаз (связанный с особенностью работы входных шторок и ПЗС-матриц аппаратуры), повреждение кадра, вызванные попаданием космических частиц. Недостаточная точность стабилизации спутника приводила также к тому, что отдельно взятые изображения Солнца имели случайное смещение и поворот по отношению к ПЗС-матрице. Многие из таких недостатков можно было устранить методами последующей компьютерной обработки изображений.

Рассмотрим особенности изображений более подробно.

Темновой ток матрицы вызван генерацией электрон-дырочных пар в ячейках матрицы при отсутствии падающего излучения. Темновой ток экспоненциально увеличивался с ростом температуры ПЗС-матрицы, поэтому часто ПЗС-матрицы во время работы охлаждались. ПЗС-матрицы аппаратуры ТЕСИС оснащены пельтье-холодильниками. Во время проведения эксперимента ТЕСИС было установлено, что темновой ток с хорошей точностью устраняется при последующей наземной обработке изображений.

Белым полем называется отклик ПЗС-матрицы на «единичный» сигнал — пучок света с единичной интенсивностью по всему сечению

и покрывающий всю ПЗС-матрицу. Отличие белого поля от единицы может быть вызвано неравномерностью как чувствительности ПЗС-матрицы по площади, так и нанесенных фильтров.

Для определения функций белого поля в каналах аппаратуры ТЕСИС были проведены специальные программы наблюдений, в результате которых составлены соответствующие корректирующие функции. Рассчитанные функции белого поля для телескопических каналов аппаратуры ТЕСИС приведены на рис. 2. Сравнение исходного изображения Солнца телескопа на 171 \AA и этого же изображения, со скорректированным белым полем, приведено на рис. 3.

Смаз в изображениях ТЕСИС вызван особенностью работы системы считывания изображений с ПЗС-матриц и работы входных шторок. Регистрация изображений на матрицу происходила следующим образом:

- открытие шторок;
- «чистка» матрицы — последовательный сдвиг строк к выходной строке со скоростью 150 мкс/стр ;
- экспонирование изображения;
- закрытие шторок;
- чтение изображения.

Так как чистка матрицы происходила после открытия шторок, то во время чистки по вновь получаемому изображению как бы «проводилось» сфокусированное изображение Солнца (рис. 4.). Эффективная экспозиция при такой чистке матрицы (до $0,3 \text{ с}$) обычно меньше, чем время реальной экспозиции ($1 \dots 10 \text{ с}$). Это позволило разработать алгоритмы для удаления смаза по рабочему изображению.

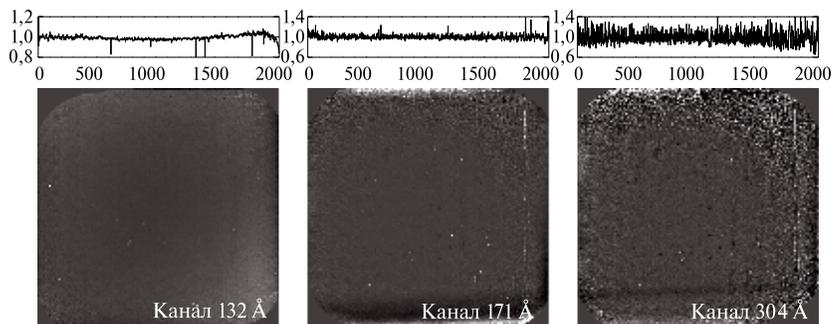


Рис. 2. Функции белого поля для телескопических каналов аппаратуры ТЕСИС. Сверху над изображениями приведен профиль интенсивности по центральной строке

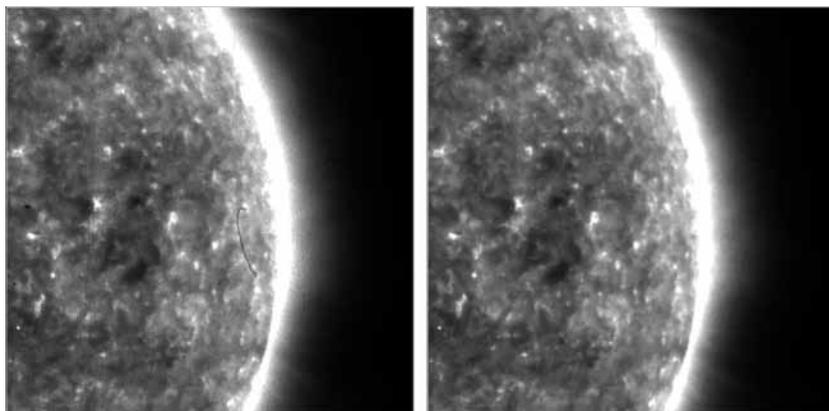


Рис. 3. Пример эффекта белого поля на изображении канала 171 Å: слева — белое поле не скорректировано; справа — скорректировано

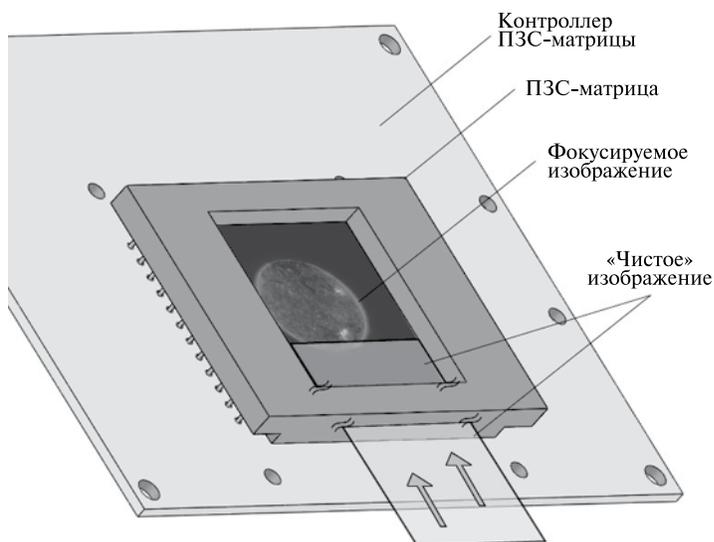


Рис. 4. Механизм формирования смаза на изображениях во время «чистки»

Рассеянный свет проявлялся в виде ярких полос по краям ПЗС-матрицы. Такая засветка объясняется меньшей толщиной фокальных рентгеновских фильтров по краям ПЗС-матрицы (что обусловлено технологией нанесения фильтров). Проявление рассеянного

света на краях матрицы не вносило существенного вклада в сигнал, создаваемый излучением короны Солнца.

Для обработки файлов нулевого уровня (как первичной, так и последующей научной) в работе использовался высокоуровневый язык программирования IDL. Разработан пакет программ TES_PREP, реализующий в автоматическом режиме первичную обработку кадров — удаление темнового тока, смаза, коррекция белого поля, определение центра Солнца на изображениях и пр.

Сравнение кадра нулевого уровня и кадра после первичной обработки программами TES_PREP для канала 171 \AA приведено на рис. 5. На рисунке сверху слева приведен исходный кадр (логарифмическая шкала интенсивностей, ярко выражен слабый сигнал), отмечено место смаза, темнового сигнала. Сверху справа на рис. 5 приведен этот же кадр со скорректированными темновым током,

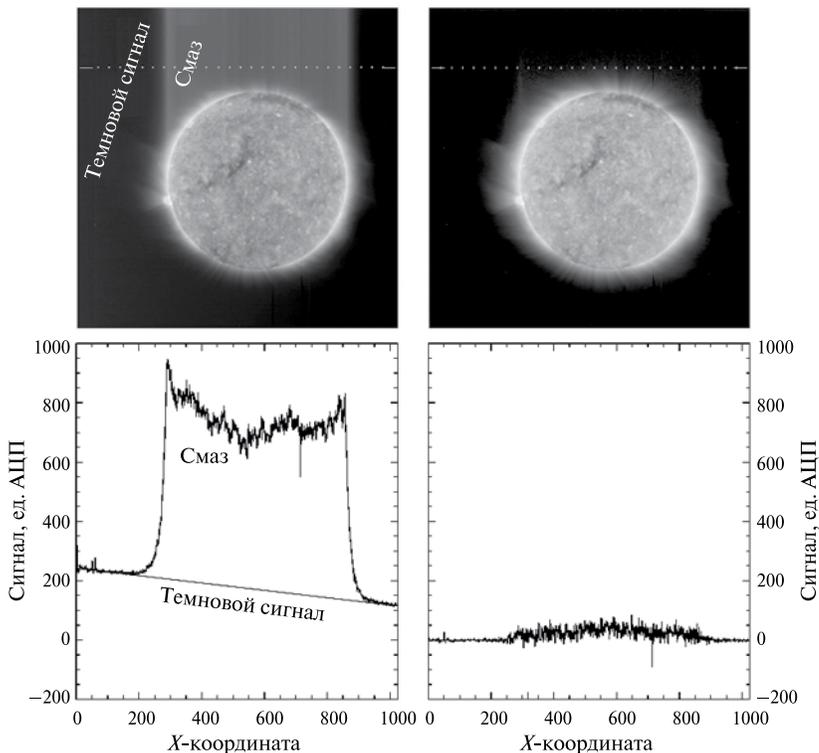


Рис. 5. Сравнение кадра нулевого уровня и кадра после первичной обработки (канал 171 \AA)

смазом и белым полем, шкала интенсивностей такая же. Пунктиром на изображениях отмечена строка, распределение интенсивности вдоль которой приведено под изображениями.

Заключение

В рамках эксперимента ТЕСИС космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» в течение 2009 г. зарегистрирован огромный наблюдательный материал, содержащий уникальную информацию о состоянии короны Солнца и процессах солнечной активности во время глубочайшего минимума солнечной активности. База изображений ТЕСИС нулевого уровня представляет собой набор FITS-файлов. В базе находится около 300 тысяч изображений разных каналов, большинство из которых — телескопические каналы. Возможности аппаратуры ТЕСИС позволили получить ряд уникальных данных — например, проведены целевые программы наблюдений с рекордным на сегодняшний день временным разрешением 4 с.

Для обработки файлов нулевого уровня (как первичной, так и последующей научной) использовался высокоуровневый язык программирования IDL. Для первичной обработки на основе приведенных выше алгоритмов разработан пакет программ TES_PREP. К настоящему времени большинство кадров прошли первичную обработку (определены солнечные координаты, устранен фон, смаз, проведена коррекция белого поля, «сшиты» кадры, зарегистрированные по частям). В базе обработанных изображений содержится около 50 тыс. файлов. Ведется работа по открытию свободного доступа через Интернет к этой базе изображений.

Литература

- [Кузин и др., 2010] Кузин С. В., Богачев С. А., Житник И. А., Шестов С. В. и др. Эксперимент ТЕСИС по рентгеновской изображающей спектроскопии Солнца на спутнике «КОРОНАС-Фотон» // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 1. С. 39–43.
- [Кузин и др., 2011] Кузин С. В., Житник И. А., Шестов С. В., Богачев С. А. и др. Эксперимент ТЕСИС космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» // Астроном. вестн. 2011. Т. 45. № 2. С. 166–177.
- [Ораевский, Собельман, 2002] Ораевский В. Н., Собельман И. И. Комплексные исследования активности Солнца на спутнике «КОРОНАС-Ф» // Письма в Астроном. журн. 2002. Т. 28. С. 457.
- [Собельман и др., 1996] Собельман И. И., Житник И. А., Игнатъев А. П., Корнеев В. В. и др. Рентгеновская спектроскопия Солнца в диапазоне

0,8...30,4 нм в экспериментах ТЕРЕК и РЕС на спутнике «КОРОНАС-И»
// Письма в Астроном. журн. 1996. Т. 22. № 7. С. 604.

[Kotov, 2004] *Kotov Yu. D.* Satellite Project CORONAS-PHOTON for study of Solar Hard Radiation // 35th COSPAR Scientific Assembly. Held 18–25 July, 2004. Paris, France. P. 1283.

**REGISTRATION AND DATA PROCESSING
IN EXPERIMENT TESIS ON THE SATELLITE
CORONAS-PHOTON**

**S. V. Kuzin, S. V. Shestov, S. A. Bogachev, A. A. Perzov,
A. S. Ulianov, A. A. Reva**

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

In January 2009 Russian scientific satellite CORONAS-Photon has been successfully launched. Among the scientific instrumentation of the satellite there was a complex of instrumentation TESIS, which was intended for registration of images and spectroheliogramms in X-ray and EUV spectral range. In the present paper we adduce description of electronic system of TESIS apparatus, discuss principles of control programs of the instrument and describe peculiarities of registered images and algorithm for their processing.

Keywords: Solar corona, extreme ultraviolet, soft X-ray, EUV emission of the solar corona, space-born instrumentation, Solar corona images.

Kuzin Sergey Vadimovich — head of laboratory, PhD, e-mail: kuzin@sci.lebedev.ru.

Shestov Sergey Viktorovich — associate researcher, e-mail: sshestov@dgap.mipt.ru.

Bogachev Sergey Alexandrovich — senior researcher, PhD, e-mail: bogachev@sci.lebedev.ru.

Perzov Andrey Alexandrovich — senior researcher, PhD, e-mail: perzov@sci.lebedev.ru.

Ulianov Artem Sergeevich — student, e-mail: ikiru@inbox.ru.

Reva Anton Alexandrovich — student, e-mail: antonreva@gmail.com.

**ПОИСК ПОЛЯРИЗАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВСПЫШКЕ 26.10.2009 г.
ПО ДАННЫМ ПРИБОРА «ПИНГВИН-М»**

Ю. Д. Котов, О. Н. Умнова

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Федерального агентства по
образованию РФ, Институт астрофизики (ИАФ), Москва*

За время полета прибором «Пингвин-М» на спутнике «КОРОНАС-Фотон» наблюдались 172 солнечных вспышки, в том числе 13 вспышек класса С. 26 октября 2009 г. приборами спутника была зарегистрирована вспышка класса С1.3, в которой помимо мягкой компоненты наблюдалось жесткое рентгеновское излучение. В работе представлен принцип определения степени линейной поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек по данным прибора «Пингвин-М», основанный на восстановлении степени поляризации по азимутальной асимметрии комптоновского рассеяния в случае поляризации падающего излучения. Получены степени анизотропии, линейной поляризации и положение плоскости поляризации рентгеновского излучения для указанной вспышки.

Ключевые слова: солнечная вспышка, рентгеновское излучение, комптоновское рассеяние, поляризация, азимутальная асимметрия, анизотропия, поляриметр, «Пингвин-М», «КОРОНАС-Фотон».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках исследования Солнца и солнечно-земных связей важной задачей является раскрытие механизмов ускорения частиц и генерации жесткого рентгеновского излучения. Надежным источником информации об электронах, ускоренных в солнечных вспышках, является жесткое излучение. Исследуя спектральный состав излучения, можно определить энергетическое распределение электронов [Сомов, Сыроватский, 1976], а направленность и поляризация излучения дает

Котов Юрий Дмитриевич — директор, кандидат физико-математических наук, e-mail: YDKotov@mephi.ru.

Умнова Ольга Николаевна — инженер, e-mail: olga_umnova@list.ru.

возможность судить об угловом распределении электронов [Кельнер, Скрынников, 1985].

Измерения параметров линейной поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек проводились в ряде экспериментов [Tindo et al., 1970; Богомолов и др., 2003], первые спутниковые поляризационные измерения рентгеновского вспышечного излучения были выполнены еще в начале 1970-х гг. на спутниках серии «Интеркомос» [Сомов, Тиндо, 1978], но до сих пор существует явный дефицит достоверных результатов в этой области.

В связи с актуальностью задачи исследования поляризации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек был создан прибор «Пингвин-М». Научные задачи, решаемые прибором «Пингвин-М» в космическом проекте КОРОНАС-ФОТОН, его устройство и принцип действия подробно изложены в работе [Дергачев и др., 2010].

Кратко напомним устройство детекторной части прибора и принцип измерения поляризации. Детекторная часть прибора схематично изображена на рис. 1.

Степень линейной поляризации и позиционный угол плоскости поляризации жесткого рентгеновского излучения измеряется по асимметрии комптоновского рассеяния падающего потока. Для этого в составе прибора использовались четыре детектора на основе паратерфенила (ДР), в которых регистрировались электроны отдачи при комптоновском рассеянии, а также набор из шести пространственно

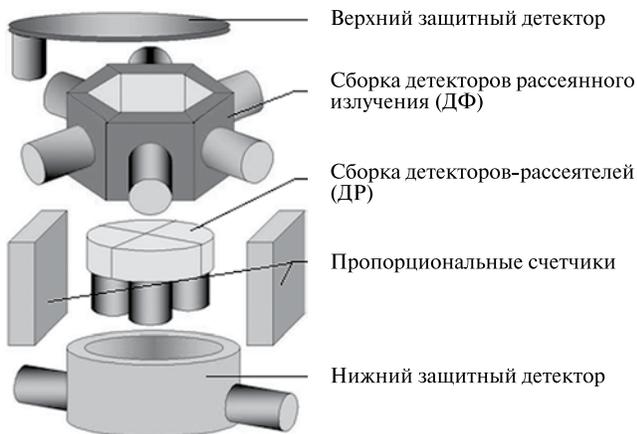


Рис. 1. Схема физической части прибора «Пингвин-М»

ориентированных детекторов-фосwichей (ДФ) из монокристаллов NaI(Tl), в которых регистрировались рассеянные γ -кванты. Детекторы ДФ были окружены пластическими сцинтилляторами из полистирола, являющимися боковым защитным детектором, значительно снижающим фон от заряженных частиц при использовании метода антисовпадений. Для регистрации комптоновского рассеяния использовался метод двойных совпадений.

Эффективная площадь двойных совпадений для энергии 60 кэВ составляла 6 см^2 .

АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ СТЕПЕНИ АНИЗОТРОПИИ И ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Измерение степени линейной поляризации основано на зависимости преимущественного азимутального направления комптоновского рассеяния от поляризации первичных квантов, а именно — на кинематике комптон-эффекта. При поляризации падающего излучения фотон не только рассеивается на угол θ , но и изменяет азимутальный угол движения φ (рис. 2).

Процесс рассеяния линейно поляризованных фотонов описывается формулой Клейна – Нишины – Тамма:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \left(\frac{E'}{E} \right)^2 \left[\frac{E'}{E} + \frac{E}{E'} - 2\sin^2 \theta \cdot \cos^2 \varphi \right], \quad (1)$$

где $r_0 = 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ см}$ — классический радиус электрона; E и E' — энергия падающего и рассеянного фотона соответственно; θ и φ — зенитный и азимутальный углы рассеяния фотона соответственно.

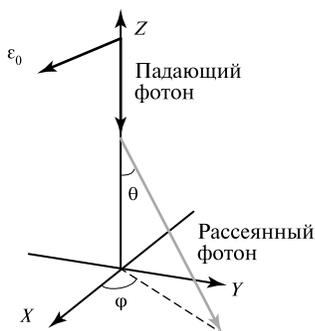


Рис. 2. Кинематика комптон-эффекта

Энергия рассеянного фотона связана с энергией падающего фотона формулой:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e}(1 - \cos\theta)}, \quad (2)$$

где $m_e = 511$ кэВ — масса электрона.

Для поляризованного излучения возникает асимметрия рассеянного излучения относительно азимутального угла φ . Коэффициент асимметрии R (или анализирующая способность процесса комптоновского рассеяния) находится как отношение максимального к минимальному сечению рассеяния относительно азимутального угла φ :

$$R = \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\varphi = 90^\circ)}{\frac{d\sigma}{d\Omega}(\varphi = 0^\circ)} = \frac{\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E}}{\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} - 2(\sin\theta)^2}. \quad (3)$$

График зависимости коэффициента асимметрии R от зенитного угла рассеяния θ представлен на рис. 3.

Для энергий первичного фотона $E < m_e$ коэффициент асимметрии достигает максимума при $\theta = 90^\circ$ и имеет выраженный пик. С увеличением энергии максимум сдвигается в сторону меньших углов, а пик сглаживается, так, для $E = 10$ МэВ $\theta = 45^\circ$.

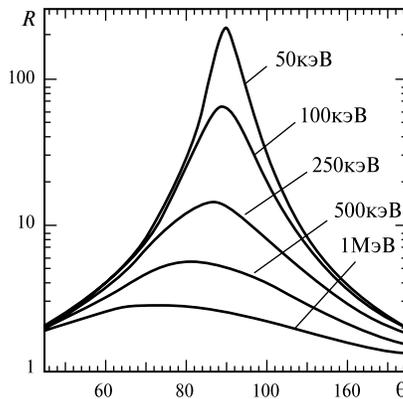


Рис. 3. Зависимость коэффициента асимметрии R от зенитного угла рассеяния θ для различных энергий начальных фотонов

Если угол θ экспериментально не наблюдается, то, интегрируя по этому углу, сечение рассеяния можно представить в виде функции от азимутального угла φ , при этом интегрирование ведется в интервале от 0 до π [Kotov, 1988].

Сечение рассеяния для 100 % поляризованного падающего излучения представляется как

$$\frac{d\sigma}{d\varphi} = \frac{a}{2\pi} \left[1 + \lambda \cos^2 \varphi \right]. \quad (4)$$

Если степень поляризации равна s , то

$$\frac{d\sigma}{d\varphi} = \frac{a_s}{2\pi} \left[1 + \lambda_s \cos^2 \varphi \right], \quad (5)$$

где

$$a_s = a \left[1 + \frac{1}{2} \lambda (1 - s) \right], \text{ см}^2; \quad \lambda_s = \frac{s\lambda}{\left[1 + \frac{1}{2} \lambda (1 - s) \right]}; \quad (5a)$$

$$a = \frac{\pi r_0^2}{k} \left[\ln(1 + 2k) + \frac{1}{2} - \frac{1}{2(1 + 2k)} \right], \text{ см}^2;$$

$$\lambda = -\frac{4}{k} \frac{\left(1 + \frac{1}{k} \right) \ln(1 + 2k) - 2}{\ln(1 + 2k) + \frac{1}{2} - \frac{1}{2(1 + 2k)^2}}; \quad (5б)$$

$k = E/m_e$; E — энергия падающего фотона; $m_e = 511$ кэВ — масса электрона; s — степень поляризации.

Для прибора «Пингвин-М», регистрирующего рассеянное излучение, сечение удобно представить в виде

$$\frac{d\sigma}{d\varphi} = \frac{a'_s}{2\pi} \left[1 - \lambda'_s \cos^2(\varphi - \varphi_0) \right], \quad (6)$$

где a'_s и λ'_s — параметры, зависящие от рассеянной энергии; φ_0 — поляризационный угол (по отношению к плоскости прибора, проходящей через оптические оси первого и четвертого ДФ).

В поляриметре выводится поляризационная 24-элементная матрица двойных совпадений каждого ДФ с каждым ДР ($6_{\text{ДФ}} \times 4_{\text{ДР}} = 24$). Каждая ячейка, в свою очередь, представляет собой матрицу числа совпадений по энергиям для одной пары ДР-ДФ

в пяти энергетических каналах для ДФ в диапазоне 18...160 кэВ и в четырех энергетических каналах для ДР в диапазоне 0,66...42,5 кэВ ($4_{\text{канДР}} \times 5_{\text{канДФ}} = 20$). Для нахождения поляризационных параметров (степени анизотропии λ'_s и поляризационного угла φ_0) матрица суммируется по всем энергетическим каналам соответствующих детекторов ДФ и по четырем ДР, полученные шесть значений отсчетов ДФ используются для анализа. На рис. 4 в виде шестиугольника представлены отсчеты в ДФ для фонового участка 26.10.09 г. с 22:30:00 (UTC) по 22:32:00 (UTC), где длина радиус-вектора r пропорциональна числу отсчетов в соответствующем ДФ, числа в процентах — доля рассеянного излучения в ДФ. Полное число событий во всех ДФ составило 17 920.

Алгоритм нахождения параметра анизотропии λ'_s и поляризационного угла φ_0 состоит в том, чтобы полученные экспериментальные данные (шесть значений ДФ) аппроксимировать функцией

$$a'_s \left(1 + \lambda'_s \cos^2(\varphi - \varphi_0) \right).$$

Для удобства поиска поляризационных параметров приведенная функция нормируется на единицу

$$f(\varphi, \lambda'_s, \varphi_0) = \frac{1 + \lambda'_s \cos^2(\varphi - \varphi_0)}{\int_0^{2\pi} \left(1 + \lambda'_s \cos^2(\varphi - \varphi_0) \right) d\varphi}. \quad (7)$$

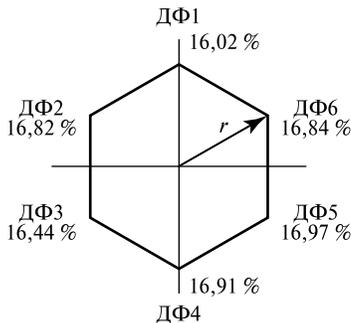


Рис. 4. Отображение шести экспериментальных значений ДФ для фонового излучения 26.10.09 г. с 22:30:00 до 22:32:00 (UTC)

С использованием метода наименьших квадратов для шести значений ДФ находятся параметры λ'_s и φ_0 , ищется минимум функционала:

$$F(\lambda'_s, \varphi_0) = \sum_{i=1}^6 \frac{[N_i - f(\varphi_i, \lambda'_s, \varphi_0) \Sigma N_i]^2}{N_i}, \quad (8)$$

где N_i — число событий в ДФ_{*i*}; $i = 1 \dots 6$ — номер ДФ; $\varphi_i = (i-1) \frac{\pi}{3}$.

Для определения степени поляризации и направления плоскости поляризации падающего излучения было проведено моделирование процесса комптоновского рассеяния в приборе «Пингвин-М» для вертикально падающего линейно-поляризованного излучения с различными показателями спектра и всех направлений плоскости поляризации.

Была выявлена несимметрия прибора относительно детекторов-рассеивателей, что приводит к анизотропии неполяризованного излучения. Для неполяризованного излучения с энергией 60 кэВ анизотропия составляет 0,059.

Для ликвидации приборной асимметрии вводятся поправочные коэффициенты K_i для каждого i -го ДФ:

$$K_i = \frac{6[1 - \lambda_p \cos^2(\varphi_i - \varphi_p)]}{\sum_{i=1}^6 [1 - \lambda_p \cos^2(\varphi_i - \varphi_p)]},$$

где λ_p и φ_p — степень анизотропии и поляризационный угол неполяризованного излучения, зависящие от спектра падающего излучения.

С учетом коэффициентов, функционал примет вид:

$$G(\lambda'_s, \varphi_0) = \sum_{i=1}^6 \frac{[N_i - f(\varphi_i, \lambda'_s, \varphi_0) K_i \cdot \Sigma N_i]^2}{N_i}. \quad (9)$$

Для определенного показателя дифференциального степенного спектра падающего излучения ($\gamma = -2 \dots -4$) определяются величины λ'_s и φ_0 при заданной степени поляризации падающего излучения (которая выбиралась в интервале 0...100 %) и направлении плоскости поляризации (0...210°). Находится среднее значение λ'_s по φ для соответствующей степени поляризации. Полученная зависимость

степени анизотропии от степени поляризации для соответствующего спектра излучения позволяет определить степень поляризации для данного спектра излучения.

Для неполяризованного излучения с показателем спектра

$$\gamma = -2,5, \lambda_p = 0,084, \varphi_p = 60^\circ, K_i = \begin{pmatrix} 1,022 \\ 0,956 \\ 1,022 \\ 1,022 \\ 0,956 \\ 1,022 \end{pmatrix}. \text{ На рис. 5 представлена ап-}$$

проксимация значений ДФ для неполяризованного излучения с $\gamma = -2,5$ функциями без поправок на несимметрию прибора и с поправками.

С учетом поправочных коэффициентов функция, аппроксимирующая экспериментальные значения, близка к окружности с $\lambda'_s = 0,008$.

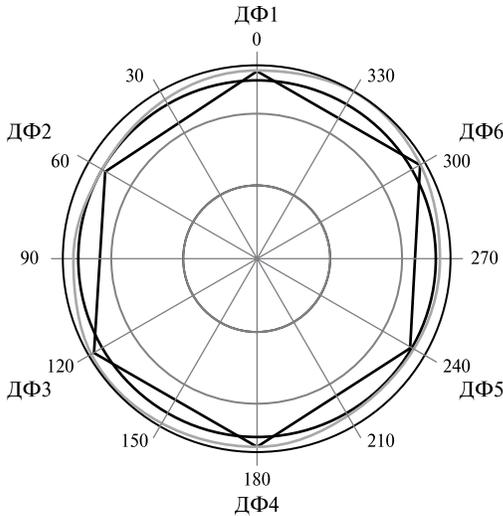


Рис. 5. Экспериментальные значения N_i (шестиугольник) неполяризованного излучения с $\gamma = -2,5$, аппроксимированные функцией без учета поправок (серая окружность) и с поправками на несимметрию прибора (черная окружность)

АНАЛИЗ ВСПЫШЕЧНЫХ СОБЫТИЙ НА НАЛИЧИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В период работы спутника «КОРОНАС-Фотон» с февраля по декабрь 2009 г. активность Солнца была крайне низкой. За время полета прибором «Пингвин-М» было зарегистрировано 172 солнечных вспышки, в том числе:

- 58 вспышек класса А;
- 101 вспышка класса В;
- 13 вспышек класса С.

Расхождения с данными GOES связано с особенностями орбиты спутника «КОРОНАС-Фотон» — наличие витков, когда он заходил в тень, проходил мощные источники фоновых потоков (Южно-Атлантическую аномалию, отроги радиационных поясов Земли), а также отсутствие данных, по техническим причинам, в некоторые интервалы периода времени наблюдений.

26 октября 2009 г. приборами спутника «КОРОНАС-Фотон» была зарегистрирована вспышка класса С1.3, в которой помимо мягкой компоненты наблюдалось жёсткое рентгеновское излучение [Котов, 2010]. Вспышка произошла в активной области 1029 близко к центру диска Солнца (N12W33, угол наблюдения $\theta = 35^\circ$).

На стадии нарастания вспышки наблюдалось увеличение счета, связанное с высыпанием заряженных частиц. Прибор «Электрон-М-Песка» зарегистрировал электроны 0,2...1 МэВ, но прибор «Пингвин-М» перешел в режим «Всплеск» уже после этого увеличения.

Прибор работал 50 с в режиме «Всплеск» с 22:49:31(UTC) до 22:50:21(UTC), «активный» участок времени, исследуемый на наличие поляризации, составил 30 с (рис. 6).

Показатель спектра излучения вспышки С1.3 (см. таблицу) определялся сравнением спектра рассеянного излучения за выбранный интервал времени в детекторах ДФ со спектрами, полученными в результате моделирования. Показатель спектра вспышки С1.3 составил $\sim -2,5$.

В таблице приведены поляризационные параметры вспышки С1.3 для всего интервала времени (30 с) и каждые 10 с, найденные из зависимости степени анизотропии от степени поляризации для $\gamma = -2,5$ (рис. 7).

Положение плоскости поляризации на солнечном диске показано на рис. 8. Плоскость поляризации проходит под углом 20° против часовой стрелки по отношению к радиусу-вектору, соединяющему область вспышки с центром диска Солнца. Ошибка измерения составляет $\pm 10^\circ$.

Степень поляризации для энергий 18...160 кэВ меняется во времени от $21 \pm 9\%$ в начале вспышки до $3 \pm 9\%$ в конце, что не противоречит теоретическим моделям [Гузман и др., 1996]. Значение поляризации для интервала 30 с составляет $12 \pm 6\%$. Данные расчеты проводились без вычитания фона из числа двойных совпадений детекторов поляриметра. Полученный результат дает нижний предел степени поляризации $\sim 12\%$ за 30 с. Результаты обработки с учетом фоновых событий приводят к увеличению поляризации излучения вспышки до $0,66 \pm 0,16$ за 30 с. Ошибка измерения составляет $\pm 10\%$.

Поляризационные параметры вспышки С1.3

| Время (UTC) | Длительность, с | Степень анизотропии | Степень поляризации |
|----------------------|-----------------|------------------------------|---------------------|
| 22:49:31 22:50:01 | 30 | $\lambda'_s = 0,07 \pm 0,04$ | $s = 0,12 \pm 0,06$ |
| 22:49:31 22:49:51 | 20 | $\lambda'_s = 0,11 \pm 0,05$ | $s = 0,18 \pm 0,07$ |
| 22:49:31 22:49:41 | 10 | $\lambda'_s = 0,13 \pm 0,06$ | $s = 0,21 \pm 0,09$ |
| 22:49:41 22:49:51 | 10 | $\lambda'_s = 0,10 \pm 0,06$ | $s = 0,17 \pm 0,09$ |
| 22:49:51 22:50:01 | 10 | $\lambda'_s = 0,03 \pm 0,06$ | $s = 0,03 \pm 0,09$ |

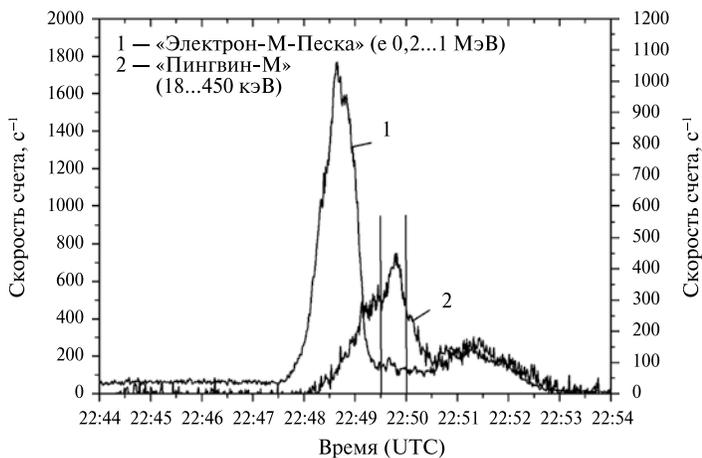


Рис. 6. Временной ход интенсивметров «Электрон-М-Песка» и «Пингвин-М» во время вспышки С1.3. Отмечен интервал времени, исследуемый во вспышке на наличие поляризации по данным прибора «Пингвин-М»

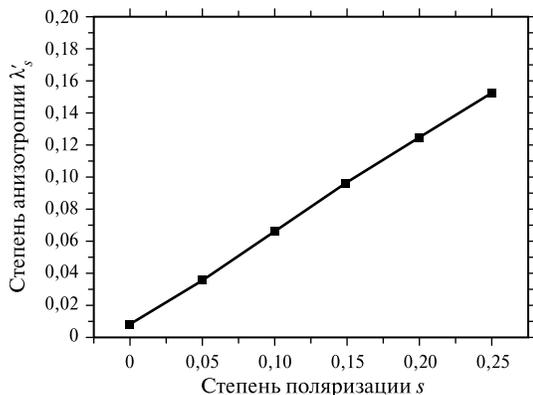


Рис. 7. Зависимость степени анизотропии от степени поляризации для показателя спектра падающего излучения $\gamma = -2,5$

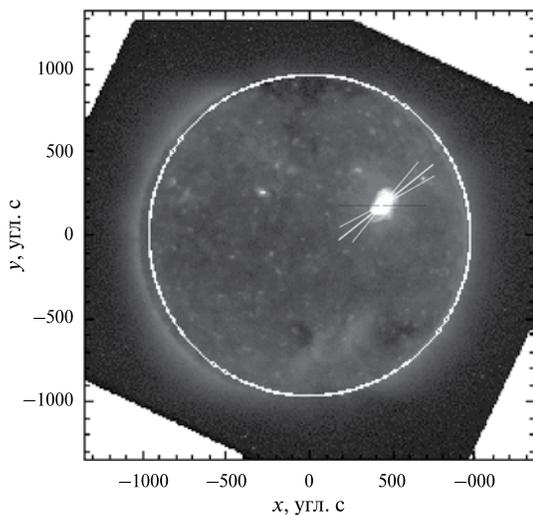


Рис. 8. Положение плоскости поляризации жесткого рентгеновского излучения на солнечном диске по оценке прибора «Пингвин-М». Использовано изображение Солнца, полученное во время вспышки 26 октября 2009 г. в 22:47:10 (UTC) прибором GOES

Заключение

Алгоритм определения степени анизотропии представлен впервые и опробован на вспышке класса С1.3. За время работы прибора «Пингвин-М» вспышек выше класса С с жесткой компонентой не наблюдалось, что не дало возможности проверить алгоритм еще раз. Стоит отметить, что даже для вспышки класса С представленная методика позволяет восстановить степень поляризации вследствие высокой эффективности регистрации прибора. Данный алгоритм может быть использован для приборов схожей конструкции.

Литература

- [Богомолов и др., 2003] *Богомолов А. В., Денисов Ю. И., Логачев Ю. И.* и др. Временные, спектральные и поляризационные характеристики жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек, наблюдавшихся в эксперименте СПР-Н на борту орбитальной обсерватории «КОРОНАС-Ф» // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. Т. 67. № 10. С. 1422–1426.
- [Гузман и др., 1996] *Гузман А. Б., Кудрявцев И. В., Чариков Ю. Е.* Эволюция ускоренных в солнечных и звездных вспышках электронов и импульсная структура жесткого рентгеновского излучения // Астрон. журн. 1996. Т. 73. С. 272–279.
- [Дергачев и др., 2010] *Дергачев В. А., Матвеев Г. А., Круглов Е. М.* и др. Прибор «ПИНГВИН-М», предназначенный для исследования поляризации жесткого рентгеновского излучения Солнца в космическом проекте КОРОНАС-Фотон // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту КОРОНАС-ФОТОН: Тр. рабочего совещания. Россия, Таруса. М.: ИКИ РАН. 2010. С. 83–105. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Кельнер, Скрынников, 1985] *Кельнер С. Р., Скрынников Ю. И.* Поляризация и направленность жесткого рентгеновского тормозного излучения в солнечных вспышках // Астрон. журн. 1985. Т. 62. С. 760–767.
- [Котов, 2010] *Котов Ю. Д.* Высокоэнергичные вспышечные процессы на Солнце и их исследование на российских спутниках КОРОНАС // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180. № 6. С. 647–661.
- [Сомов, Сыроватский, 1976] *Сомов Б. В., Сыроватский С. И.* Физические процессы в атмосфере Солнца, вызываемые вспышками // Успехи физ. наук. 1976. Т. 120. С. 217–257.
- [Сомов, Тиндо, 1978] *Сомов Б. В., Тиндо И. П.* О поляризации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек // Космич. исслед. 1978. Т. 16. С. 686–697.
- [Kotov, 1988] *Kotov Yu. D.* Methods of measurement of gamma-ray polarization // Space Science Reviews. 1988. V. 49. P. 185–195.

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

SEARCH POLARIZATION X-RAY RADIATION IN A FLARE OF 26.10.2009 FROM THE PENGUIN-M

Yu. D. Kotov, O. N. Umnova

*National Research Nuclear University “MEPhI” (NRNU MEPhI),
Astrophysics Institute MEPhI, Moscow, Russia*

During flight the device Penguin-M has registered 172 solar flares, including 13 flares of a class C. Flare class C1.3 is registered 26 October 2009 by scientific apparatus CORONAS-Photon, in particular, the device Penguin-M. In flare C1.3 it was observed both soft and rigid x-ray radiation. In the paper are presented the principle of determining the degree of linear polarization of X-rays from solar flares according to the device Penguin-M, based on the restoration the degree of polarization on the azimuthal asymmetry of Compton scattering in the case of the polarization of the incident radiation. The degree anisotropy, the degree of linear polarization and position of the polarization plane of X-ray radiation for the specified flare are received.

Keywords: solar flare, X-ray, Compton scattering, polarization, azimuthally asymmetry, anisotropy, polarimetry, Penguin-M, CORONAS-Photon.

Kotov Yury Dmitrievich — director, PhD, e-mail: YDKotov@mephi.ru.
Umnova Olga Nikolaevna — engineer, e-mail: olga_umnova@list.ru.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПРИБОРОМ «ПИНГВИН-М»

А. С. Гляненко¹, Ю. Д. Котов¹, А. И. Архангельский¹,
А. С. Буслов¹, В. Н. Юров¹, В. А. Дергачев²,
Е. М. Круглов², В. П. Лазутков², Г. А. Матвеев²,
А. Г. Пятигорский², М. И. Савченко², Д. В. Скородумов²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Федерального агентства

по образованию РФ, Институт астрофизики (ИАФ), Москва
² Учреждение Российской академии наук Физико-технический
институт им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ РАН), Санкт-Петербург

Прибор «Пингвин-М» был запущен на орбиту 30 января 2009 г. в составе космического аппарата «КОРОНАС-Фотон». В работе представлены предварительные результаты регистрации солнечных вспышек прибором «Пингвин-М» в 2009 г. Рассматриваются также различные статистические характеристики зарегистрированных солнечных вспышек классов В и С по классификации GOES.

Ключевые слова: солнечные вспышки, рентгеновское излучение, космический эксперимент, результаты, мера эмиссии, температура плазмы, «Пингвин-М», «КОРОНАС-Фотон».

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

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

Гляненко Александр Степанович — заведующий научно-исследовательским сектором, кандидат физико-математических наук, e-mail: asgl2005@rambler.ru.

Котов Юрий Дмитриевич — директор, кандидат физико-математических наук, e-mail: kotov@mephi.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора, кандидат физико-математических наук, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

Дергачев Валентин Андреевич — заместитель директора, доктор физико-математических наук, e-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru.

Матвеев Геннадий Александрович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: genadiy.matveev@mail.ioffe.ru.

Круглов Евгений Михайлович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: E.Kruglov@mail.ioffe.ru.

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

Савченко Михаил Иванович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических 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.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАБОТЕ ПРИБОРА

Прибор «Пингвин-М» [Дергачев и др., 2009], запущенный в январе 2009 г. на околоземную орбиту на космическом аппарате «КОРОНАС-Фотон», является рентгеновским поляриметром-спектрометром, предназначенным для исследования энергетических спектров рентгеновского и гамма-излучения Солнца в диапазонах энергий 18...450 и 2...20 кэВ, их эволюции в процессе солнечных вспышек, а также для измерения степени линейной поляризации жёсткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 20...150 кэВ. Первые результаты наблюдений приведены в работе [Котов и др., 2010].

Детекторный блок прибора состоит из двух пропорциональных газовых детекторов (ПС) и сборки скинтилляционных детекторов (рис. 1), включающих активный детектор-рассеиватель (ДР) жесткого рентгеновского излучения (сборка в виде четырех детекторов — кристаллов паратерфенила) и шести детекторов-фосфичей (ДФ) рассеянного и прямого рентгеновского и гамма-излучения, собранных в правильный шестигранник вокруг рассеивателя (кристаллы NaI(Tl), установленные в пластиковый скинтиллятор). Для защиты от заряженных частиц сборка закрыта сверху и снизу анти-совпадательными пластиковыми скинтилляторами (верхний АД

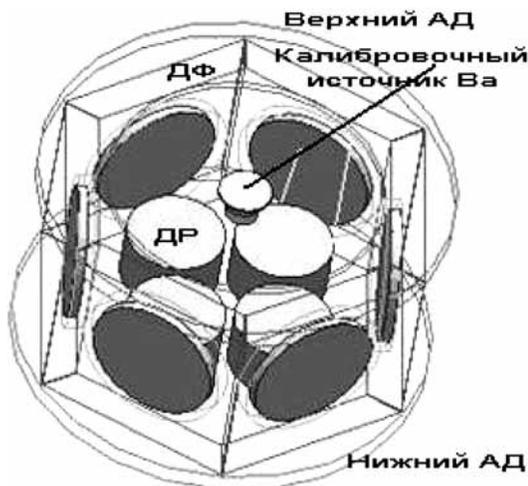


Рис. 1. Сборка скинтилляционных детекторов блока детекторов прибора «Пингвин-М»

и нижний АД). Степень линейной поляризации и позиционный угол плоскости поляризации жесткого рентгеновского излучения измеряются по асимметрии комптоновского рассеяния в случае поляризации падающего потока. В состав сборки входит калибровочный источник рентгеновского излучения ^{133}Ba .

Каждый из двух пропорциональных газовых детекторов, предназначенных для работы в диапазоне энергий 2...20 кэВ, имеет четыре секции, расположенные друг под другом. Верхняя секция обладает наибольшей чувствительностью в мягком рентгеновском диапазоне. Секция, расположенная под ней, предназначена для регистрации излучения мощных вспышек, поскольку её излучение будет сильно ослаблено в ксеноне верхней секции и в перегородке между секциями. Ещё две секции не имеют входных окон для рентгеновского излучения. В одной из них измеряется фон заряженных частиц, а в другой установлен калибровочный источник на основе изотопа ^{55}Fe (моноэнергетическая линия с энергией 5,9 кэВ). Следует подчеркнуть, что газовый объём у всех секций общий. Такое построение счетчика позволяет с использованием калибровочной секции организовать систему автоподстройки и стабилизации работы счетчиков.

Для всех детекторов сборки сцинтилляционных детекторов была проведена предполетная калибровка с помощью радиоактивных источников на основе изотопов (в скобках указаны линии в энергетическом диапазоне прибора): ^{109}Cd (22...25; 88 кэВ), ^{241}Am (59 кэВ), ^{133}Ba (31...35; 81 кэВ). Для корректного определения характеристик поляризационных матриц прибор облучался равномерным по площади входного окна пучком неполяризованного излучения параллельно оптической оси прибора с расстояния 2,5 м. Для проверки методики и изучения характеристик прибора при определении характеристик поляризации рентгеновского излучения проведена экспериментальная калибровка блока детекторов с помощью поляризованного излучения, которое получалось после рассеяния под углом 90° излучения радиоактивных источников. Пропорциональные счетчики были откалиброваны с помощью источника ^{55}Fe .

В течение всего полета характеристики всех детекторов (энергетическая шкала) поддерживались системами стабилизации. Системы стабилизации энергетической шкалы и контроля симметрии детекторов поляриметра позволяли поддерживать стабильность на уровне $\sim 1,5\%$ [Дергачев и др., 2010a]. Первый контур стабилизации всех сцинтилляционных детекторов обеспечивался светодиодными реперными источниками. Стабилизация световых выходов светодиодов, в свою очередь, осуществлялась по встроенному радиоактивному источнику ^{133}Ba , а стабилизация пропорциональных счетчиков — по

встроенному радиоактивному источнику ^{55}Fe , введенному в четвертую (калибровочную) секцию. Параметры систем стабилизации детекторов изменялись по командам с Земли.

В приборе применялось устройство выделения вспышек с использованием потоков данных от ДР в диапазоне $\sim 10\text{--}40$ кэВ, благодаря чему реализовывался режим «Вспышка» с более частым выводом спектрометрической информации со всех детекторов прибора. В обычном режиме (режим «Патруль») вывод спектрометрической информации в процессе проведения эксперимента проводился с временным разрешением 2; 5; 10 с (для диапазона 2...20 кэВ) и 24; 60; 120 с (для диапазона 18...450 кэВ, а также для поляризационных измерений), а в случае перехода в режим «Вспышка» — 2; 5; 10 с (для диапазона 18...450 кэВ, а также для поляризационных измерений). Кроме того, независимо выводилась информация об интегральных потоках рентгеновского излучения в диапазонах 2...20, 7...20 кэВ, потоках в трех парах (два установленных противоположно относительно оси блока детектирования детекторов-фосфичей) в диапазоне 18...450 кэВ и суммарная скорость счета всех защитных (антисовпадательных) сцинтилляционных детекторов. Эта информация выводилась с периодичностью 0,2; 0,5; 1,0 с для получения подробных данных о временных профилях потоков излучения. Более полное описание прибора приведено в работе [Дергачев и др., 2010б].

1. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И ФОНОВЫЕ УСЛОВИЯ В ПЕРИОД ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В период с февраля по декабрь 2009 г. активность Солнца находилась на крайне низком уровне, возможно самом низком и глубоком за время наблюдения за активностью Солнца из космоса. На рис. 2 и 3 приведены построенные по данным NOAA основные индикаторы активности Солнца — число групп пятен и поток радиоизлучения на частоте 10,7 см [NOAA, 2010].

За время полета прибором «Пингвин-М» было зарегистрировано 172 солнечных вспышки, в том числе:

- 58 вспышек класса А;
- 101 вспышка класса В;
- 13 вспышек класса С.

Расхождение с данными GOES связано с особенностями орбиты спутника «КОРОНАС-Фотон» — наличие витков, когда он заходит в тень, проходит мощные источники фоновых потоков (Южно-Атлантическая магнитная аномалия, отроги радиационных поясов

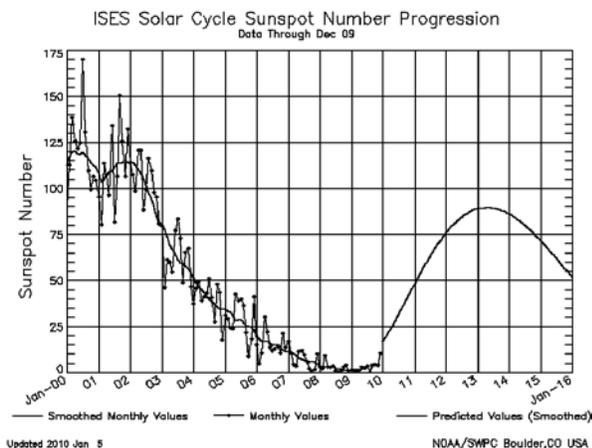
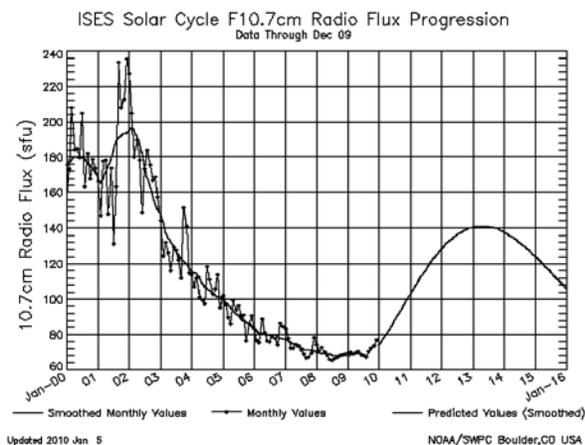


Рис. 2. Число пятен на Солнце

Рис. 3. Поток радиоизлучения $F = 10,7$ см

Земли), а также отсутствие данных в некоторые интервалы периода наблюдений. Распределение солнечных вспышек по числу и мощности за период наблюдений приведено на рис. 4.

Так как активность Солнца в феврале-декабре 2009 г. находилась на очень низком уровне, это позволило для специально выбранных периодов наблюдений (критерием отбора было отсутствие значимой солнечной активности) построить карты скоростей счета для

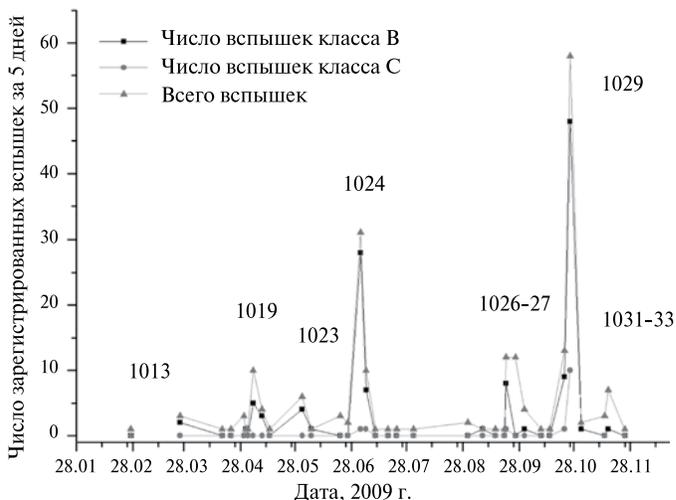


Рис. 4. Распределение числа зарегистрированных вспышек (за пятидневные интервалы), по мощности (цифры на графике показывают номер активной группы, являвшейся источником вспышек)

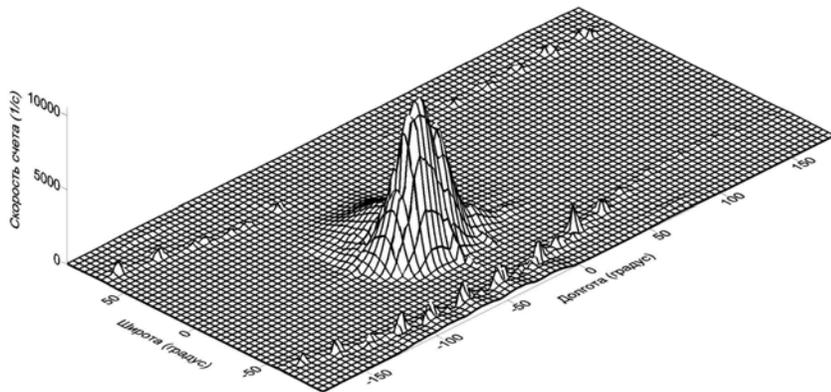


Рис. 5. Карта скоростей счета для энергетического диапазона 1,8...20 кэВ (по оси X — долгота, град, 0 соответствует Гринвичскому меридиану; по оси Y — широта, град; по оси Z — скорость счета, 1/с)

различных диапазонов энергий. На рис. 5 и 6 приведены подобные карты для освещенных участков орбиты для энергетических диапазонов 1,8...20 и 18...450 кэВ. На этих картах очень хорошо видны

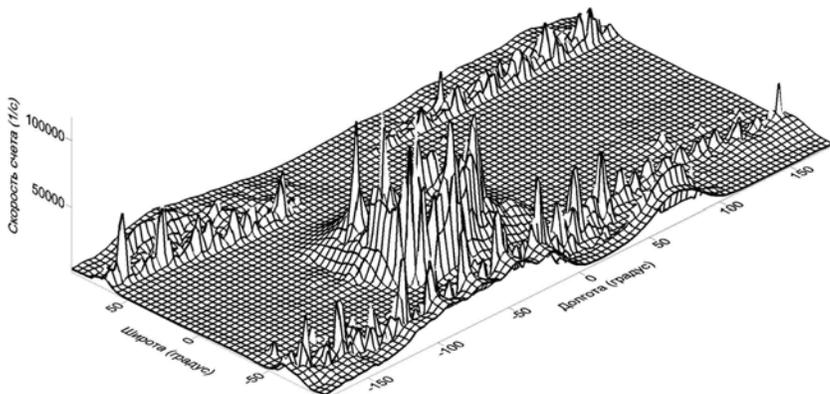


Рис. 6. Карта скоростей счета для энергетического диапазона 18...450 кэВ (по оси X — долгота, град, 0 соответствует Гринвичскому меридиану; по оси Y — широта, град; по оси Z — скорость счета, 1/с)

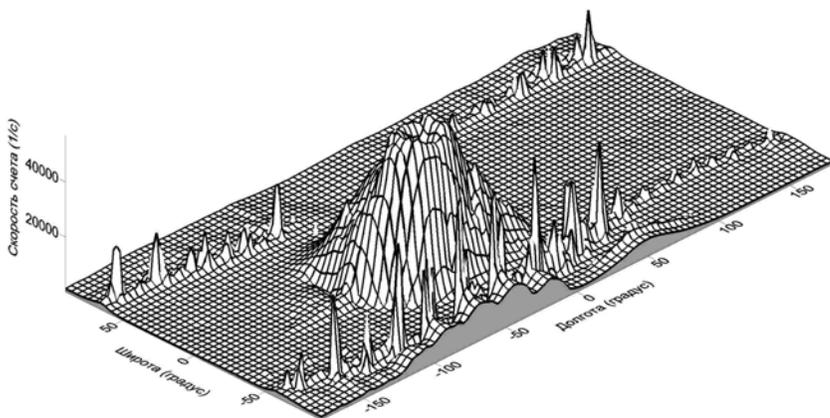


Рис. 7. Карта скоростей счета заряженных частиц с $E > 1$ МэВ (по оси X — долгота, град, 0 соответствует Гринвичскому меридиану; по оси Y — широта, град; по оси Z — скорость счета, 1/с)

зоны Южно-Атлантической магнитной аномалии (ЮАА) и области прохождения прибором зон «отрогов» радиационных поясов Земли (РПЗ). Так как специального отбора по критериям наличия возмущений магнитосферы не проводилось, в зоне прохождения «отрогов» РПЗ видны пики, связанные с прохождением этих областей в периоды магнитосферных возмущений и, как следствие, высыпаний

заряженных частиц. Для диапазона 18...450 кэВ в зоне ЮАА после роста интенсивности наблюдался спад, связанный с особенностями функционирования системы автоподстройки и стабилизации работы детекторов, переходящей в режим сохранения работоспособности системы с понижением высоковольтного напряжения питания фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). На рис. 7 представлена аналогичная карта для интенсивности потоков заряженных частиц с энерговыделением в детекторах >1 МэВ, регистрируемых детекторами антисовпадательной защиты.

2. СТАТИСТИКА ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

2.1. Сравнение измеренных характеристик событий с данными других приборов

Для верификации данных, полученных в ходе эксперимента, важно их сравнить с результатами других экспериментов. На рис. 8 и 9 приведено поведение потоков мягкого рентгеновского излучения в экспериментах ПИНГВИН-М и GOES (который является своеобразным эталоном по измерению мощностных характеристик вспышек) для солнечной вспышки 26.10.2009 г. в близких энергетических диапазонах. С учетом небольшого различия в энергетических диапазонах видно хорошее согласие в результатах, что подтверждает ожидаемые для прибора характеристики в мягком рентгеновском диапазоне 2...20 кэВ.

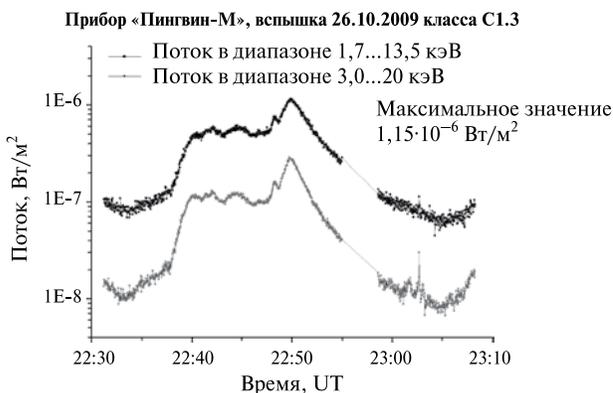


Рис. 8. Поведение потоков мягкого рентгеновского излучения в эксперименте ПИНГВИН-М

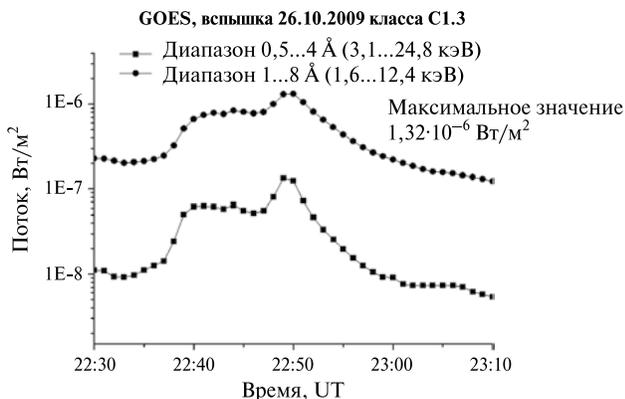


Рис. 9. Поведение потоков мягкого рентгеновского излучения в эксперименте GOES

2.2. Параметры вспышек и их статистика

О механизмах ускорения частиц в период вспышки, характеристиках излучающей плазмы можно судить по различным характеристикам поведения потоков мягкого рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 2...20 кэВ. Многие вспышки, несмотря на спокойное состояние Солнца, имеют сложные временные профили поведения (например, с несколькими максимумами), т. е. в такой вспышке имеются несколько актов ускорения частиц (или высыпания из арки из-за изменения питч-углового распределения). Поэтому для получения обобщенных характеристик вспышек за время эксперимента были выбраны следующие: мощность вспышки, время нарастания потока излучения (от уровня 0,5 до максимума), время спада (от максимума до уровня 0,5), длительность вспышки по уровням 0,5 и 0,9 от максимума, а также полученные в ходе обработки для большинства вспышек классов В и С по одностепенной модели физические характеристики излучающей плазмы — максимальные значения температуры излучающей плазмы и меры эмиссии, по формуле (1), приведенной в работе [Crannell et al., 1978]:

$$I(E) \approx 1,16 \cdot 10^3 \frac{EM}{E\sqrt{T}} (T/E)^\alpha e^{-E/T},$$

где $I(E)$ — интенсивность рентгеновского излучения, фот/(см²·с·кэВ); E и T — энергия и температура, кэВ; $EM = n_e^2 V$ — мера эмиссии излучающих электронов, $\times 10^{45}$ см⁻³; n_e — плотность электронов; V — объем излучающей области; $\alpha = 0,37(30 \text{ кэВ/Т})^{0,15}$.

Для вспышек классов В и С на рис. 10–16 приведены распределения для обработанных событий по этим параметрам.

Как следует из обработанных данных, большинство вспышек — короткие (более 60 % событий имеют длительность по уровню 50 % (0,5) не более 510 с, а более 90 % (0,9) событий — не более 920 с),

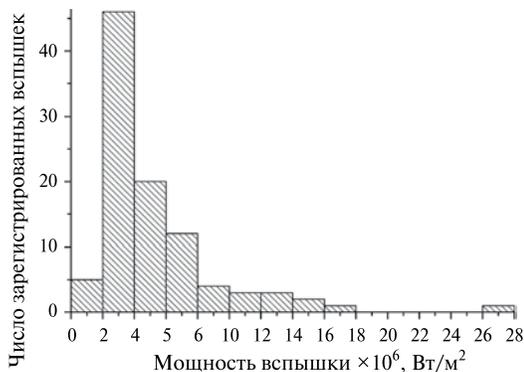


Рис. 10. Распределение числа вспышек по мощности (классы В и С)

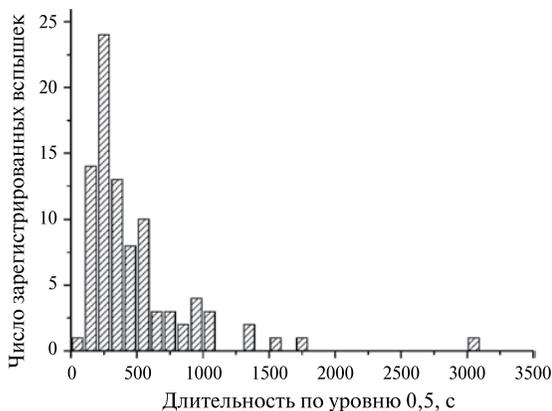


Рис. 11. Распределение числа вспышек по длительности (по уровню 0,5); классы В и С

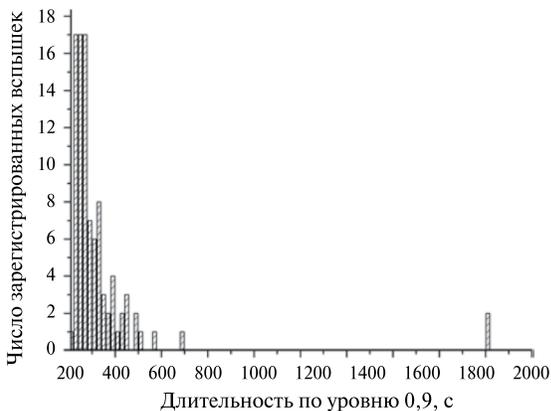


Рис. 12. Распределение числа вспышек по длительности (по уровню 0,9); классы В и С

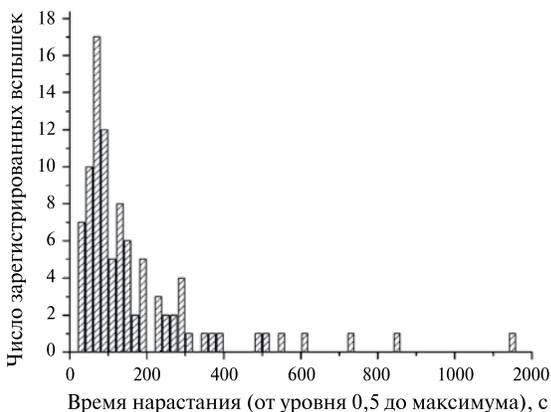


Рис. 13. Распределение числа вспышек по времени нарастания; классы В и С

с «острыми» верхушками (более 60 % событий имеют длительность по уровню 90 % не более 100 с, а свыше 90 % событий — не более 240 с) и быстрыми фронтами нарастания потоков рентгеновского излучения от вспышечных процессов (около 60 % событий имеют фронты нарастания от 50 % до максимума не более 120 с, а около 90 % событий — не более 300 с). Следует отметить, что максимальная длительность события по уровню 0,5 составила около 3000 с. Для обработанных событий классов В и С максимальная величина меры

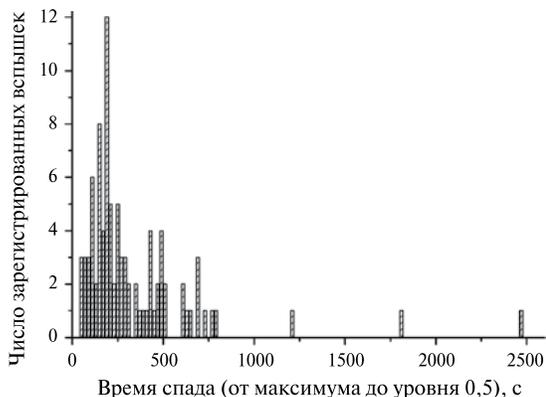


Рис. 14. Распределение числа вспышек по времени спада; классы В и С

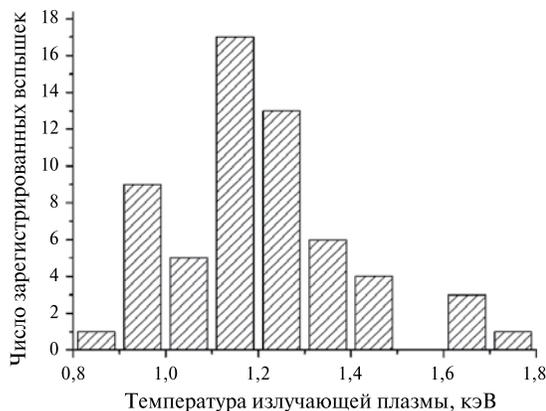


Рис. 15. Распределение числа вспышек по максимальной температуре; классы В и С

эмиссии лежит в диапазоне $(200...2500)10^{45} \text{ см}^{-3}$. Максимальная мощность излучения, зарегистрированная прибором «Пингвин-М» в ходе эксперимента, составила $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м}^2$.

В процессе наблюдений было зарегистрировано всего несколько вспышек с появлением значимых потоков жесткого рентгеновского излучения с энергиями более 15 кэВ. Как видно из графика распределения числа вспышек по максимальной температуре (см. рис. 15), основная часть зарегистрированных вспышек имеет максимальную температуру плазмы менее 1,5 кэВ.

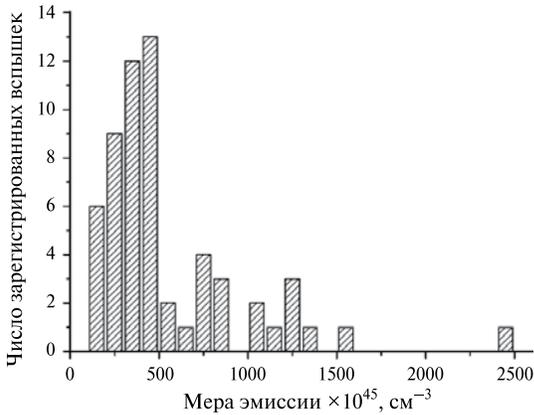


Рис. 16. Распределение числа вспышек по максимальной величине меры эмиссии; классы В и С

Заключение

Прибором «Пингвин-М» в процессе проведения эксперимента было зарегистрировано более 100 солнечных вспышек классов В и С. В данной статье приводятся предварительные результаты обработки данных с прибора «Пингвин-М». В дальнейшей обработке предполагается использование не только временных характеристик потоков излучений, но и спектральных данных, в том числе с других приборов научного комплекса, установленных на спутнике «КОРОНАС-Фотон», что должно позволить получить данные по механизмам нагрева плазмы и ускорения частиц.

Литература

- [Дергачев и др., 2009] *Дергачев В. А., Скородумов Д. В., Лазутков В. П.* и др. Поляриметрия жесткого рентгеновского излучения прибором «Пингвин-М», основанном на эффекте комптоновского рассеяния, в космическом эксперименте КОРОНАС-Фотон // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 3. С. 437–443.
- [Дергачев и др., 2010a] *Дергачев В. А., Матвеев Г. А., Круглов Е. М.* и др. Функционирование поляриметра жесткого рентгеновского излучения Солнца «Пингвин-М» на борту космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту КОРОНАС-Фотон: Тр. рабочего со-

- вещания. Россия, Таруса. 22–24 апр. 2009. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 167–182. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Дергачев и др., 2010б] *Дергачев В. А., Матвеев Г. А., Круглов Е. М.* и др. Прибор «Пингвин-М», предназначенный для исследования поляризации жесткого рентгеновского излучения Солнца в космическом проекте КОРОНАС-Фотон // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту КОРОНАС-Фотон: Тр. рабочего совещания. Россия, Таруса. 22–24 апр. 2009. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 83–106. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Котов и др., 2010] *Котов Ю. Д., Глянченко А. С., Архангельский А. И.* и др. Результаты регистрации солнечных вспышек и космических гамма-всплесков прибором «Пингвин-М» в 2009 году // Тр. науч. сессии НИЯУ МИФИ-2010. Т. 4. Физика элементарных частиц. Астрофизика и космофизика. Лазерная физика. Фотоника и информационная оптика. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 61–66.
- [Crannell et al., 1978] *Crannell C. J., Frost K. J., Matzler C.* et al. Impulsive solar X-ray bursts // *Astrophysical J.* 1978. V. 223. P. 620–637.
- [NOAA, 2010] NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), Space Weather Prediction Center (SWPC), USA. [Электронный ресурс]. Центр предсказаний космической погоды, США: Boulder, 2010. Режим доступа: <http://www.swpc.noaa.gov>.

THE RESULTS OF SOLAR X-RAY FLARES REGISTRATION BY INSTRUMENT PENGUIN-M

A. S. Glyanenko¹, Yu. D. Kotov¹, V. N. Yurov¹, A. I. Arkhangelsky¹,
A. S. Buslov¹, V. A. Dergachev², G. A. Matveev², E. M. Kruglov²,
V. P. Lazutkov², M. I. Savchenko², D. V. Skorodumov²,
A. G. Pyatigorsky²

¹ *National Research Nuclear University MEPHI
(NRNU “MEPhI”), Moscow*

² *Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS
(PhTI RAS), St. Petersburg*

Penguin-M instrument was launched in January, 30 2009 onboard CORONAS-Photon satellite. In this paper the primary results of Solar flares registration by Penguin-M in 2009 are presented. In this paper also described statistical parameters registered Solar flares of GOES B and C-classes.

Keywords: solar flare, X-ray, space experiment, results, plasma temperature, emission measured, Penguin-M, CORONAS-Photon.

Glyanenko Alexander Stepanovich — head of the scientific group, PhD, e-mail: asgl2005@rambler.ru.

Kotov Yury Dmitrievich — director, PhD, e-mail: kotov@mephi.ru.

Arkhangelsky Andrey Igorevich — scientist, e-mail: angel1966@list.ru.

Buslov Anton Sergeevich — engineer, e-mail: ASBuslov@mephi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — deputy director, PhD, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

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

Matveev Gennady Aleksandrovich — senior scientist, PhD, e-mail: genadiy.matveev@mail.ioffe.ru.

Kruglov Evgeny Mikhailovich — senior scientist, PhD, e-mail: E.Kruglov@mail.ioffe.ru.

Lazutkov Vadim Petrovich — scientist, e-mail: vadim.lazutkov@mail.ioffe.ru.

Savchenko Mikhail Ivanovich — senior scientist, PhD, 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.

**ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОНОВ
РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ
В МАЕ 2009 г. ПО НАБЛЮДЕНИЯМ
С ПОМОЩЬЮ АППАРАТУРЫ СТЭП-Ф**

А. В. Дудник

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
(ХНУ), Харьков, Украина*

Проводится анализ динамики потоков электронов во внутреннем и внешнем радиационных поясах Земли в мае 2009 г. с помощью данных, полученных со спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф комплекса научной аппаратуры «Фотон» космического аппарата (КА) «КОРОНАС-Фотон». Исследуется временная взаимосвязь повышений интенсивности частиц в поясах с различными фазами слабой магнитной бури 8 мая, а также с предшествующей ей динамикой параметров высокоскоростного потока солнечного ветра. Найдены эмпирические значения времен жизни электронов различных энергий. Обсуждается возможная зависимость времен жизни электронов во внешнем поясе от их питч-углового распределения для фиксированных значений энергии.

Ключевые слова: радиационные пояса Земли, электроны, протоны, магнитная буря, магнитосфера Земли, солнечная активность, солнечный ветер, Бразильская магнитная аномалия, ускорение частиц, питч-угловое распределение.

Введение

Изучение радиационных поясов Земли приобретает новый оттенок в связи с накоплением большого количества информации об обусловленности динамики потоков электронов и протонов в магнитосфере, главным образом, взаимодействием волн разного типа и пространственной локализации с частицами высоких энергий. В последние годы детально изучается взаимное поведение потоков частиц в радиационных поясах и низкочастотных волн — ионно-циклотронных, электромагнитных низкочастотных («хоров», «свистов» и других) — с целью определить первопричину ускорительных

процессов и питч-углового перераспределения стационарных популяций энергичных частиц во время магнитосферных бурь. Сами же бури возникают после воздействия на магнитосферу высокоскоростных потоков солнечного ветра, межпланетных ударных волн, корональных и связанных с ними межпланетных корональных выбросов массы, так или иначе связанных с проявлениями солнечной активности.

Одной из задач эксперимента с прибором СТЭП-Ф на борту космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» было изучение динамики частиц в магнитосфере Земли как результат воздействия солнечных вспышек и других проявлений солнечной активности. Ввиду низкой орбиты КА частицы, регистрируемые с помощью прибора СТЭП-Ф, были либо высыпавшимися и квазизахваченными, либо имеющими малые питч-углы на геомагнитном экваторе на L -оболочке (L — параметр Мак-Илвайна), вдоль которой они дрейфуют. Поэтому изучение поведения частиц у оснований дрейфовых оболочек на низколетящем спутнике ($h \approx 550$ км) с наклоном $82,5^\circ$ имеет свои преимущества. Другой особенностью эксперимента с прибором СТЭП-Ф является непрерывное изменение угла между осью обзора прибора и линией, соединяющей КА с поверхностью Земли по наименьшему расстоянию, в каждый момент времени в ходе текущего 96-минутного витка. В итоге прибор попеременно фиксировал потоки частиц, направленные то к поверхности планеты, то от нее, то дважды за виток — вдоль поверхности Земли, что делает данные, полученные с прибора, еще более ценными.

В первой половине 2009 г. солнечная активность была очень низкой, а геоэффективные слабые вспышки и корональные выбросы массы появились только в мае, в результате чего открылась возможность изучить динамику потоков частиц во внутренней магнитосфере. Поскольку не было зафиксировано ни протонных вспышек на Солнце, ни сильных магнитных бурь в магнитосфере Земли, основное внимание было сосредоточено на изучении изменений потоков электронов в трех энергетических диапазонах. Анализ поведения электронов проведен для периода с 1 по 31 мая 2009 г. с 30-секундным временным разрешением данных.

1. АППАРАТУРА СТЭП-Ф НА БОРТУ КА «КОРОНАС-ФОТОН»

Спутниковый телескоп электронов и протонов СТЭП-Ф состоял из блока детекторов СТЭП-ФД и блока обработки цифровой информации СТЭП-ФЭ [Дудник и др., 2010]. Основу блока СТЭП-ФД, установленного вне герметичного отсека, составляли детекторная

головка и 69 электронных каналов аналоговой обработки сигналов. Детекторная головка блока, выполненная в виде телескопической системы, включала два идентичных полупроводниковых кремниевых позиционно-чувствительных матричных детектора — D1 и D2 — толщиной 380 мкм каждый и два сцинтилляционных детектора на основе монокристаллов CsI(Tl), просматриваемых кремниевыми фотодиодами большой площади в детекторном слое D3 и фотоэлектронным умножителем в детекторе D4. Общий угол зрения телескопа — $108 \times 108^\circ$ и $98 \times 98^\circ$ для низких и высоких энергий частиц, соответственно. Большие эффективные площади полупроводниковых детекторов (по 17 см^2 каждый) и сцинтилляционных кристаллических детекторов (36 и 49 см^2) обеспечивали очень высокую чувствительность прибора.

Блок электроники СТЭП-ФЭ содержал модуль цифровой обработки, интерфейсы связи с бортовой аппаратурой спутника и контрольно-поверочной аппаратурой. Основа блока — 16-разрядный микроконтроллер со встроенным коммутируемым на 16 каналов 10-разрядным аналого-цифровым преобразователем. Информационные кадры формировались с периодом 30 с и передавались через интерфейс связи в систему сбора и регистрации научной информации спутника.

Информация с прибора содержит данные о сортах, потоках и угловых распределениях частиц с минимальным временным разрешением 2 с. В настоящей работе проводится анализ динамики потоков электронов в мае 2009 г. на основе данных из двух первых каналов прямой регистрации электронов и первого смешанного канала регистрации протонов и электронов (табл. 1).

Таблица 1

Диапазоны энергий и геометрические факторы прибора СТЭП-Ф для каналов электронов и смешанной регистрации протонов и электронов

| Каналы регистрации электронов | | Каналы смешанной регистрации протонов и электронов | |
|-------------------------------|---|--|---|
| Энергетический диапазон, МэВ | Геометрический фактор, $\text{см}^2\text{ср}$ | Энергетический диапазон, МэВ | Геометрический фактор, $\text{см}^2\text{ср}$ |
| 0,35...0,95 | 19,5 | $e (\Delta E_e = 0,18...0,51 \text{ МэВ}) + p (\Delta E_p = 3,5...3,7 \text{ МэВ})$ | 21,7 |
| 1,2...2,3 | 17,4 | $p (\Delta E_p = 3,7...7,4 \text{ МэВ}) + e (\Delta E_e = 0,55...0,95 \text{ МэВ})$ | 21,7 |
| $\geq 2,3$ | 16,2 | $\alpha (\Delta E_\alpha = 15,9...29,8 \text{ МэВ}) + p (\Delta E_p = 7,4...10,0 \text{ МэВ})$ | 21,7 |

2. ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВНУТРЕННЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Характерной особенностью орбиты космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» является его движение через практически одни и те же области околоземного пространства через каждые 15 витков в течение 1 сут. Поскольку распределение потоков частиц высоких энергий внутри магнитосферы зависит от долготы, широты и высоты, правомерно сравнение интенсивностей в одних и тех же или близких по координатам точках пространства. Близкая к круговой орбита КА позволяет эти требования ограничить двумя параметрами — широтой и долготой. С увеличением энергии частиц требования по близости координат усиливаются ввиду проявления более выраженных особенностей в распределениях частиц и их небольшой популяции. Объединение всех данных в течение одного и того же витка орбиты КА на протяжении периода с 1 по 31 мая 2009 г. дало возможность проследить динамику электронов высоких энергий в зависимости от условий в межпланетном пространстве и внутри магнитосферы Земли.

На рис. 1 и 2 показан временной ход спектральной плотности потока частиц канала регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,18...0,51$ МэВ и протонов с энергиями $\Delta E_p = 3,5...3,7$ МэВ и электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,35...0,95$ МэВ в период с 1 по 31 мая 2009 г. Заметно увеличение плотности потоков частиц в обоих диапазонах энергий и их продолжительное существование во внешнем поясе в период с 7 по 15 мая, а также регистрация быстро изменяющихся потоков во внутреннем поясе в периоды 7–10, 15–16 и 24 мая. Заметна также асимметрия в значениях потоков во внешнем поясе в южном и северном полушариях на протяжении каждого витка. Такая асимметрия связана с взаимно перпендикулярным положением оси OZ спутника, стабилизированной по направлению на Солнце, и оси обзора блока детекторов СТЭП-ФД. Ось OX спутника, вдоль которой направлена ось конуса обзора блока детекторов СТЭП-ФД, совершала медленный дрейф по отношению к гелиоцентрической системе координат. Медленное вращение осей OX и OY КА было заметно по показаниям приборного комплекса СТЭП-Ф только между начальными и последними днями месяца, в основном, для электронов с энергиями $E_e > 1,2$ МэВ. Ось OX КА, так же как и ось OY , была попеременно направленной то в сторону поверхности Земли, то в противоположную сторону. Это означает, что если в какой-то произвольно взятый момент времени t_i витка КА ось конуса приема прибора была направлена вверх от поверхности

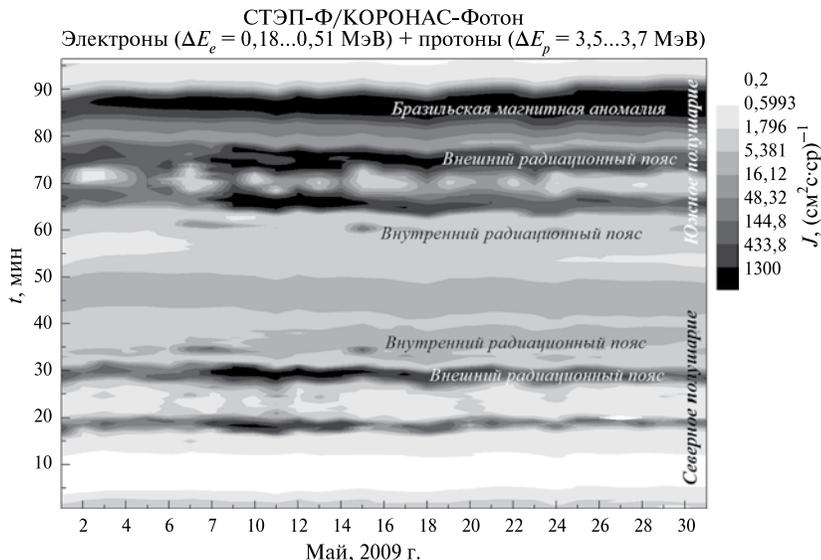


Рис. 1. Временной ход спектральной плотности потока частиц канала регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,18...0,51$ МэВ и протонов с энергиями $\Delta E_p = 3,5...3,7$ МэВ в период с 1 по 31 мая 2009 г. на одном и том же (первом с начала суток) витке орбиты спутника «КОРОНАС-Фотон»

Земли, то через время $t = t_i \pm (T_B/2)$ ось блока детекторов СТЭП-ФД оказывалась направленной в сторону поверхности Земли, где T_B — период обращения спутника в течение одного витка. В результате на протяжении каждого витка прибор регистрировал потоки частиц, направленные как от поверхности Земли, так и вертикально вниз к поверхности планеты. Направленностью телесного угла обзора в плоскости XU спутника обусловлена асимметрия и в регистрации фоновых потоков вне радиационных поясов и Бразильской магнитной аномалии. Исходя из значений зарегистрированных потоков можно предположить, что в рассматриваемый период прибор регистрировал потоки, направленные преимущественно от Земли в течение 5...15-й мин с момента начала каждого витка, в течение же 52...62-й мин прибор регистрировал потоки, направленные преимущественно к Земле. Ввиду непрерывного перемещения оси конуса обзора телескопа прибор, соответственно, регистрировал потоки, направленные преимущественно вдоль поверхности Земли, в течение 29...39-й и 75...85-й мин с момента начала витков. Последние два временных интервала указывают на более вероятную регистрацию

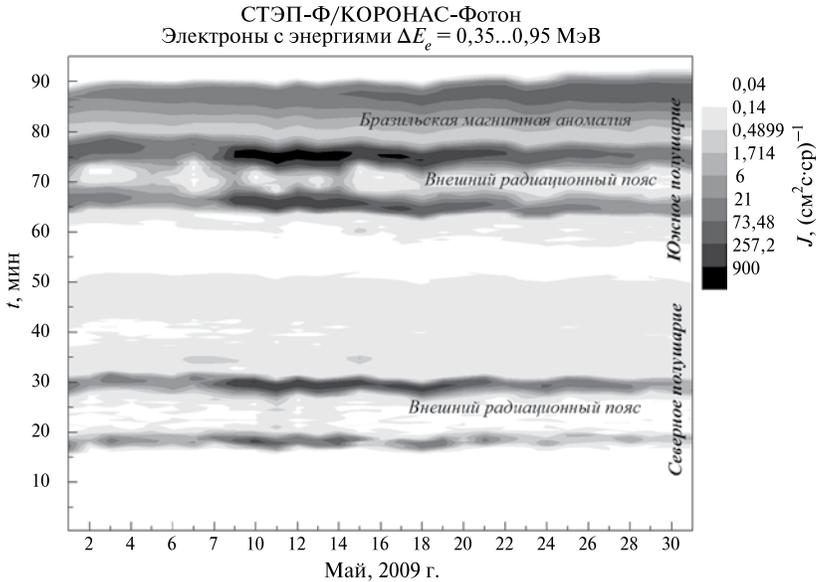


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для канала электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,35...0,95$ МэВ

захваченных и квазизахваченных электронов с большими питч-углами на малой высоте орбиты КА, в то время как первые два говорят о более вероятной регистрации высыпающихся и квазизахваченных частиц. Это подтверждается регистрацией более значительных и устойчивых потоков электронов внутреннего пояса в отдельные периоды 7-9 и 15 мая в северном полушарии (~34-я мин), чем в южном (~62-я мин полета КА).

3. ПИТЧ-УГЛОВАЯ ДИФФУЗИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ

С целью изучения динамики потоков электронов внешнего радиационного пояса с энергиями $\Delta E_e = 0,18...0,51$ и $\Delta E_e = 0,35...0,95$ МэВ были построены временные зависимости в области максимумов распределений спектральной плотности потока частиц (рис. 3 и 4). К анализу динамики потоков частиц привлеклись все четыре пересечения области внешнего пояса в течение одного витка — по два на восходящем и нисходящем узлах орбиты КА. Кривые 1 и 2 на обоих рисунках относятся к пересечению спутником внешнего радиационного

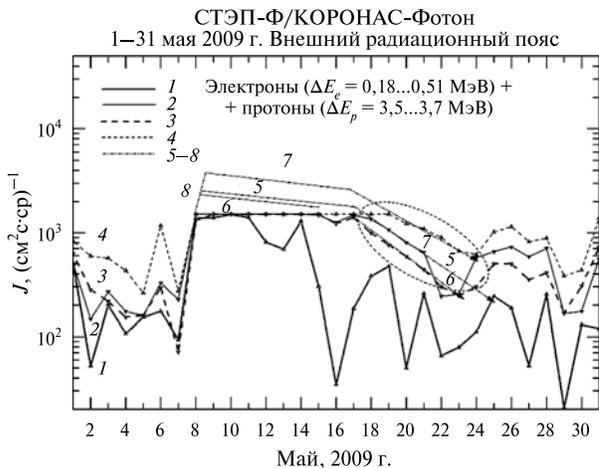


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для четырех прохождений внешнего радиационного пояса Земли в максимуме интенсивности частиц для каждого витка орбиты КА. Кривые 1 и 2 относятся к пересечению спутником внешнего радиационного пояса в северном полушарии; 3 и 4 — в южном полушарии. Штрихпунктирные прямые 5–8 — аппроксимации экспоненциальных уменьшений интенсивности в период с 17 по 24 мая и восстановлений действительных значений потоков в период с 9 по 17 мая. Вытянутым овалом обозначен период экспоненциального спада интенсивности частиц

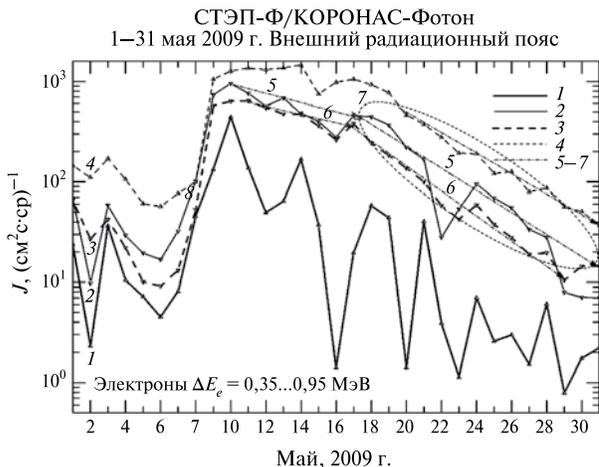


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для энергетического диапазона $\Delta E_e = 0,35...0,95$ МэВ

пояса в северном полушарии, 3 и 4 — в южном полушарии: кривые 1 и 4 отображают пересечение пояса на восходящем витке орбиты, 2 и 3 — на нисходящем витке. Оба рисунка показывают внезапное увеличение спектральной плотности потока частиц 8–9 мая в более чем 10 раз и медленное падение их интенсивности вплоть до конца месяца. Кривая 1, отображающая поведение частиц, направленных преимущественно от земной поверхности, показывает заметно меньшую их спектральную плотность потока в обоих диапазонах энергий. Эти потоки являются сильно флуктуирующими. Обращает на себя внимание регулярное и закономерное уменьшение интенсивности счета электронов в период с 17 по 24 мая (см. рис. 3) и с 10 по 30 мая (см. рис. 4). Эти промежутки времени обведены наклонными пунктирными овалами. Штрихпунктирные прямые 5–8, проведенные через экспериментальные точки постепенного возвращения к стационарному распределению частиц во внешнем поясе, отражают экспоненциальный спад спектральной плотности частиц и могут быть аппроксимированы функцией $J = K \exp(-t/T)$, где T — время жизни электронов в радиационном поясе [Baker et al., 2007].

Рисунок 4 показывает существование, как минимум, двух составляющих во времени восстановления стационарных (захваченных) потоков электронов внешнего пояса: в период с 10 по 16 мая T_1 и в период с 17 по 30 мая T_2 . Как будет показано ниже, участок T_1 относится к фазе восстановления слабой магнитной бури и, соответственно, не может включать оценку времени жизни электронов ввиду непрерывной подпитки все новым количеством частиц вследствие механизмов ускорения при распаде кольцевого тока. Эмпирическое время жизни электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,35...0,95$ МэВ можно определить по кривым 2, 3 и 4 рис. 4. Его значение оказалось приблизительно одинаковым для всех трех прохождений внешнего пояса и составило $T_2 \approx 4,4 \pm 0,9$ дня.

Для канала регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,18...0,51$ МэВ и протонов с энергиями $\Delta E_p = 3,5...3,7$ МэВ (см. рис. 3) действительные потоки в период с 8 по 19 мая на пересечениях пояса 2, 3 и 4 не известны в связи с ограниченными возможностями прибора регистрировать большие темпы счета. И, если бы не было следующего увеличения числа частиц в период с 23 по 29 мая, потоки вернулись бы к уровню фоновых колебаний захваченных электронов, которые наблюдались в период с 2 по 7 мая. Продолжение этих прямых аппроксимации с учетом анализа рис. 4 в сторону начала резкого повышения 8 мая указывает на возможность восстановления максимальных плотностей потоков, значения которых составили $J_{tot} \approx (2,5...3,8) \cdot 10^3$ электрон/см²с·ср.

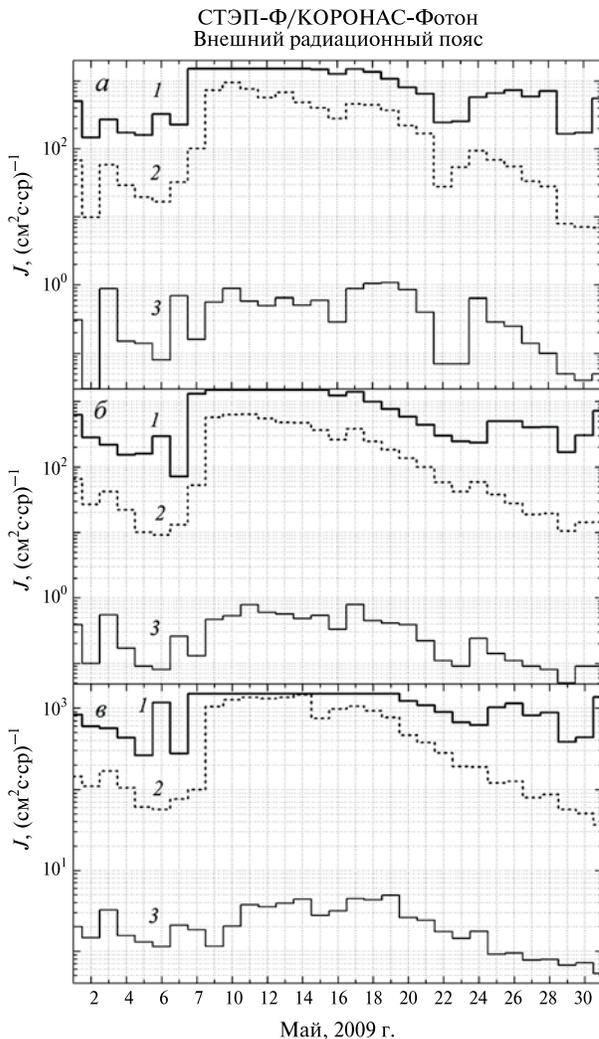


Рис. 5. Временной ход спектральной плотности потоков электронов в трех энергетических диапазонах во внешнем радиационном поясе в максимумах его потоков при пересечении спутником пояса в северном (*а*) и южном (*б, в*) полушариях; *1* — канал регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,18...0,51$ МэВ и протонов с энергиями $\Delta E_p = 3,5...3,7$ МэВ; *2* и *3* — каналы регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,35...0,95$ МэВ и $\Delta E_e = 1,2...2,3$ МэВ, соответственно

Оценки времени жизни для электронов внешнего пояса с энергиями $\Delta E_e = 0,18...0,51$ МэВ дают значение $T_2 \approx 4,1 \pm 1,1$ дня, которое практически совпадает с таким же значением для электронов с энергиями $E_e < 1$ МэВ.

Для изучения зависимости времени жизни T от энергии частиц к анализу динамики потоков был привлечен дополнительно еще один канал регистрации электронов — с энергиями $\Delta E_e = 1,2...2,3$ МэВ. На рис. 5 изображен временной ход спектральной плотности потоков электронов в трех энергетических диапазонах во внешнем радиационном поясе в максимумах его потоков при пересечении спутником пояса в северном полушарии на нисходящем витке орбиты КА (см. рис. 5а); на нисходящем и восходящем витках орбиты КА в южном полушарии (см. рис. 5б и в). Отчетливо виден экспоненциальный спад спектральной плотности потоков электронов от самых малых энергий до релятивистских с $E_e \approx 2,3$ МэВ. Скорость спада интенсивности частиц практически одинакова для всех энергий, за исключением случая пересечения пояса в северном полушарии (см. рис. 5а), где просматривается тенденция уменьшения времени жизни с увеличением энергии частиц. Наиболее отчетливо эта тенденция видна для периода с 24 по 29 мая.

Вероятнее всего, разные времена жизни для электронов больших энергий связаны с вращением конуса приема прибора СТЭП-Ф относительно оси OZ спутника и регистрацией в связи с этим популяций частиц с разными питч-углами. Во время пересечения внешнего пояса в северном полушарии на $\sim 29...32$ -й мин конус приема поворачивался от направления, перпендикулярного поверхности Земли, к плоскости, параллельной ее поверхности в данный момент времени, регистрируя таким образом с большей вероятностью высыпаящиеся и квазизахваченные частицы. Таким образом, можно сделать вывод, что существует зависимость времени жизни электронов с фиксированными энергиями от распределения их скоростей по отношению к направлению магнитного поля Земли. Иными словами, соотношение числа захваченных и высыпаящихся электронов непрерывно меняется на фазе восстановления стационарного распределения внешнего радиационного пояса Земли.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ЭЛЕКТРОНОВ ВНУТРЕННЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ

Как видно на рис. 1, потоки электронов внутреннего радиационного пояса вне области Бразильской магнитной аномалии, заметно превышающие фоновые уровни, в рассматриваемый период

регистрировались прибором СТЭП-Ф в отдельные дни: 7–10, 15–16 и 24 мая. Распределение спектральной плотности потоков электронов в диапазоне энергий $\Delta E_e = 0,35...0,95$ МэВ по L -оболочкам в течение всего месяца (рис. 6) и в периоды 7–10, 15–18 мая (рис. 7) на нисходящем витке орбиты КА в северном полушарии показали быстрое уменьшение ускоренных 7 и 15 мая пучков частиц на $L \approx 2,5$. Из рис. 7 видно также типичное соотношение максимальных значений плотностей потоков во внутреннем и внешнем радиационных поясах на высоте ~ 600 км, которое составило величину $\sim (0,4...1) \cdot 10^2$ для 7 и 15–17 мая и $\sim (2...4) \cdot 10^3$ для периодов возмущенного внешнего пояса, после 9 мая. Особенностью динамики потоков электронов явилось то, что быстрая инжекция и распад популяции частиц во внутреннем поясе предшествовали на $\sim 1,5...2$ дня ускорительным процессам и медленному распаду внешнего пояса для обоих периодов — 7–9 и 15–18 мая.

Рисунок 8 показывает динамику плотности потока электронов внутреннего радиационного пояса в максимуме темпа счета в северном полушарии в обоих диапазонах энергий.

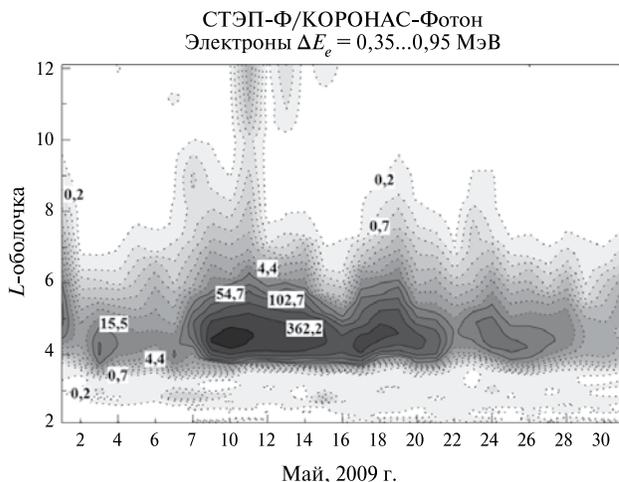


Рис. 6. Распределение спектральной плотности потоков электронов в диапазоне энергий $\Delta E_e = 0,35...0,95$ МэВ по дрейфовым L -оболочкам для одного (первого с начала текущих суток) из 15 ежесуточных витков орбиты КА на нисходящем витке в северном полушарии в период с 1 по 31 мая 2009 г. Числами на графике обозначены значения спектральной плотности потока частиц в единицах $(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{sr})^{-1}$

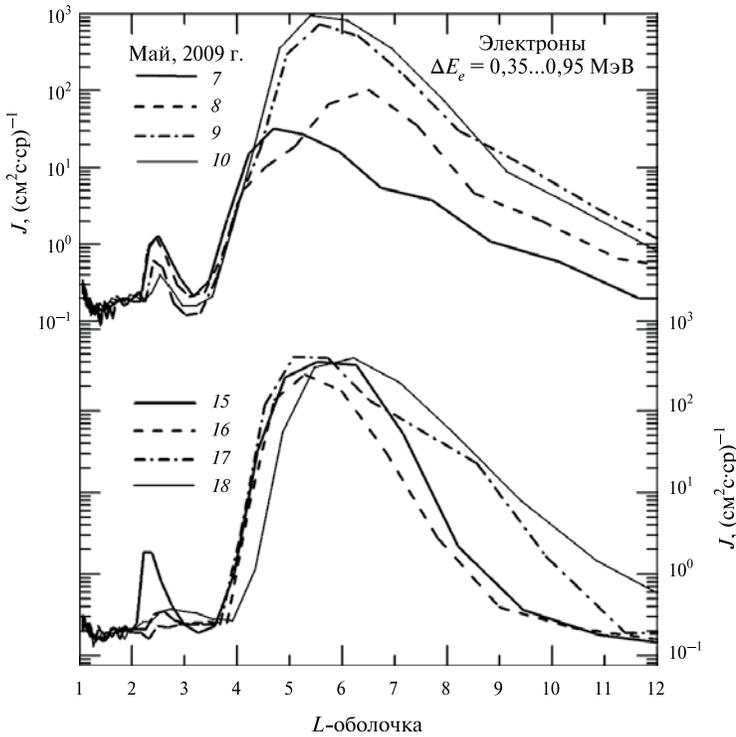


Рис. 7. Распределение спектральной плотности потоков электронов J в диапазоне энергий $\Delta E_e = 0,35 \dots 0,95$ МэВ по L -оболочкам для первых с начала текущих суток нисходящих в северном полушарии витках орбиты КА в периоды 7–10 и 15–18 мая

Заметен экспоненциальный характер спада интенсивности после 8 и 17 мая для низких энергий, и после 8 мая — для субрелятивистских энергий. Эмпирическое значение времени жизни электронов внутреннего пояса для этих трех временных участков составило $T \approx 1,5 \pm 0,8$ дня, т. е. соотношение времен жизни электронов внешнего и внутреннего поясов в мае 2009 г. составило ~ 3 .

Еще одной особенностью было уменьшение в ~ 6 раз на $L \approx 4,5$ и увеличение в ~ 15 раз на $L \approx 6,5$ спектральной плотности потоков частиц 8 мая (см. рис. 7). «Обратной» радиальной диффузией внешнего пояса эту особенность нельзя объяснить, поскольку внутренние границы внешнего радиационного пояса совпадают в рассматриваемый период с 7 по 10 мая.

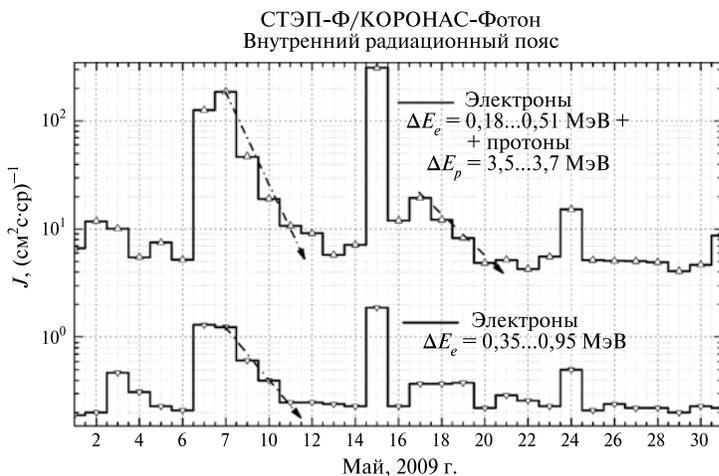


Рис. 8. Динамика плотности потоков частиц во внутреннем радиационном поясе в максимуме темпа счетов в северном полушарии в канале регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,18...0,51$ МэВ, протонов с энергиями $\Delta E_p = 3,5...3,7$ МэВ и в канале регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,35...0,95$ МэВ

5. ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВНЕШНИХ СЛОЯХ МАГНИТОСФЕРЫ

Период времени, предшествующий началу и совпадающий с началом повышений потоков во внутреннем и внешнем радиационных поясах в первой половине мая, был проанализирован более детально. 5 мая было обнаружено повышение плотности потока частиц в десятки раз во временном окне между двумя соседними прохождениями спутником внешнего радиационного пояса в южном полушарии (рис. 9). Подобное увеличение потоков (абсолютная величина) в течение месяца повторялось одновременно с ростом спектральной плотности потока электронов во внешнем радиационном поясе. Увеличение интенсивности электронов во внешних слоях магнитосферы до значений, сравнимых с интенсивностью частиц во внешнем поясе, было единственным в рассматриваемый период. С целью поиска источника генерации повышенного числа частиц была построена временная зависимость отношений потоков в области временного зазора между двумя прохождениями внешнего пояса в южном полушарии на $L \geq 7,5$ к потокам в максимумах значений соседнего прохождения внешнего пояса на 65...70-й мин витков

(рис. 10а). На рис. 10а видно, что 5 мая интенсивности частиц в максимуме пояса и в области между прохождениями пояса были одинаковыми для низкоэнергетических электронов. Следует отметить, что в этот день потоки частиц во внешнем и внутреннем радиационных поясах носили спокойный характер (см. рис. 3, 4 и 8).

Одним из возможных источников повышенных потоков частиц во внешних слоях магнитосферы могли быть потоки электронов низких и субрелятивистских энергий в межпланетном пространстве. Аппаратура EPHIN прибора COSTEP, установленная на спутнике солнечного патруля SOHO [Müller-Mellin et al., 1995], зарегистрировала 5 мая увеличение потоков электронов в диапазоне энергий $\Delta E_e = 0,25...0,7$ МэВ в $\sim 10...20$ раз и в диапазоне энергий $\Delta E_e = 0,67...3,0$ МэВ — в $\sim 3...4$ раза. Увеличение потоков электронов произошло во временном интервале между ~ 8 и ~ 12 ч мирового времени (UT) (рис. 10б, в). Такое же повышение интенсивности потоков было надежно зафиксировано на спутнике STEREO Ahead, в то время как на его двойнике — STEREO Behind — величины интенсивностей электронов по данным аппаратуры IMPACT не отличались от фоновых значений, что подтверждает направленное распространение электронов вдоль паркеровских спиралей по направлению к Земле как результат одной из вспышек на Солнце.

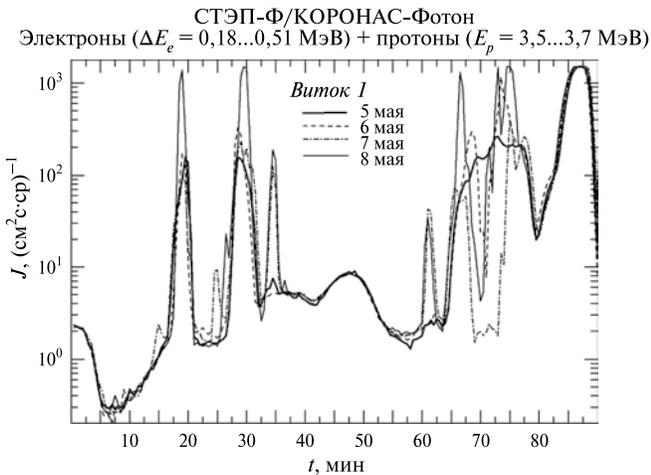


Рис. 9. Профили прохождения одного и того же 96-минутного витка в период с 5 по 8 мая для плотности потоков канала регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,18...0,51$ МэВ и протонов с энергиями $\Delta E_p = 3,5...3,7$ МэВ

На протяжении всего оставшегося периода до конца месяца других увеличений интенсивности потоков электронов и протонов в межпланетном пространстве не было зафиксировано.

С другой стороны, прибором СТЭП-Ф повышение интенсивности потоков электронов на $L \approx 7,5$ было зарегистрировано в короткий промежуток времени — от 01 ч 28 мин UT до 01 ч 35 мин UT (см. рис. 9, минуты 66...73 с начала витка) — т. е. за 7...8 ч до прихода электронов солнечного происхождения к границам магнитосферы Земли. Анализ же потоков на других витках орбиты КА «КОРОНАС-Фотон» в течение 5 мая с $L \geq 10$ не показал даже незначительных повышений интенсивности потоков электронов. Это указывает на то, что электроны солнечного или межпланетного происхождения, зафиксированные приборными комплексами COSTEP/SOHO и IMPACT/STEREO Ahead, не послужили источником пополнения магнитосферных электронов 5 мая.

Привлечение данных о параметрах солнечного ветра со спутников ACE и SOHO (рис. 10г–е) показало, что увеличению скорости 6 мая и плотности солнечного ветра на исходе 5 мая по данным протонного монитора эксперимента CELIAS/MTOF/PM предшествовало увеличение разброса отношений компонент скорости солнечного ветра к ее средней величине, в частности V_x/V . Различного типа нерегулярности, в том числе и волны разной природы в высокоскоростных потоках солнечного ветра, исследуются на протяжении многих лет. Например, на спутниках миссии STEREO были обнаружены и исследованы сильные узкополосные ионно-циклотронные волны в солнечном ветре вблизи орбиты Земли, появляющиеся чаще в тех случаях, когда межпланетное магнитное поле имеет более радиальную структуру, чем известная паркеровская спираль [Jian et al., 2009]. Эти волны с большей вероятностью генерируются вблизи Солнца и переносятся сверхальвеновским солнечным ветром. Флуктуации турбулентности магнитного поля в солнечном ветре имеют неодинаковые скорости распространения в различных направлениях, как показали недавно коррелированные исследования спектральных флуктуаций межпланетного магнитного поля на четырех спутниках миссии CLUSTER [Narita et al., 2010]. Было экспериментально обнаружено, что волны турбулентности, движущиеся перпендикулярно магнитному полю, имеют большую мощность, чем волны, направленные в сторону вектора межпланетного магнитного поля. Коэффициент анизотропии составляет около 1,6. Обнаруженное явление может означать, что в случае нерадиальной по отношению к Солнцу направленности межпланетного поля вблизи магнитопаузы Земли сначала появляются волны турбулентности

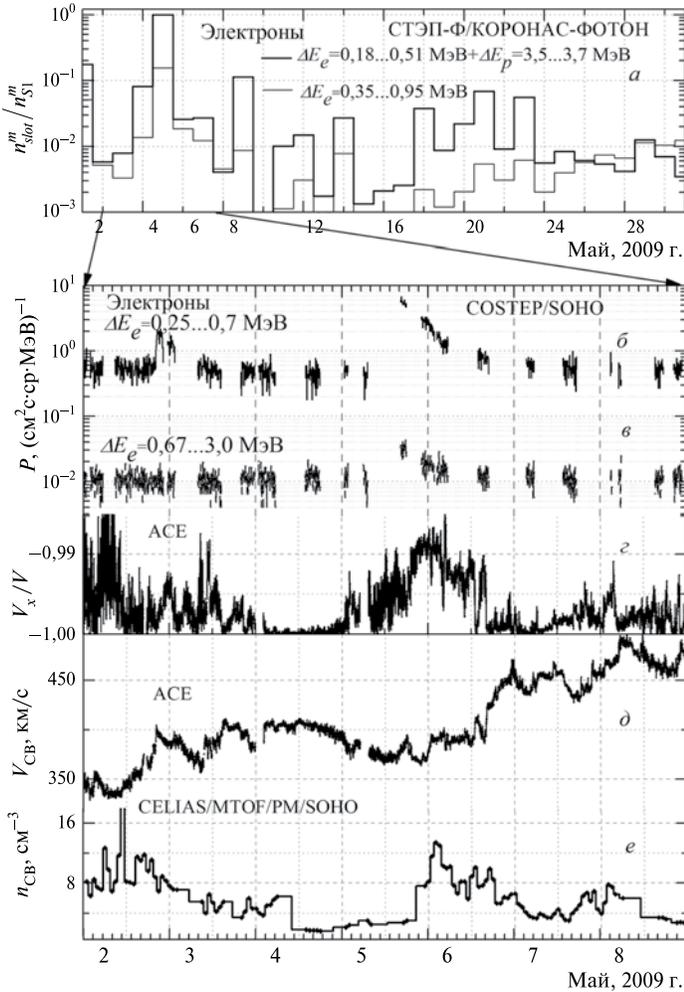


Рис. 10. Временной ход спектральной плотности потока электронов P в двух энергетических диапазонах в межпланетном пространстве вблизи магнитосферы Земли по данным эксперимента COSTEP (Comprehensive SupraThermal and Energetic Particle Analyzer) на космическом аппарате SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) (*б*, *в*), параметров солнечного ветра — отношений скоростей V_x/V (*г*), средней скорости солнечного ветра V_{CB} (*д*) и плотности солнечного ветра n_{CB} (*е*) по данным аппаратуры спутников ACE (Advanced Composition Explorer) и SOHO в период с 2 по 8 мая в сравнении с временным ходом темпов счета отношений числа частиц n_{slot}^m/n_{S1}^m во временном промежутке между двумя пересечениями внешнего

радиационного пояса в южном полушарии на $L \geq 7,5$ и в максимуме внешнего радиационного пояса по данным прибора СТЭП-Ф для канала регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,18...0,51$ МэВ, протонов с энергиями $\Delta E_p = 3,5...3,7$ МэВ и канала регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,35...0,95$ МэВ (*a*)

поля и только с некоторым запозданием регистрируется увеличение плотности, а затем и скорости солнечного ветра. Эти волны, проникнув вглубь магнитосферы Земли, могут взаимодействовать с частицами внешней оболочки внешнего радиационного пояса и изменить их пичч-угловое распределение. В результате частицы могут рассеяться в конус потерь, а волны потерять свою мощность на внешних границах внешнего радиационного пояса. Как видно на рис. 3 и 4, потоки в самом же внешнем поясе в максимальных значениях потоков 5 мая остались неизменными по сравнению с предыдущими днями.

6. ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА, ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 11 показан временной ход основных параметров, характеризующих геофизическую обстановку в первой половине мая 2009 г.: полярного AA -индекса, среднеширотного K_p -индекса, экваториального D_{st} -индекса, скорости и плотности солнечного ветра по данным протонного монитора CELIAS/MTOF/PM, установленного на спутнике SOHO. Здесь же приведены данные о потоках электронов с энергиями более $E_e > 2$ МэВ и протонов с энергиями $E_p = 0,8...4,0$ МэВ на геостационарной орбите, измеренные на КА GOES11. Потоки частиц во внешних слоях магнитосферы измерялись одновременно тремя спутниками серии GOES-10, -11 и -12, однако общий тренд временного хода интенсивности частиц каждый раз в целом повторялся, поэтому на рис. 11е, ж приведены результаты измерений только с одного спутника.

Панели *a*, *b* и *в* рис. 11 показывают, что в период с 6 по 14 мая произошла слабая магнитная буря с $D_{st} > -30$ нТл, главная фаза которой наступила 8 мая в 6...9 ч UT. В этот же промежуток времени значения AA - и K_p -индексов были максимальными. Начальная фаза бури была зафиксирована в начале суток 6 мая и, скорее всего, не имела выраженного внезапного импульса: резкое повышение плотности солнечного ветра, увеличение значения D_{st} -индекса произошли в 0...2 ч UT 6 мая. Локальное же повышение значений индексов

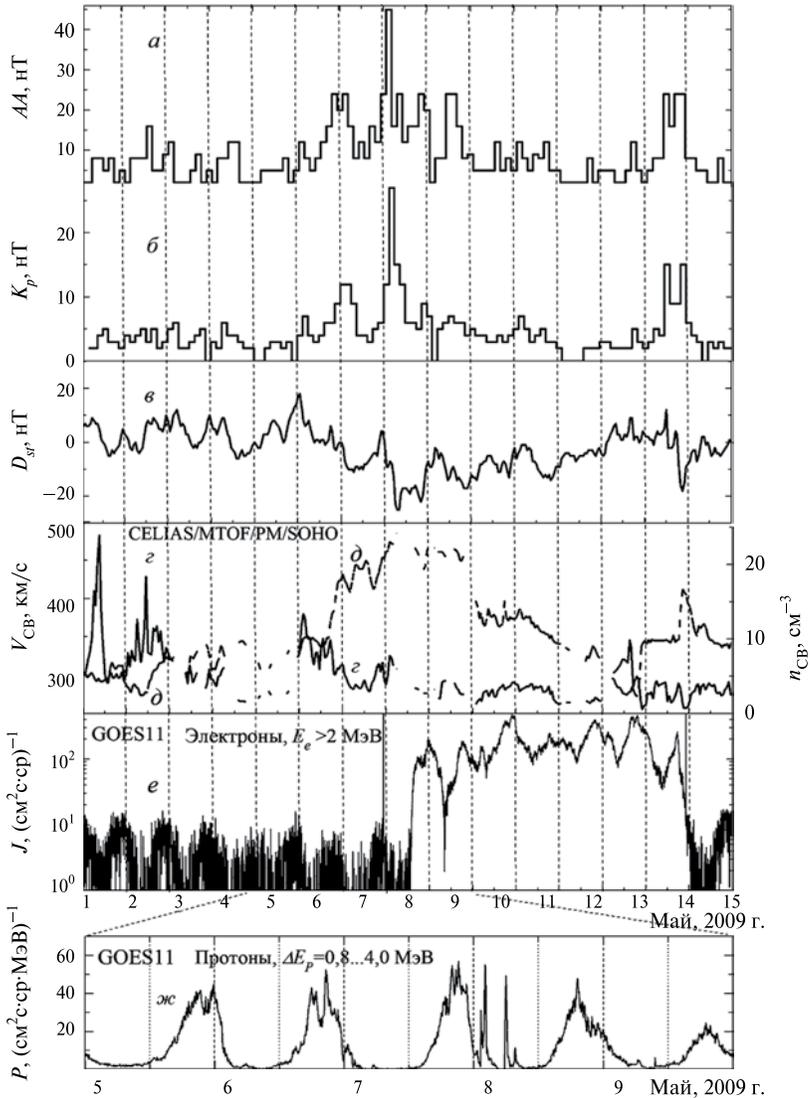


Рис. 11. Геофизическая обстановка в первой половине мая: *а* — AA-индекс; *б* — K_p -индекс; *в* — D_{st} -индекс; плотность (*г*) и скорость (*д*) солнечного ветра по данным протонного монитора эксперимента CELIAS/MTOF/PM/SOHO; потоки электронов с энергиями $\Delta E_e > 2$ МэВ (*е*) и протонов с энергиями $\Delta E_p = 0,8...4,0$ МэВ (*ж*) на геостационарной орбите по данным аппаратуры спутника GOES11

магнитного поля Земли в начальной фазе развития бури, совпавшее с максимальным градиентом роста скорости солнечного ветра, наблюдалось на рубеже 6 и 7 мая. Именно 7 мая, до наступления главной фазы магнитной бури, наблюдалось увеличение потоков электронов во внутреннем радиационном поясе Земли. При этом в максимуме внешнего пояса изменений потоков в начальной фазе развития магнитной бури не наблюдалось. Можно предположить, что неоднородности солнечного ветра, передавшиеся и трансформированные в магнитосфере Земли, воздействуют непосредственно на поведение частиц во внутреннем поясе более эффективно, чем во внешнем поясе. Второе повышение потоков электронов во внутреннем радиационном поясе 15 мая также ассоциируется с кратковременным повышением скорости солнечного ветра, увеличением значений AA - и K_p -индексов и только подтверждает ранее сделанное предположение. Магнитная же буря в эти дни (14–16 мая) была очень слабой и едва заметной.

Наступление главной фазы магнитной бури 8 мая совпало с резким и значительным, более чем в 10 раз, увеличением интенсивности потоков электронов во внешнем радиационном поясе в двух энергетических диапазонах по данным прибора СТЭП-Ф, а также с увеличением потоков электронов с $E_e > 2$ МэВ на геостационарной орбите по данным КА серии GOES. Как уже указывалось, увеличение интенсивности по данным прибора СТЭП-Ф произошло не на L -оболочке, отвечающей максимуму в распределении частиц за сутки до главной фазы магнитной бури, а на $L \approx 6,5$. Более того, на $L \approx 4,5$ произошло уменьшение числа частиц во время главной фазы магнитной бури. Рисунок 5 (панели a , b) показывает уменьшение интенсивности электронов с энергиями $\Delta E_e = 1,2...2,3$ МэВ 8 мая даже в максимуме распределений их числа независимо от смещения по L -оболочке. Такое поведение частиц во время наступления главной фазы магнитной бури было отмечено и ранее. Например, на японском спутнике Акебонo, имеющем сильно вытянутую эллиптическую орбиту, с помощью монитора RDM было зарегистрировано значительное уменьшение числа электронов в диапазонах энергий $\Delta E_e = 0,3...0,95$ МэВ и $\Delta E_e = 0,95...2,5$ МэВ [Obara et al., 2000]. Это уменьшение, как и почти полное исчезновение потоков электронов с энергиями $E_e > 2,5$ МэВ, наблюдалось во внешнем радиационном поясе Земли во время наступления главной фазы магнитной бури с $D_{st} = -116$ нТ 4 ноября 1993 г.

Рисунок 11e демонстрирует сохранение повышенных потоков электронов на геостационарной орбите на протяжении всей фазы восстановления магнитной бури, до конца 14 мая. Почти такую же

неизменность усиленных потоков показал и прибор СТЭП-Ф в тот же самый временной интервал (см. рис. 4).

Только начиная с 16–17 мая на КА «КОРОНАС-Фотон» стали фиксироваться понижения потоков электронов внешнего пояса в максимумах их значений. Таким образом, наблюдалась не только хорошая корреляция данных, полученных со спутников серии GOES и с прибора СТЭП-Ф на борту КА «КОРОНАС-Фотон», но и заметна связь динамики частиц во внешнем поясе с фазой восстановления магнитной бури (D_{st} -индекс, рис. 11б) в большей степени, чем с параметрами солнечного ветра, в частности, с его скоростью (рис. 11д).

На рис. 11ж виден ярко выраженный суточный ход потоков протонов на геостационарной орбите с энергиями, включающими диапазон регистрации протонов прибором СТЭП-Ф: $\Delta E_p = 3,5...3,7$ МэВ. Видно, что только в момент главной фазы развития магнитной бури наблюдались кратковременные повышения интенсивности потока протонов. В то же время канал регистрации электронов с энергиями $\Delta E_e = 0,18...0,51$ МэВ и протонов с энергиями $\Delta E_p = 3,5...3,7$ МэВ прибора СТЭП-Ф зафиксировал повышенные потоки в десятки раз в гораздо более длительный период, с 8 по 15 мая. Таким образом, можно с уверенностью констатировать, что этот канал отражает поведение электронов низких энергий, а относительный вклад числа протонов в узком энергетическом окне $\Delta E_p = 3,5...3,7$ МэВ ничтожно мал.

Возможными источниками повышений потоков электронов в обоих поясах на разных фазах магнитных бурь — слабой 8 мая и очень слабой 15 мая — может быть усиление процессов взаимодействий типа волна — частица в связи с усилением интенсивности различного типа волн, в частности очень низкочастотных электромагнитных волн [Hudson et al., 1999; Rostoker et al., 1998]. Однако как ускорительные механизмы, так и механизмы питч-углового рассеяния частиц на разных фазах развития магнитной бури — начальной, главной, ранней и поздней фазах восстановления, — скорее всего, различны и требуют дальнейшего изучения [Nakamura et al., 2002].

Заключение

В мае 2009 г. спутниковым телескопом электронов и протонов СТЭП-Ф комплекса научной аппаратуры «Фотон» космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» были зарегистрированы варьирующие потоки электронов радиационных поясов Земли в разных диапазонах энергий, ассоциированные с динамикой параметров солнечного

ветра и повышением уровня магнитосферной активности. Увеличение потоков частиц во внешних границах внешнего радиационного пояса 5 мая на $L \geq 7,5$ и во внутреннем радиационном поясе на $L \approx 2,5$ вне области Бразильской магнитной аномалии 7 мая на начальной фазе слабой магнитной бури связаны, с большей вероятностью, с волновыми процессами, источниками которых являются различные нерегулярности высокоскоростных потоков солнечного ветра. Дальнейшая же динамика частиц, связанная с ускорительными механизмами и попаданием их в конус потерь в главной и восстановительных фазах бури, больше ассоциируется с процессами формирования и распада кольцевого тока и генерацией в связи с этим низкочастотных волн во внутренней магнитосфере.

Получены эмпирические значения времен жизни электронов радиационных поясов для экспоненциального характера спада плотности потока частиц после окончания магнитной бури, составившие для внутреннего пояса $T \approx 1,5$ сут и для внешнего — $T \approx 4,5$ сут, т. е. соотношение времен жизни электронов внешнего и внутреннего радиационных поясов в мае 2009 г. составило ~ 3 . Просматривается тенденция уменьшения времени жизни во внешнем радиационном поясе с увеличением энергии электронов, а также зависимость времени жизни от питч-угла при фиксированной энергии. Однако последние положения нуждаются в более глубоких исследованиях и накоплении статистического материала.

Автор благодарен коллективу Института астрофизики НИЯУ МИФИ за систематическую помощь в обеспечении данными с прибора СТЭП-Ф, И. Н. Мягковой за полезные обсуждения, Е. В. Курбатову за наземное техническое сопровождение летных испытаний прибора СТЭП-Ф.

Литература

- [Дудник и др., 2010] Дудник А. В., Персиков В. К., Бошер Д., Котов Ю. Д., Юров В. Н. Экспериментальные возможности спектрометра-телескопа СТЭП-Ф и первые результаты радиационного картографирования // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту «КОРОНАС-ФОТОН»: Тр. рабочего совещания. Россия, Таруса. 22–24 апреля 2009. М.: ИКИ РАН. 2010. С. 217–228 (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Baker et al., 2007] Baker D. N., Kanekal S. G., Horne R. B., Meredith N. P., Glauert S. A. Low-Altitude Measurements of 2...6 MeV Electron Trapping Lifetimes at $1,5 \leq L \leq 2,5$ // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34(20). L20110. 5. doi: 10.1029/2007GL031007.

- [Hudson et al., 1999] *Hudson M. K., Elkington S. R., Lyon J. G., Goodrich C. C., Rosenberg T. J.* Radiation Belt Dynamics Driven by Solar Wind Radiation // Sun-Earth Plasma Connections: Monograph / Ed. J. L. Burch et al. Washington. D. C.: AGU, 1999. V. 109. P. 171.
- [Jian et al., 2009] *Jian L. K., Russell C. T., Luhmann J. G., Strangeway R. J., Leisner J. S., Galvin A. B.* Ion Cyclotron Waves in the Solar Wind Observed by STEREO Near 1 AU // The Astrophysical J. Letters. 2009 V. 701. N. 2. P. L105–L109. doi: 10.1088/0004-637X/701/2/L105.
- [Müller-Mellin et al., 1995] *Müller-Mellin R., Kunow H., Fleibner V., Pehlke E., Rode E., Röschman N., Scharnberg C., Sierks H., Rusznyak P., Mckenna-Lawlor S., Elendt I., Sequeiros J., Meziat D., Sanchez S., Medina J., Del Peral L., Witte M., Marsden R., Henrion J.* COSTEP-Comprehensive Suprathermal and Energetic Particle Analyzer // Solar Physics. 1995. V. 162. P. 483–504. doi: 10.1007/BF00733437.
- [Nakamura et al., 2002] *Nakamura R., Blake J. B., Elkington S. R., Baker D. N., Baumjohann W., Klecker B.* Relationship Between ULF Waves and Radiation Belt Electrons During the March 10, 1998, Storm // Advances in Space Research. Nov. 2002. V. 30. Iss. 10. P. 2163–2168.
- [Narita et al., 2010] *Narita Y., Glassmeier K. H., Sahraoui F., Goldstein M. L.* Wave-Vector Dependence of Magnetic-Turbulence Spectra in the Solar Wind // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. Iss. 17. doi: 10.1103/PhysRevLett.104.171101.
- [Obara et al., 2000] *Obara T., Nagatsuma T., Den M., Miyoshi Y., Morioka A.* Main-Phase Creation of “Seed” Electrons in the Outer Radiation Belt // Earth Planets Space. 2000. V. 52. P. 41–47.
- [Rostoker et al., 1998] *Rostoker G., Skone S., Baker D. N.* On the origin of relativistic electrons in the magnetosphere associated with some geomagnetic storms // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. P. 3701–3704.

**DYNAMICS OF THE EARTH' RADIATION
BELT ELECTRONS IN MAY, 2009 ON THE BASE
OF THE STEP-F INSTRUMENT OBSERVATIONS**

O. V. Dudnik

Kharkiv National University named V. N. Karazin, Kharkiv, Ukraine

The analysis of the electron flux dynamics in the inner and outer radiation belts of the Earth in May, 2009 is performed with a help of data base obtained from the satellite telescope of electrons and protons STEP-F of the Photon scientific equipment complex at the CORONAS-Photon satellite. The temporal coupling of the particle intensity enhancement in the radiation belts with the various stages of weak magnetic storm of May, 8, as well as with the high speed so-

lar wind streams parameter dynamics is investigated. Empirical values of electron life time is found for different energies of particles. The possible dependence of the electron life time in the outer radiation belt on their pitch-angle distribution at fixed value of energy is discussed.

Keywords: radiation belts of the Earth, electrons, protons, magnetic storm, magnetosphere of the Earth, solar activity, solar wind, Brazil Magnetic Anomaly, particle acceleration, pitch-angle distribution.

Dudnik Oleksiy Volodymyrovich — leader of the group, PhD, e-mail: Oleksiy.V.Dudnik@univer.kharkov.ua.

**ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ
ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ
И ПОЛОЖЕНИЕ ЕГО ПОЛЯРНОЙ ГРАНИЦЫ
В 2009 ГОДУ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА
С ПРИБОРОМ «ЭЛЕКТРОН-М-ПЕСКА»
НА БОРТУ ИСЗ «КОРОНАС-ФОТОН»**

**И. Н. Мягкова, В. В. Калегаев, В. О. Баринава,
М. И. Панасюк, А. В. Богомолов, Д. А. Парунакян,
Л. И. Старостин**

*Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д. В. Скобельцына Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва*

Мониторинг состояния внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ) на малых высотах являлся одной из важных задач эксперимента, выполнявшегося при помощи прибора «Электрон-М-Песка» (ЭМП) на борту солнечной обсерватории «КОРОНАС-Фотон». По данным прибора ЭМП был проведен анализ возрастных потоков электронов внешнего РПЗ после магнитных возмущений, вызванных приходом к Земле высокоскоростных потоков солнечного ветра в 2009 г. На основании анализа вариаций положения высокоширотной границы области захвата в магнитосфере Земли была получена среднестатистическая форма высокоширотной границы внешнего РПЗ.

Ключевые слова: релятивистские электроны, внешний радиационный пояс Земли, магнитные возмущения, солнечный ветер.

Мягкова Ирина Николаевна — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru.

Калегаев Владимир Владимирович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: klg@dec1.sinp.msu.ru.

Баринава Вера Олеговна — младший научный сотрудник, e-mail: alisawera@gmail.com.

Панасюк Михаил Игоревич — директор, доктор физико-математических наук, e-mail: panasyuk@srd.sinp.msu.ru.

Богомолов Андрей Владимирович, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: aabboogg@rambler.ru.

Парунакян Давид Алексеевич — программист 1-й категории, e-mail: jaffar.rumith@gmail.com.

Старостин Лев Иванович — программист 1-й категории, e-mail: levira.star@mail.ru.

Введение

Регистрация релятивистских и субрелятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли в режиме постоянного мониторинга и сегодня остается важной задачей.

Это связано с тем, что радиационные условия в околоземном космическом пространстве (ОКП) на малых (до 1000 км) высотах в периоды минимума солнечной активности (СА) определяются, главным образом, вариациями потоков энергичных электронов во внешнем радиационном поясе Земли (РПЗ), а также вариациями положения его границ. Изучение динамики потоков электронов внешнего РПЗ необходимы как для фундаментальных исследований, касающихся проблемы ускорения частиц в магнитосфере Земли [Кузнецов, Тверская, 2007; Friedel et al., 2002], так и для решения ряда прикладных задач, таких, например, как проблема электронов-«киллеров» [Fennell et al., 2001; Романова и др., 2005].

На настоящий момент считается, что основными процессами, ответственными за ускорение электронов внешнего РПЗ до релятивистских энергий, являются радиальная диффузия [Falthammar, 1965; Тверской, 1968; Hilmer et al., 2000; Selesnick, Blake, 2000; Brautigam, Albert, 1990] и локальное ускорение в результате взаимодействия «волна—частица» [Horne, Thorne, 1998; Summers, Ma, 2000; Meredith et al., 2002; Li et al., 2007]. Потери электронов в РПЗ связаны, предположительно, с высыпаниями частиц в верхнюю атмосферу благодаря рассеиванию на ионно-циклотронных (EMIC) волнах [Summers, Thorne, 2003], хорах [Shprits et al., 2007; Bortnik et al., 2008] и плазмосферных шипениях [Meredith et al., 2006]. Однако относительный вклад указанных процессов в формирование внешнего РПЗ до сих пор не выяснен. Поэтому, несмотря на существование в прошлом и настоящем большого числа космических аппаратов (КА), дающих информацию о вариациях потоков и спектров электронов в ОКП (таких как POES, SAMPEX для низких полярных орбит, GOES и LANL — для геостационарных), проблема мониторинга потоков релятивистских и субрелятивистских электронов на малых высотах остается весьма актуальной. Известно, что высокоширотная граница внешнего радиационного пояса контролируется как геомагнитным полем, так и магнитосферными токовыми системами, но динамика внешней границы внешнего РПЗ сравнительно плохо изучена.

Одна из центральных научных задач эксперимента, проводившегося при помощи созданного в НИИЯФ МГУ полупроводникового телескопа «Электрон-М-Песка» [Денисов и др., 2011] на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ) «КОРОНАС-Фотон», третьего

космического аппарата серии КОРОНАС (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца) — изучение динамики потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли, в частности их пространственной локализации. Поскольку функционирование ИСЗ «КОРОНАС-Фотон» пришлось на глубокий минимум солнечной активности (СА), данная задача стала фактически главной. Это связано с тем, что две другие задачи — мониторинг солнечных космических лучей и изучение вариаций границ области их проникновения в магнитосферу Земли во время геомагнитных возмущений — стали неактуальными из-за полного отсутствия в течение 2009 г. вспышек на Солнце, которые бы вызвали события в солнечных космических лучах.

1. УСЛОВИЯ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ И ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В МАРТЕ-НОЯБРЕ 2009 г.

Наблюдаемый в настоящее время аномально длинный минимум солнечной активности позволяет проследить многие явления взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли практически в чистом виде, без наложения сопутствующих процессов.

Прежде всего, следует рассмотреть условия, наблюдавшиеся в межпланетном космическом пространстве в течение 2009 г. На рис. 1 представлены вариации параметров межпланетного магнитного поля (ММП) — B — величина полного вектора ММП (черная линия), B_z — величина вертикальной составляющей (Z -компонента) вектора ММП (серая линия), верхняя панель рис. 1а; солнечного ветра (СВ) — скорость СВ (черная линия), протонная плотность СВ (серая линия), средняя панель рис. 1а и геомагнитных индексов D_{st} -вариация (черная линия), AE -индекс — (серая линия), нижняя панель рис. 1а с 1 марта по 30 ноября 2009 г., по данным сайта Годдардовского центра космических полетов — <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>. На рис. 1а хорошо видно, что в период с марта по ноябрь 2009 г. магнитосфера Земли находилась, в основном, в спокойном состоянии, и амплитуда D_{st} -вариации максимального геомагнитного возмущения, наблюдавшегося 22 июля, не превышала -80 нТ. Из данных рис. 1а также следует, что в течение рассматриваемого периода амплитуда полного вектора межпланетного магнитного поля B составляла не более 20 нТ, а его Z -компоненты (B_z) — не более -10 нТ. Скорость солнечного ветра для данного периода не превышала 600 км/с при плотности не более 30 см^{-3} . Интенсивных авроральных возмущений в рассматриваемый период также не наблюдалось.

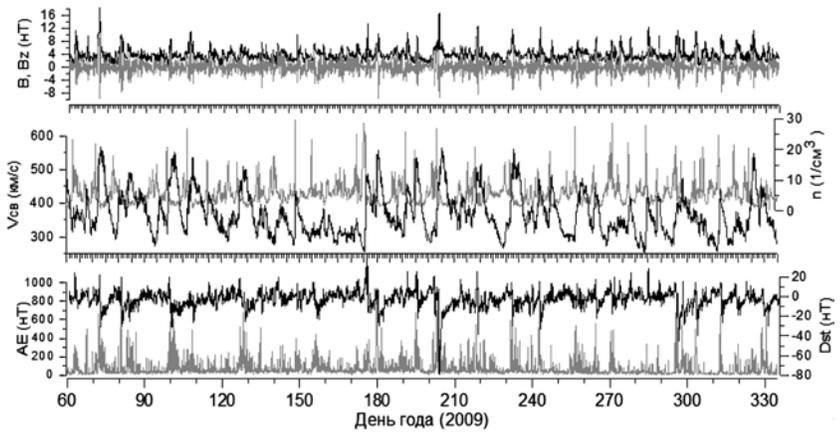


Рис. 1а. Вариации параметров межпланетного магнитного поля (ММП) B и B_z , плотности и скорости солнечного ветра (СВ) и геомагнитных индексов D_{st} и AE с 1 марта по 30 ноября 2009 г.

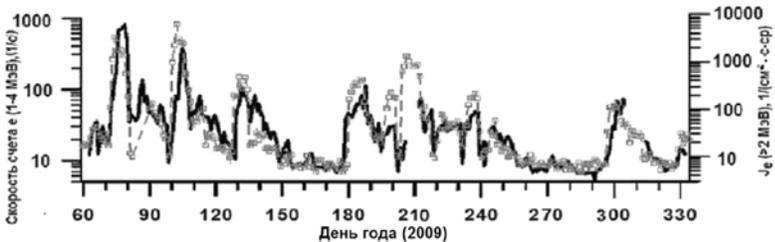


Рис. 1б. Временная зависимость максимальных скоростей счета релятивистских электронов на высоте 550 км по данным прибора ЭМП (КА «КОРОНАС-Фотон», сплошная черная линия) и на геостационарной орбите (GOES-11, серая пунктирная линия с пустыми квадратами) с 1 марта по 30 ноября 2009 г.

Данные о потоках электронов на высоте 550 км (КА «КОРОНАС-Фотон») приведены на рис. 1б (жирная черная линия), вместе с данными о вариациях электронов с энергиями выше 2 МэВ на геостационарной орбите по данным ИСЗ GOES-11 (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>, серая пунктирная кривая с пустыми квадратами).

Как видно на рис. 1б, в период с марта по ноябрь 2009 г. средний поток релятивистских электронов во внешнем РПЗ уменьшался как на геостационарной орбите (GOES-11), так и на высоте 550 км («КОРОНАС-Фотон»). В такие периоды как июнь и середина

сентября — конец октября 2009 г. поток релятивистских электронов внешнего РПЗ был ниже чувствительности приборов в обоих экспериментах. При сравнении вариаций потоков электронов с параметрами солнечного ветра можно заметить, что в эти периоды средняя скорость солнечного ветра была ниже, чем в другие периоды. Из данных рис. 1б также видно, что в период с марта по ноябрь 2009 г. неоднократно наблюдалось возрастание потоков релятивистских электронов более чем на два порядка на геостационарной орбите (по данным GOES-11) и более чем на порядок на высоте 550 км, причем происходило это при сравнительно небольших геомагнитных возмущениях. Следует отметить, что возрастания потоков электронов с энергиями > 2 МэВ на геостационарной орбите, как правило, начинались на несколько дней раньше, чем с энергиями 1...4 МэВ на высоте 550 км, что не противоречит данным других экспериментов. Например, в работе [Li et al., 1997] показана корреляция между потоками релятивистских электронов внешнего РПЗ со скоростью СВ с запаздыванием на четверо суток на $L = 6,6$. Данные события — возрастания потоков релятивистских электронов во внешнем РПЗ — связаны с приходом высокоскоростных потоков солнечного ветра, что следует из сравнения вариаций потока электронов и скорости солнечного ветра. Это также не противоречит результатам ряда других работ — например, авторами [Li et al., 2005] демонстрировалась корреляция потоков электронов с энергией выше 1 МэВ на геостационарной орбите (ИСЗ LANL) со скоростью солнечного ветра.

Из данных рис. 1б можно сделать вывод, что в 2009 г. возрастания потоков релятивистских электронов на орбите КА «КОРОНАС-Фотон» имели место в марте, апреле и начале мая, а также в июле, августе и конце октября. При этом геомагнитные возмущения, ставшие причиной вариаций потоков релятивистских электронов, не только не являются сильными бурями, но и, по своей сути, вообще не могут считаться магнитными бурями в рамках общепринятой терминологии. Значительных суббурь в рассматриваемый период также не наблюдалось.

При этом в периоды времени, соответствующие приходу на орбиту Земли высокоскоростных потоков солнечного ветра согласно данным сети Intermagnet (<http://www.intermagnet.org>) на ряде высокоширотных наземных станций, таких как Соданкюла (Sodankyla) и Нарсесуак (Narsarsuaq), наблюдалось возрастание волновой активности. Указанное усиление волновой активности, возможно, и приводило к наблюдавшемуся возрастанию потоков релятивистских электронов.

Этот вывод о роли волновой активности в УНЧ-диапазоне как причине возрастаний потоков релятивистских электронов совпадает с выводами работы [Потапов, Полюшкина, 2010]. Авторами на основании экспериментальных данных показано проникновение УНЧ-волн из солнечного ветра в магнитосферу Земли во время прихода высокоскоростного потока солнечного ветра в середине марта 2009 г. и рассмотрены возможные сценарии влияния УНЧ-волн на ускорение электронов РПЗ.

При этом следует отметить, что (см. рис. 1а) за период с марта по ноябрь включительно орбиты Земли достигло около 20 высокоскоростных потоков СВ, но не каждый из них, вызвавших слабые геомагнитные возмущения, привел к возрастанию потоков электронов во внешнем РПЗ как на геостационарной орбите, так и на высоте 550 км. При этом наличие или отсутствие возрастаний потока релятивистских электронов для каждого из высокоскоростных потоков СВ не было связано ни с его плотностью, ни с величиной модуля межпланетного магнитного поля B , ни с максимальной величиной B_z . В качестве примеров высокоскоростных потоков СВ, не вызвавших значимых возрастаний потоков релятивистских электронов, можно привести несколько случаев, когда высокоскоростной солнечный ветер достигал Земли в течение второй половины ноября 2009 г. Эти потоки не вызвали сильных вариаций потока электронов ни на геостационарной орбите, ни на малых высотах. При этом амплитуды скорости СВ, D_{st} -вариации и значения AE -индекса второй половины ноября 2009 г. не сильно отличались от значений, наблюдавшихся в конце октября, во время возрастания потока релятивистских электронов.

2. ПОЛОЖЕНИЕ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ГРАНИЦЫ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНО СПОКОЙНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ В МАРТЕ-НОЯБРЕ 2009 г.

Для анализа положения высокоширотной границы внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ) во время спокойных геомагнитных условий, имевших место в 2009 г., был разработан численный метод, позволяющий автоматически определять на траектории космического аппарата ионосферные координаты точек пересечения с высокоширотной границей внешнего РПЗ. На рис. 2а показаны координаты положения высокоширотной границы внешнего РПЗ на высоте орбиты космического аппарата «КОРОНАС-Фотон», полученные при анализе данных о потоках электронов с энергиями

>200 кэВ в северном полушарии в течение всего периода наблюдений КА «КОРОНАС-Фотон» (март-ноябрь 2009 г). На рис. 2а видно, что в географических координатах точки пересечения образуют овал толщиной около 5° , вытянутый примерно вдоль меридиана $90...270^\circ$ и смещенный в западное полушарие. Полученный овал дает информацию о положении высокоширотной границы захваченной радиации на высоте 550 км. В первом приближении она определяется структурой внутриземного геомагнитного поля, а расплывание овала — воздействием магнитосферных токовых систем.

На рис. 2 б показаны данные о границах, полученных по измерениям спутника «КОРОНАС-Фотон», выполнявшимся в интервалах мирового времени 15...21 ч UT (Universal Time) (черные точки) и 3...9 ч UT (пустые кружки) с центрами в моменты 18 ч мирового времени и 6 ч мирового времени.

Из данных рис. 2б следует, что при 18 ч мирового времени локальный полдень наблюдается на долготе 270° (на рис. 2б Солнце освещает левую часть Земли, хвост магнитосферы расположен справа). Для 6 ч мирового времени ситуация обратная — локальный полдень наблюдается на долготе 90° , и хвост магнитосферы расположен слева. Можно видеть, что в течение суток происходит изменение положения высокоширотной границы овала внутри полосы, полученной

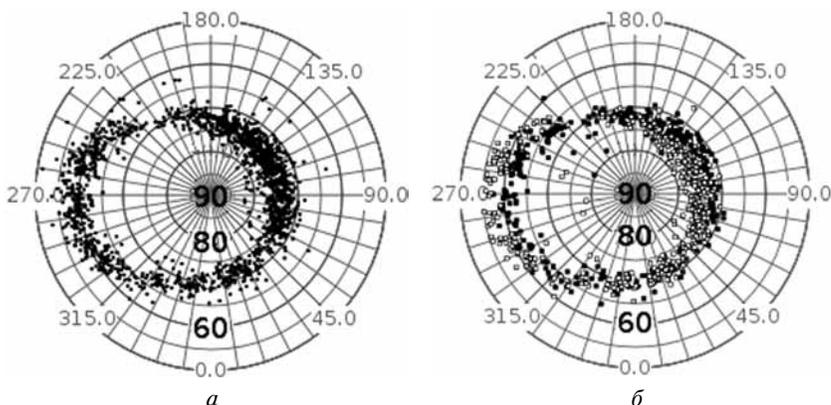


Рис. 2. Географические координаты положения высокоширотной границы внешнего РПЗ на высоте 550 км по данным прибора ЭМП (КА «КОРОНАС-Фотон») для северного полушария за весь период наблюдения с 1 марта по 30 ноября 2009 г. (а); координаты положения высокоширотной границы внешнего РПЗ, измеренные в интервалах мирового времени 15...21 ч UT (черные точки) и 3...9 ч UT (пустые кружки) с центрами в моменты 18 ч мирового времени и 6 ч мирового времени (б)

из всей совокупности пересечений по данным «КОРОНАС-Фотон». Также видно, что среднее положение границ, измеренных в 6 и в 18 ч мирового времени, сдвинуто относительно друг друга примерно на 3° , при этом овал сдвигается в ночную сторону магнитосферы, его сдвиг обусловлен влиянием токов геомагнитного хвоста.

Выводы

Важным результатом эксперимента с прибором «Электрон-М-Песка» является обнаружение того факта, что, несмотря на отсутствие значимых геомагнитных возмущений в 2009 г., в минимуме цикла солнечной активности на малых высотах наблюдались значительные (более, чем на порядок) возрастания потоков электронов во внешнем РПЗ, связанные с приходом высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ).

Сравнение вариаций потоков релятивистских электронов на круговой полярной орбите (ИСЗ «КОРОНАС-Фотон») и на геостационарной орбите (GOES-11) показали, что возрастания потока релятивистских электронов на геостационарной орбите и на высоте 550 км начинаются практически одновременно (в пределах временного масштаба 1 сут). Но возрастание потока частиц на полярной орбите происходит значительно медленнее и достигает максимума на несколько (3...4) суток позже по сравнению с геостационарной. Как было сказано выше, в течение всего 2009 г. и буревая, и суббуревая (авроральная) активность была невысока, однако на ряде магнитных станций были зафиксированы всплески волновой активности. Предположительно, именно волновая активность привела к ускорению электронов внешнего РПЗ. Следует отметить, что приход к Земле высокоскоростного потока СВ, скорее всего, не является достаточным условием для возрастания потоков релятивистских электронов во внешнем РПЗ, поскольку далеко не каждый приход высокоскоростного потока СВ в 2009 г. сопровождался резким увеличением потока релятивистских электронов в околоземном пространстве, даже при условии наличия отрицательного B_z (так, потоки релятивистских электронов не выросли в сентябре и двух первых декадах октября, хотя высокоскоростные потоки СВ имели место). Обнаруженный экспериментальный факт требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Анализ вариаций границы внешнего РПЗ по данным измерений спутника «КОРОНАС-Фотон», проводившихся в течение всего срока его функционирования, показал, что с марта по ноябрь 2009 г., в период аномально-низкой геомагнитной активности,

положение высокоширотной границы определялось, главным образом, геомагнитным полем, порожденным внутриземными токами. Было экспериментально получено, что среднее положение границы на поверхности Земли имеет форму овала. В то же время анализ экспериментальных данных показал, что под воздействием магнитосферных источников магнитного поля происходит искажение границы, которое проявляется в суточном эффекте — сдвиге овала в ночную сторону. По данным эксперимента, осуществленного при помощи прибора ЭМП на борту КА «КОРОНАС-Фотон», было получено, что максимальная величина сдвига, вызванного токами хвоста магнитосферы, достигает $1,5^\circ$.

Выполненные исследования с прибором ЭМП на борту КА «КОРОНАС-Фотон» показали важность и перспективность подобных экспериментов для понимания процессов, происходящих в магнитосфере Земли не только в максимуме СА, но и в глубоком минимуме.

Литература

- [Денисов и др., 2011] *Денисов Ю. И., Калегает В. В., Мяжкова И. Н., Панасюк М. И.* Эксперимент с прибором «Электрон-М-Песка» на борту солнечной обсерватории «КОРОНАС-Фотон» // *Астрон. вестн.* 2011. Т. 45. № 2. С. 213–218.
- [Кузнецов, Тверская, 2007] *Кузнецов С. Н., Тверская Л. В.* 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.
- [Потапов, Полошкина, 2010] *Потапов А. С., Полошкина Т. Н.* Экспериментальное свидетельство прямого проникновения УНЧ-волн из солнечного ветра и возможного их влияния на ускорение электронов радиационного пояса // *Солнечно-земная физика.* 2010. Вып. 15. С. 28–34.
- [Романова и др., 2005] *Романова Н. В., Пилипенко В. А., Ягова Н. В., Белов А. В.* Статистическая связь частоты сбоев на геостационарных спутниках с потоками энергичных электронов и протонов // *Космич. исслед.* 2005. Т. 43. № 3. С. 186–193.
- [Тверской, 1968] *Тверской Б. А.* Динамика радиационных поясов. М.: Наука, 1968. 223 с.
- [Bortnik et al., 2008] *Bortnik J., Thorne R. M., Inan U. S.* Nonlinear Interaction of Energetic Electrons with Large Amplitude Chorus // *Geophysical Research Letters.* 2008. V. 35. Iss. 21. CiteID L21102. doi: 10.1029/2008GL035500.
- [Brautigam, Albert, 1990] *Brautigam D. H., Albert J. M.* Radial Diffusion Analysis of Outer Radiation Belt Electrons During the 9 October, 1990, Magnetic Storm // *J. Geophysical Research.* 2000. V. 105(A1). P. 291–309. doi: 10.1029/1999JA900344.
- [Falthammar, 1965] *Falthammar C. G.* Effects of Time-Dependent Electric Fields on Geomagnetically Trapped Radiation // *J. Geophysical Research.* 1965. V. 70. N. 11. P. 2503–2516. doi: 10.1029/JZ070i011p02503.

- [Fennell et al., 2001] *Fennell J. F., Koons H. C., Roeder J. L., Blake J. B.* Spacecraft Charging: Observations and Relationship to Satellite Anomalies // Proc. of 7th Spacecraft Charging Technology Conf. / Ed. R.A. Harris. Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA SP-476, 2001. P. 279–285.
- [Friedel et al., 2002] *Friedel R. H. W., Reeves G. D., Obara T.* Relativistic Electron Dynamics in the Inner Magnetosphere: A Review // J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. 2002. V. 64. P. 265–282.
- [Hilmer et al., 2000] *Hilmer R. V., Ginet G. P., Cayton T. E.* Enhancement of Equatorial Energetic Electron Fluxes Near $L = 4.2$ as a Result of Highspeed Solar Wind Streams // J. Geophysical Research. 2000. V. 105. P. 23,311.
- [Horne, Thorne, 1998] *Horne R. B., Thorne R. M.* Potential Wave Modes for Electron Scattering and Stochastic Acceleration to Relativistic Energies During Magnetic Storms // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. N. 15. P. 3011–3014.
- [Li et al., 2007] *Li W., Shprits Y. Y., Thorne R. M.* Dynamic Evolution of Energetic Outer Zone Electrons Due to Wave-Particle Interactions During Storms // J. Geophysical Research. 2007. V. 112. A10220. doi: 10.1029/2007JA012368.
- [Li et al., 1997] *Li X., Baker D. N., Temerin M., Cayton T. E., Reeves E. G. D., Christensen R. A., Blake J. B., Looper M. D., Nakamura R., Kanekal S. G.* 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 et al., 2005] *Li X., Baker D. N., Temerin M., Reeves G. D., Friedel R., Shen C.* 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.
- [Meredith et al., 2002] *Meredith N. P., Horne R. B., Iles R. H. A., Thorne R. M., Heynderickx D., Anderson R. R.* Outer Zone Relativistic Electron Acceleration Associated with Substorm-Enhanced Whistler Mode Chorus // J. Geophysical Research. 2002. V. 107(A7). P. 1144. doi: 10.1029/2001JA900146.
- [Meredith et al., 2006] *Meredith N. P., Horne R. B., Glauert S. A., Thorne R. M., Summers D., Albert J. M., Anderson R. R.* Energetic Outer Zone Electron Loss Timescales During Low Geomagnetic Activity // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. A05212. doi: 10.1029/2005JA011516.
- [Selesnick, Blake, 2000] *Selesnick R. S., Blake J. B.* On the Source Location of Radiation Belt Relativistic Electrons // J. Geophysical Research. 2000. V. 105(A2). P. 2607–2624. doi: 10.1029/1999JA900445.
- [Shprits et al., 2007] *Shprits Y. Y., Meredith N. P., Thorne R. M.* Parameterization of Radiation Belt Electron Loss Timescales Due to Interactions with Chorus Waves // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. L11110. doi: 10.1029/2006GL029050.
- [Summers, Ma, 2000] *Summers D., Ma C. Y.* A Model for Generating Relativistic Electrons in the Earth's Inner Magnetospheres Based on Gyroresonant Wave-Particle Interactions // J. Geophysical Research. 2000. V. 105. P. 2625.

[Summers, Thorne, 2003] *Summers D., Thorne R. M.* Relativistic Electron Pitch-Angle Scattering by Electromagnetic Ion Cyclotron Waves During Geomagnetic Storms // *J. Geophysical Research.* 2003. V. 108(A4). P. 1143. doi: 10.1029/2002JA009489.

**ELECTRON FLUX VARIATIONS IN OUTER ERB AND ITS
POLAR BOUNDARY POSITION DURING 2009 YEAR
MEASURED BY ELECTRON-M-PESKA INSTRUMENT
ON BOARD CORONAS-PHOTON SATELLITE**

**I. N Myagkova, V. V. Kalegaev, V. O. Barinova, M. I. Panasyuk,
A. V. Bogomolov, D. A. Parunakyan, L. I. Starostin**

*Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute
of Nuclear Physics (MSU SINP), Moscow*

Monitoring of outer Radiation Belt of the Earth at low altitudes and study of its connection with the processes on the Sun was one of the central problems of the experiment which was carried by Electron-M-Pesca device onboard a solar observatory CORONAS-Photon. Data about relativistic and sub-relativistic electron flux in the outer Radiation Belt of the Earth and also about position of its polar boundary obtained by device Electron-M-Pesca during 2009 year, was used by us for studying of dynamics outer Radiation Belt of the Earth in the last minimum of solar activity. The analysis of electron enhancement detected on board CORONAS- Photon satellite in the outer radiation belt of the Earth at altitudes 550 km in 2009 was carried out. It was observed after the weak magnetic disturbance caused by the arrivals of the high-speed solar wind streams to the Earth. The average form of high-altitude boundary of the outer Radiation Belt of the Earth was received using data about variations of high-altitude boundary position of trapping area in the magnetosphere of the Earth.

Keywords: relativistic electrons, outer radiation belt of the Earth, magnetic disturbances, solar wind.

Myagkova Irina Nikolaevna — senior scientist, PhD, e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru.

Kalegaev Vladimir Vladimirovich — senior scientist, doctor of science, e-mail: klg@decl.sinp.msu.ru.

Barinova Vera Olegovna — minor scientist, PhD, e-mail: alisawera@gmail.com.

Panasyuk Mikhail Igorevich — director, doctor of science, e-mail: panasyuk@srd.sinp.msu.ru.

Bogomolov Andrey Vladimirovich — senior scientist, PhD, e-mail: aabboogg@rambler.ru.

Parunakyan David Aleseevich — programmer, e-mail: jaffar.rumith@gmail.com.

Starostin Lev Ivanovich — programmer, e-mail: levira.star@mail.ru.

**СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ
ИЗЛУЧЕНИЙ «НАТАЛЬЯ-2М».
ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ НА ОРБИТЕ
В СОСТАВЕ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА «КОРОНАС-ФОТОН»**

Е. Э. Лупарь, В. Н. Юров, К. Ф. Власик

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Федерального агентства
по образованию РФ, Институт астрофизики (ИАФ), Москва*

Представлены результаты космического эксперимента «Наталья-2М» на борту космического аппарата (КА) «КОРОНАС-Фотон». Описываются некоторые аспекты функционирования прибора «Наталья-2М» на орбите, касающиеся работоспособности прибора и стабильности его характеристик, приводятся полученные с его помощью научные результаты. Дается краткое описание узлов и элементов конструкции прибора, существенно влияющих на формирование энергетического диапазона и обеспечивающих полетную настройку. Анализируется возможность наблюдения прибором солнечных событий, произошедших за период измерений.

Ключевые слова: «КОРОНАС-Фотон», исследование Солнца, «Наталья-2М», гамма-спектрометр, полетная калибровка, спектры гамма-излучения, временные профили, солнечные вспышки, гамма-всплески.

Введение

Спектрометр высокоэнергичных излучений «Наталья-2М» предназначен для регистрации гамма-излучения солнечных вспышек в широком энергетическом диапазоне 0,2...1600 МэВ, а также нейтронов солнечного происхождения с энергиями 20...300 МэВ. Прибор представляет собой модульный сцинтилляционный спектрометр на основе монокристаллов CsI(Tl) с полной площадью 32×38 см и толщиной 18 см, состоящий из двух секций — СЕ-1М и СЕ-2М, — расположенных одна

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

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора Института астрофизики МИФИ, кандидат физико-математических наук, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

Власик Константин Федорович — ведущий инженер, кандидат физико-математических наук, e-mail: KFV6490@mail.ru.

над другой. Спектры и временные профили скоростей счета гамма-квантов измеряются в четырех поддиапазонах: R (0,2...2 МэВ), L (1...18 МэВ), M (7...250 МэВ) и H (50...1600 МэВ). Эффективная площадь прибора в зависимости от энергии гамма-излучения изменяется в интервале от 900 до 750 см², энергетическое разрешение на линии ¹³⁷Cs при энергии 662 кэВ составляет 10 % и около 30 % — при энергиях выше 50 МэВ. Для обеспечения стабильности характеристик и автоматической подстройки параметров спектрометрических модулей используется система стабилизации по величине сигнала от генератора эталонных световых импульсов. Калибровка измерительных каналов прибора в полете осуществляется с помощью источника «меченых» гамма-квантов, включающего радиоактивный изотоп ⁶⁰Co. Для защиты от фона заряженных частиц применяются полистирольные сцинтилляционные счетчики.

Более подробно устройство и наблюдательные возможности прибора описаны в сборнике трудов рабочего совещания по проекту КОРОНАС-Фотон за 2010 г. [Архангельский и др., 2010], а также в [Kotov et al., 2001; Космический комплекс «КОРОНАС-Фотон», 2008; Юров и др., 2005; Котов и др., 2010].

Внешний вид регистрирующего блока прибора «Наталья-2М» представлен на рис. 1.

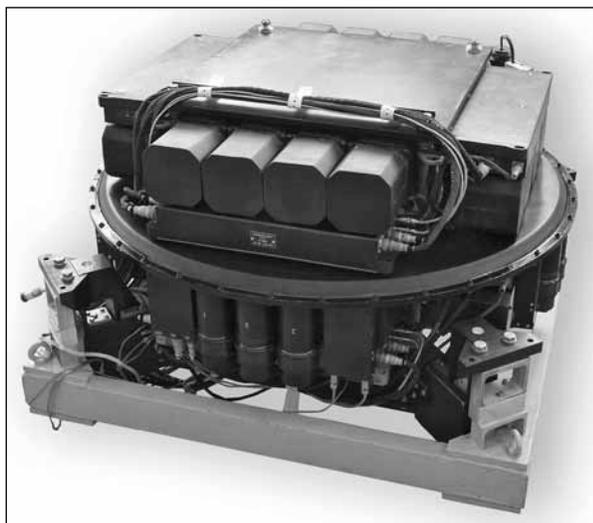


Рис. 1. Регистрирующий блок прибора «Наталья-2М» (без антисовпадательного детектора (АК)) на технологической раме

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИБОРА

Космический аппарат «КОРОНАС-Фотон» с научным оборудованием, предназначенным главным образом для комплексных наблюдений Солнца, был запущен с космодрома Плесецк 30 января 2009 г. на низкую околоземную орбиту (высота 530...570 км, наклонение 82,5°). Прибор «Наталья-2М» был включен 19 февраля и работал вплоть до 1 декабря (за исключением нескольких временных промежутков, общей длительностью 23 дня, в течение которых подача питания на прибор была прекращена вследствие нарушений работы служебных систем КА), когда вся научная аппаратура спутника была отключена из-за выхода из строя системы электроснабжения.

Длительный период времени — с февраля и до конца июня — заняли работы, связанные с послепусковой настройкой и калибровкой детекторов прибора, а также решением возникших в процессе эксплуатации проблем с системой автостабилизации энергетической шкалы [Архангельский и др., 2010]. Методика настройки спектрометра предполагает при работах с отдельным модулем перевод остальных семи модулей секции в режим с пониженным напряжением на фотоэлектронном умножителе (ФЭУ) (во-первых, отдельные сигнальные выводы предусмотрены только для четырех модулей верхнего слоя спектрометра, во-вторых, каждая секция спектрометра запитывается всего от двух высоковольтных источников, по 8 ФЭУ в группе), или, при работе с модулями слоя А, — отключение половины ФЭУ секции, поэтому часть измерений проведена прибором «Наталья-2М» в режиме ограниченной функциональности.

С 30 июня 2009 г. верхняя секция спектрометра, обеспечивающая работу энергетических диапазонов 0,2...2 и 1...18 МэВ, функционировала штатно, временные отключения для проведения настройки касались только модулей второй секции и не затрагивали каналы низких и средних энергий.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ И ГАММА-ВСПЛЕСКИ

Прибор «Наталья-2М» предназначен для регистрации высокоэнергичных излучений, проявляющихся в солнечных событиях классов М и X по шкале GOES. Такие вспышки, в основном, происходят вблизи максимума солнечной активности. Величина энергетического порога спектрометра «физически» ограничена на уровне 200...300 кэВ с помощью свинцового фильтра.

В период аномально спокойного Солнца, на который выпало время активного существования прибора на орбите, не произошло

ни одного солнечного события, которое могло бы быть зарегистрировано детекторами спектрометра. Тем не менее, прибором было зарегистрировано несколько мощных гамма-всплесков. Часть из них, к сожалению, совпала по времени с проведением калибровочных измерений.

Фильтр для поглощения излучения низких энергий

Результаты моделирования отклика детектора прибора «Наталья-2М» методом Монте-Карло показали, что при мощных солнечных вспышках возможна частотная перегрузка спектрометрических детекторов прибора вследствие значительных размеров детекторов и их ограниченного быстродействия и, соответственно, потеря спектральной информации для наиболее интересных целевых событий этого эксперимента. Для уменьшения загрузки прибора на малых энергиях (ослабления потока фотонов с энергией меньше 300 кэВ) в конструкцию регистрирующего блока была введена свинцовая пластина, размещенная непосредственно над спектрометром.

На рис. 2 представлен смоделированный отклик прибора на вспышечное событие для конфигураций со свинцовым фильтром и без него. Для моделирования была взята одна из самых ярких вспышек по данным SMM (Solar Maximum Mission), зарегистрированная

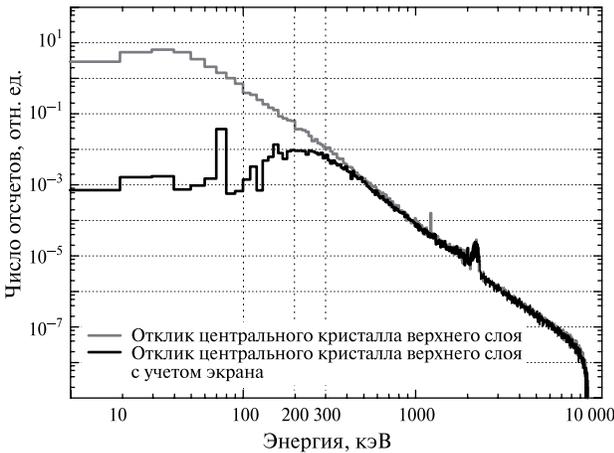


Рис. 2. Смоделированный отклик прибора «Наталья-2М» на вспышку 24 апреля 1984 г. для конфигураций с экраном и без него (в относительных единицах)

24 апреля 1984 г. [Chupp, 1990]. Видно, что свинцовый поглотитель уменьшает загрузку детектора в области малых энергий (на энергиях ~ 100 кэВ в несколько сот раз, ~ 200 кэВ — почти в 10 раз, ~ 300 кэВ — в 1,5 раза) и практически не изменяет формы спектра в рабочем диапазоне энергий 300 кэВ...10 МэВ. Так как реальный установленный «электрический» порог существенно ниже 300 кэВ, можно рассчитывать на регистрацию в каналах интенсиметров низкоэнергичных, но интенсивных событий. Добавление фильтра также приводит к появлению фоновой линии ($E_K = 88$ кэВ) ниже порога спектрометра.

Солнечные вспышки

Как было сказано выше, за почти девять месяцев работы прибора (без учета отключений КА) солнечных событий, удовлетворяющих условиям регистрации прибором «Наталья-2М», не было. Поиск в данных прибора откликов на солнечные вспышки проводился по опубликованным в интернете каталогам SolarSoft (http://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html), а также данным прибора «Пингвин-М» КА «КОРОНАС-Фотон». Рассматривались только вспышки класса C (наивысший класс вспышек, произошедших за время измерений), зарегистрированные прибором «Пингвин-М» (примерно 15).

Рассмотрим подробнее две из них — C2.7 05.07.2009 г. и C1.3 26.10.2009 г.

Солнечная вспышка класса C2.7, произошедшая 05.07.2009 г., — самая мощная по классификации GOES, зарегистрированная приборами КНА «Фотон» за время функционирования. Однако детекторы GOES XRS (X-ray Sensor) измеряют потоки мягкого рентгеновского излучения Солнца в спектральном диапазоне $0,5(1)...8 \text{ \AA}$, т. е. примерно до 12(24) кэВ, что значительно ниже порога регистрации прибора «Наталья-2М». На рис. 3 представлены профили события по данным GOES ($\sim 1,5...12$ кэВ), а также приборов КНА «Фотон» «Пингвин-М» — «Пингвин» (мягкий канал 2...20 кэВ и жесткий 18...450 кэВ), «Электрон-М-Песка» — «Электрон» (электроны низких энергий 0,2...1 МэВ) в сравнении с каналами низких энергий спектрометра «Наталья-2М» — H2M (R1–R4 $\sim 0,2...2$ МэВ, L $\sim 1...18$ МэВ). Вспышечное событие хорошо выделяется в низкоэнергичном канале «Пингвин-М», но при этом нет отклика в канале 18...450 кэВ. В спектрах мягкого рентгеновского излучения с прибора «Пингвин-М» видно, что вспышка практически не заметна уже с энергий порядка 10 кэВ, следовательно, спектрометр «Наталья-2М» это событие «видеть» не может.

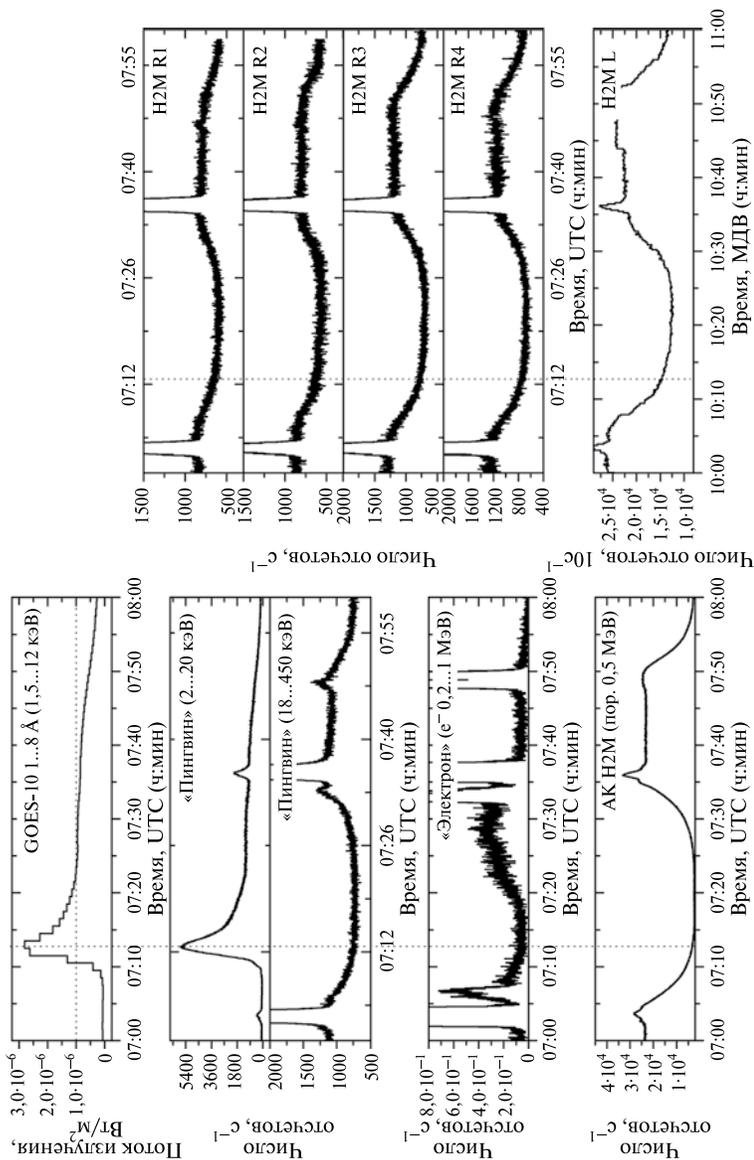


Рис. 3. Солнечная вспышка класса C2.7 05.07.2009 г.
 (АК — детектор антисовпадающей защиты прибора «Наталья-2М»)

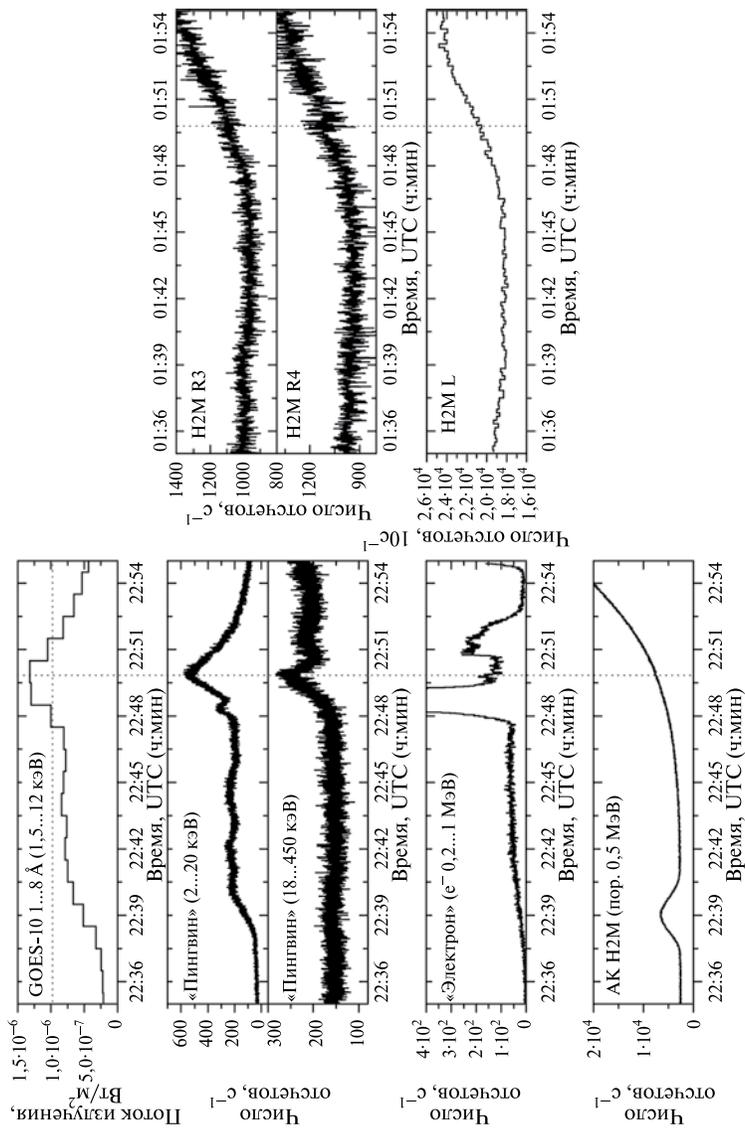


Рис. 4. Солнечная вспышка класса С1.3 26.10.2009 г. (не приведены данные каналов R1 и R2: R1 работал в режиме осциллографа, R2 отключен)

Во всех четырех детекторах R-диапазона вспышка не зарегистрирована, тем более нет отклика в более высокоэнергичном канале L.

При сравнении временных профилей солнечных вспышек и гамма-всплесков приводятся данные о потоках электронов низких энергий прибора «Электрон-М-Песка», так как часть особенностей на профилях событий может быть ассоциирована с тормозным излучением электронов в высоких широтах. В данном случае возрастание потока электронов носит, по-видимому, вторичный характер.

Солнечная вспышка, произошедшая 26.10.2009 г. (рис. 4), имеет класс C1.3, т. е. меньший поток излучения в диапазоне GOES, чем вспышка 05.07.2009 г. Особенностью данного события является наличие жёсткой компоненты рентгеновского излучения, которая была зарегистрирована, в частности, детекторами приборов «Пингвин-М» и БРМ (быстрый рентгеновский монитор) — резкий рост скорости счета на временно́м профиле с максимумом в 22:50 UTC. Подъём в правой части профиля данных «Электрон-М-Песка» связан с регистрацией электронов внешнего радиационного пояса. По данным БРМ (см. рис. 7 в статье настоящего сборника *Трофимов Ю.А.* и др. «Регистрация быстрым рентгеновским монитором нестационарных кратковременных событий и их анализ») вспышка видна в канале 70...130 кэВ (и меньших энергий), в канале 130...600 кэВ эффекта не наблюдается. В каналах прибора «Наталья-2М» статистически обеспеченного изменения скорости счета во время вспышки не обнаружено.

Таким образом, можно заключить, что солнечных вспышек прибор «Наталья-2М» за время работы не зарегистрировал. Причиной этого факта являлись, с одной стороны, высокий энергетический порог прибора, с другой, — отсутствие достаточно мощных вспышек за время наблюдений.

Гамма-всплески

Регистрация таких событий как космические гамма-всплески является «физическим» подтверждением нормальной работоспособности прибора на орбите, в дополнение к «техническому» калибровочным данным о его состоянии, использующим измерения спектральной фона и встроенного радиоактивного источника, а также телеметрические данные. Несколько примеров таких событий приведено ниже. Часть из них, к сожалению, произошла в то время, когда детекторы прибора находились в калибровочном (отладочном) режиме и не были полностью функциональны.

За время работы спектрометр зарегистрировал семь гамма-всплесков. Большинство таких событий имеет сравнительно слабый поток излучения при энергиях выше порога регистрации спектрометра, а длительность существенной части всплесков составляет величины порядка нескольких секунд, что затрудняет их поиск и анализ в данных прибора «Наталья-2М», поэтому для их выделения были использованы данные приборов «Конус-РФ», Konus-Wind, Swift-BAT, Fermi-GBM, Suzaku-WAM и др., ориентированных в большей степени на регистрацию гамма-всплесков.

Прибор «Наталья-2М» является ненаправленным и способен регистрировать гамма-всплески практически всей передней полушеры (за исключением областей затенения соседними приборами). Большие размеры детекторов прибора обеспечивают хорошую чувствительность для относительно высоких энергий от сотен килоэлектронвольт до единиц мегаэлектронвольт.

С использованием данных размещенных в Интернете циркуляров гамма-всплесков (GCN Circulars Archive (http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html), Gamma-ray Burst Real-time Sky Map (<http://grb.sonoma.edu/index.php>)), а также информации с сайтов специализированных миссий были выделены наиболее яркие события, произошедшие в период с февраля по декабрь 2009 г.

Далее проверялись события по критерию «видимости» прибором «Наталья-2М» (определялся угол между направлением оси Z космического аппарата (на Солнце) и направлением на гамма-всплеск, при этом экваториальные координаты всплеска на небесной сфере брались из внешних источников (база данных Swift)). При расчетах учитывалась возможность «затенения» всплеска Землей. Из отобранных таким образом событий было выбрано 10, удовлетворяющих критерию превышения энергетических порогов регистрации, и, в случае штатного режима работы прибора в указанный промежуток времени, обрабатывались данные спектрометра.

В таблице представлены результаты семи зарегистрированных прибором и обработанных всплесков.

Хронологически первыми были зарегистрированы гамма-всплески GRB090406 и GRB090408. Режим работы прибора в обоих случаях был одинаков. Хотелось бы выделить более мощное событие GRB090408 8 апреля 2009 г. 19:46:38.539 UT, которое должно было быть зарегистрировано спектрометром «Наталья-2М» (по данным «Конус-РФ» есть значительный отклик даже в канале 1032...2611 кэВ). Однако в это время прибор находился в настройечном режиме, была отключена половина ФЭУ верхней секции SE-1M спектрометра, спектры в R-каналах набирались в совпадениях со

срабатываниями блока полетной калибровки БСД (триггеры актов радиоактивного распада ^{60}Co). Тем не менее, событие было зарегистрировано в L-диапазонах всех слоев прибора (рис. 5) и даже дало заметный отклик в стробируемых R-каналах из-за случайных совпадений со срабатываниями триггера БСД. На рис. 6 хорошо видно увеличение скорости счета детекторов на фоне регистрации гамма-квантов калибровочного источника во время всплеска, тем более ярко выраженное, чем дальше модуль расположен от источника.

Гамма-всплески, зарегистрированные прибором «Наталья-2М»

| Гамма-всплеск | Время регистрации, UTC чч:мм:сс | Приборы, аппараты, зарегистрировавшие всплески | Комментарий |
|---------------|---------------------------------|--|-----------------------------------|
| GRB090406 | 17:22:11 | Suzaku, Konus-Wind, БРМ, «Пингвин-М» | Нештатный режим |
| GRB090408 | 19:46:39 | «Конус-РФ», Konus-Wind, БРМ | Нештатный режим |
| GRB090618 | 08:28:25 | Swift, «Конус-РФ», Konus-Wind, RT-2, БРМ | |
| GRB090709 | 07:38:35 | Suzaku, Swift, Konus-Wind, БРМ | Слабо виден прибором «Наталья-2М» |
| GRB090820 | 00:38:16 | Fermi GBM, RT-2, БРМ | |
| GRB090926A | 04:20:29 | Suzaku, БРМ, RT-2, Konus-Wind, Fermi GBM | |
| GRB091003 | 04:35:44 | Suzaku, Konus-Wind, Fermi GBM | |

Отклик в детекторах прибора «Наталья-2М» принципиально похож на кривые скоростей счета прибора «Конус-РФ», однако тонкая структура основной группы пиков заинтегрировалась из-за недостаточного временного разрешения (время накопления 1 с).

Первым гамма-всплеском, зарегистрированным прибором «Наталья-2М» после окончания этапа полетной калибровки, стало событие GRB090618 18 июня 2009 г. (триггер Konus-Wind 08:28:24.974 UT), хорошо выделяемое в каналах высоких энергий приборов «Конус-РФ» (684...1080 кэВ), RT-2 (215...1000 кэВ) и др.

На рис. 7 видны отклики во всех четырех каналах верхнего слоя спектрометра (R-диапазон), а также сопутствующее нарастание скорости счета в детекторах антисовпадательной защиты.

В более высоких энергиях (L-диапазон) реакции на событие замечено не было.

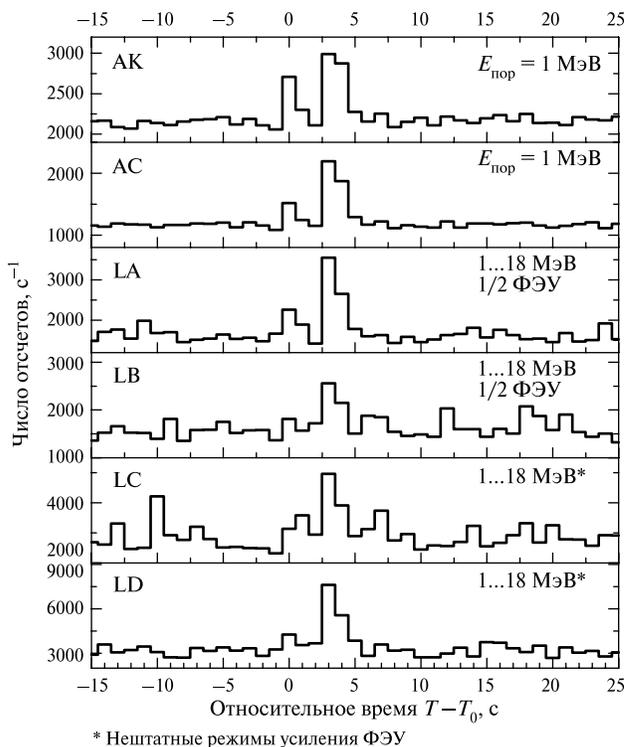


Рис. 5 Гамма-всплеск GRB090408 (на графике АК, АС — временные профили скоростей счета детекторов антисовпадательной защиты АК и АС прибора «Наталья-2М», LA–LD — показания интенсиметров в энергетическом диапазоне L для слоев спектрометра А–D)

Следует отметить, что форма временных профилей всплесков «Наталья-2М» совпадает с поведением временных зависимостей скоростей счета в близких энергетических каналах приборов «Конус-РФ», Konus-Wind, Fermi-GBM, БРМ.

Для гамма-всплеска GRB090618 также получено превышение над фоном в спектрах каналов низких энергий (R-диапазона). В качестве фона использовался спектр на предшествующем событию ровном участке на временном профиле счета канала R за то же время. На рис. 8а на профиле скорости счета отмечены выбранные границы накопления спектров события. Были выбраны две области: область главной группы пиков и область, включающая предшествующее возрастание.

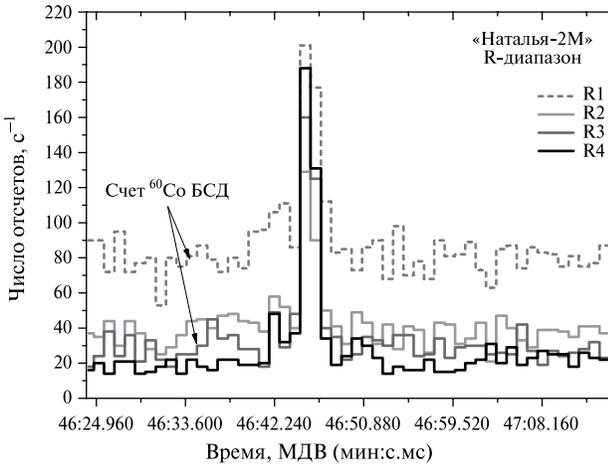


Рис. 6. Гамма-всплеск GRB090408 в R-каналах спектрометра, находящегося в стробированном калибровочном режиме (включены только ФЭУ2 CE-1M, рабочие установки загружены в слое А и модуле В4 слоя В; модули В4, А1–А4 — режим совпадений со срабатываниями БСД)

На рис. 8а, б представлены полученные таким образом полный, фоновый спектры, а также рассчитанный по разности спектр события. Видно, что спектр вспышки выделяется до энергий ~ 700 кэВ, для больших энергий полный и фоновый спектр совпадают.

На рис. 8б построены спектры всплеска для обоих интервалов в логарифмическом масштабе, приведенные по времени.

Другим примером зарегистрированного всплеска является событие GRB090820 20 августа 2009 г. (триггер Fermi-GBM 00:38:16.19 UT). Этот яркий всплеск также имел сильно выраженную жесткую компоненту излучения (данные Fermi-GBM 0,3...1000 кэВ, RT-2 330...1000 кэВ и др.) и дал отклик не только в каналах R-диапазона, но и в L-канале 1...18 МэВ прибора «Наталья-2М». На рис. 9 на общей временной шкале приведены также данные с приборов КА «КОРОНАС-Фотон» «Электрон-М-Песка» в канале электронов 0,2...1 МэВ и ФОКА, фотометрические каналы которого чувствительны к низкоэнергичным электронам. Из сопоставления временного поведения скоростей счета приборов можно сделать вывод, что группа кратковременных нарастаний счета в правой половине шкалы в области радиационного пояса может быть ассоциирована с высыпаниями заряженных частиц.

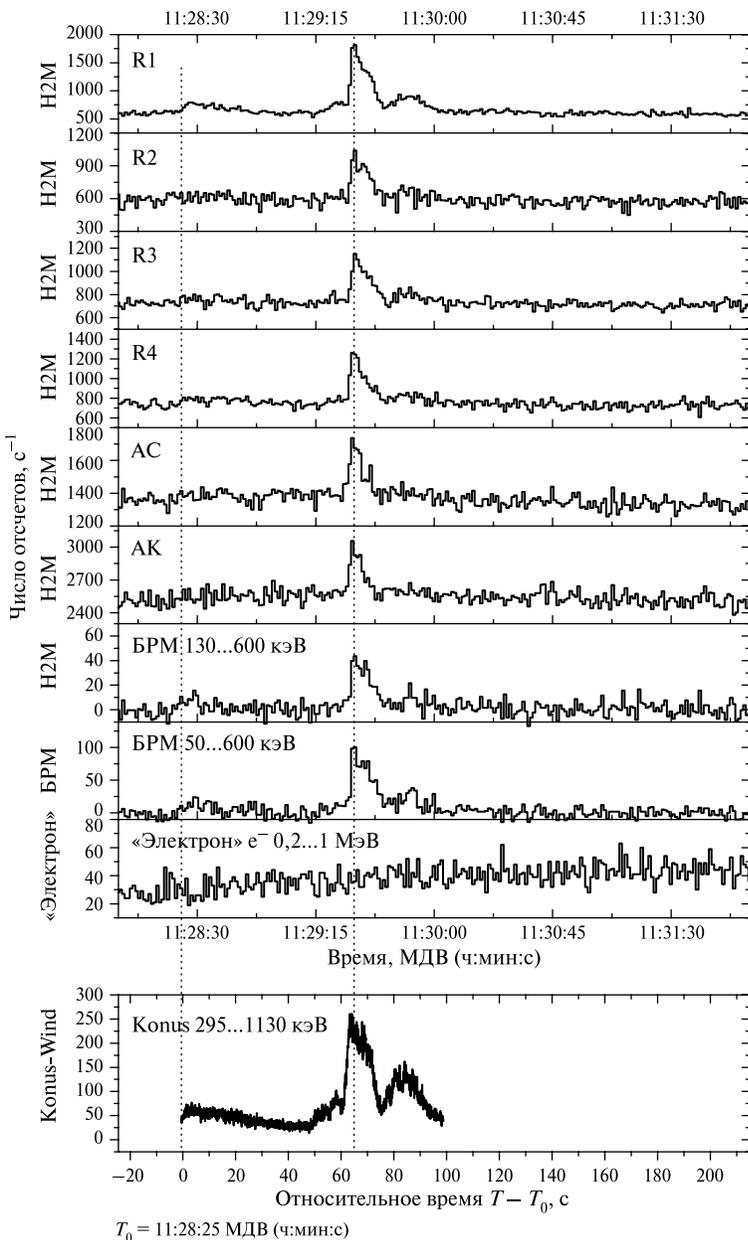


Рис. 7. Гамма-всплеск GRB090618

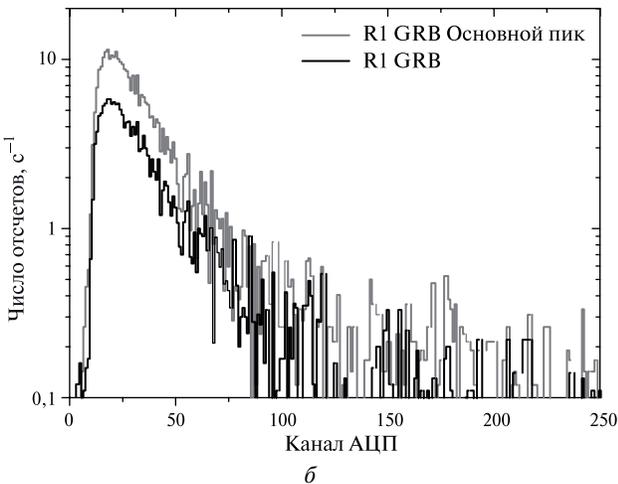
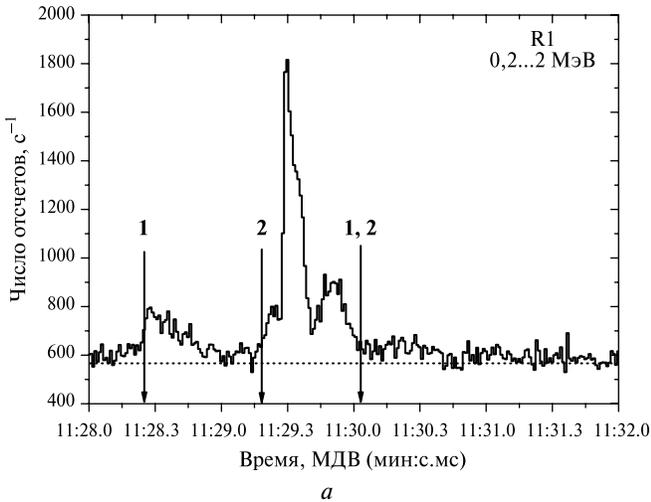


Рис. 8а, б. Спектры гамма-всплеска GRB090718 в канале R1 прибора «Наталья-2М» (на временном профиле события — рис. 8а — цифрами 1 и 2 обозначены границы интервалов накопления спектров)

Последний пример относится к регистрации события 3 октября 2009 г. Яркий всплеск GRB091003 (триггер Konus-Wind 04:35:43.801 UT) включает жесткую компоненту (данные Konus-Wind 300...1160 кэВ и др.), имеющую, к сожалению, общую длительность

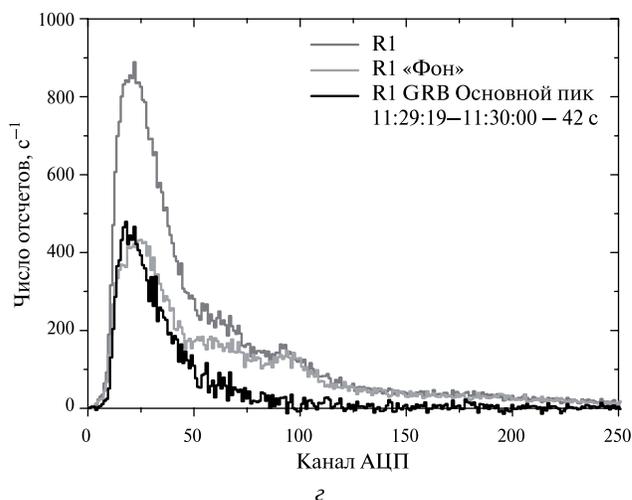
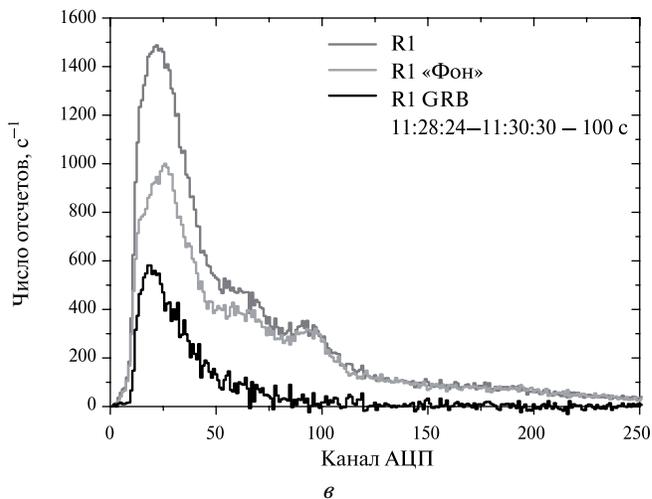


Рис. 8в, г. Спектры гамма-всплеска GRB090718 в канале R1 прибора «Наталья-2М»

всего около нескольких секунд. В данных R-каналов прибора «Наталья-2М» (рис. 10) хорошо заметны как основной всплеск, так и предвсплесковое увеличение скорости счета.

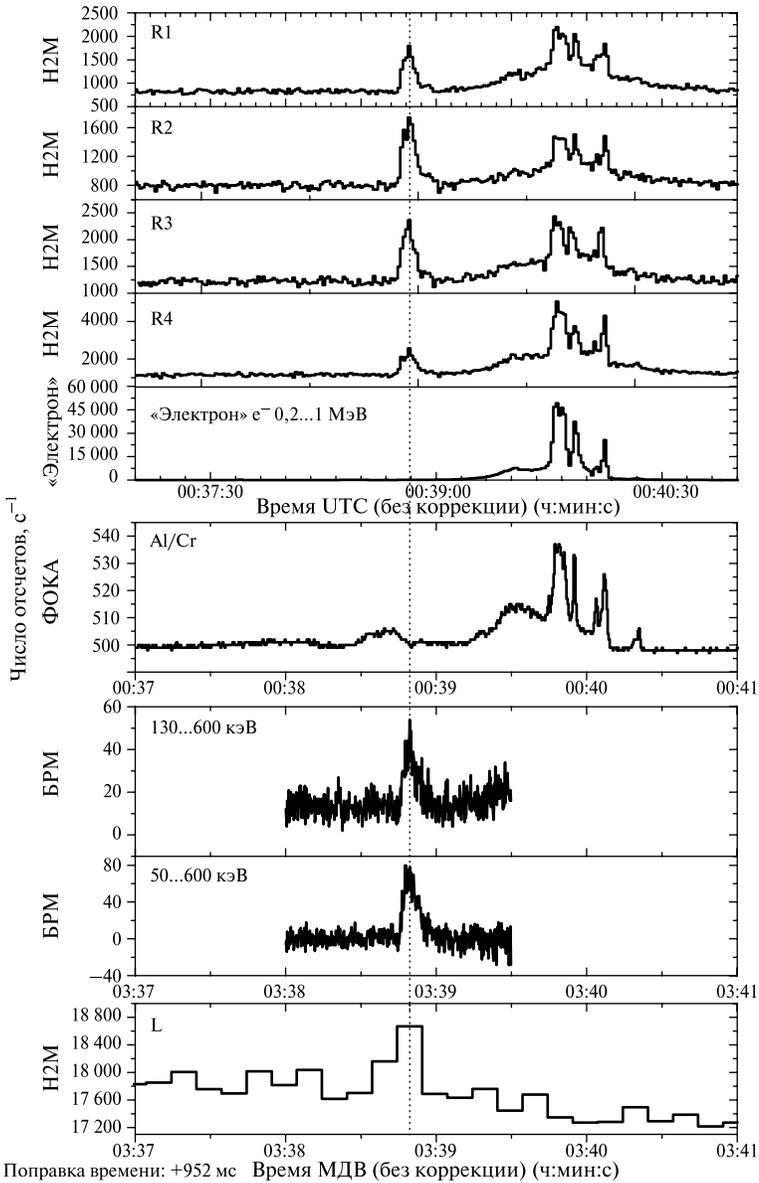


Рис. 9. Гамма-всплеск GRB090820 (прибор ФОКА — фотокатодный эксперимент, предназначенный для измерения потока солнечного электромагнитного излучения в EUV/XUV-диапазоне)

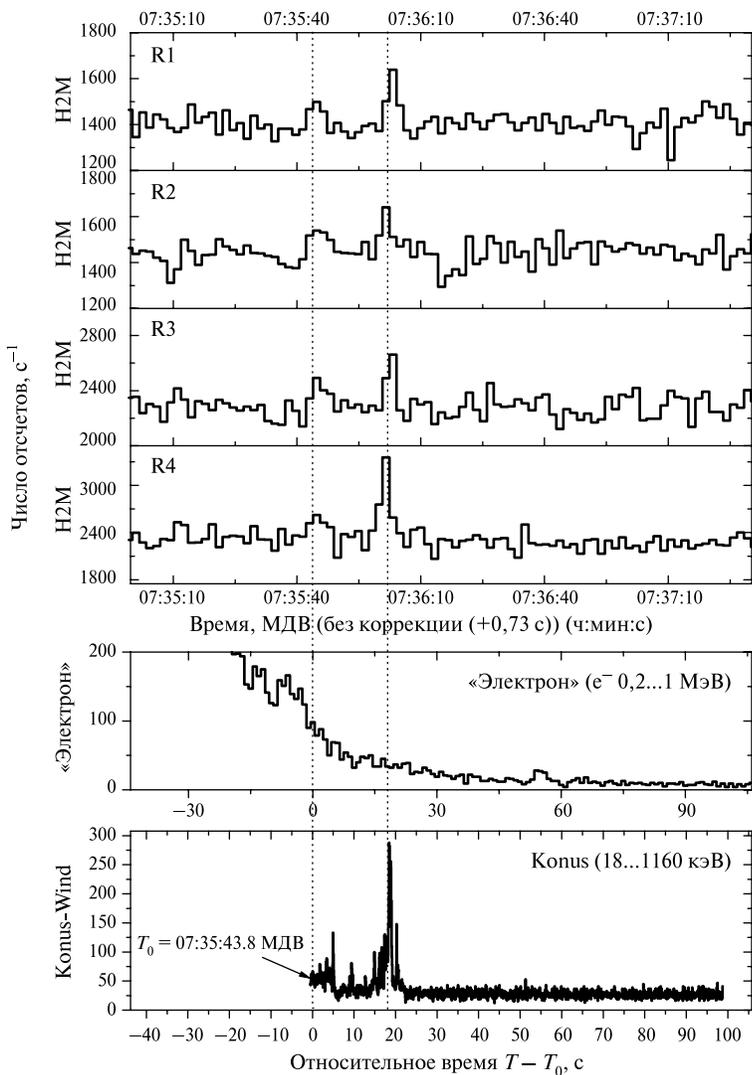
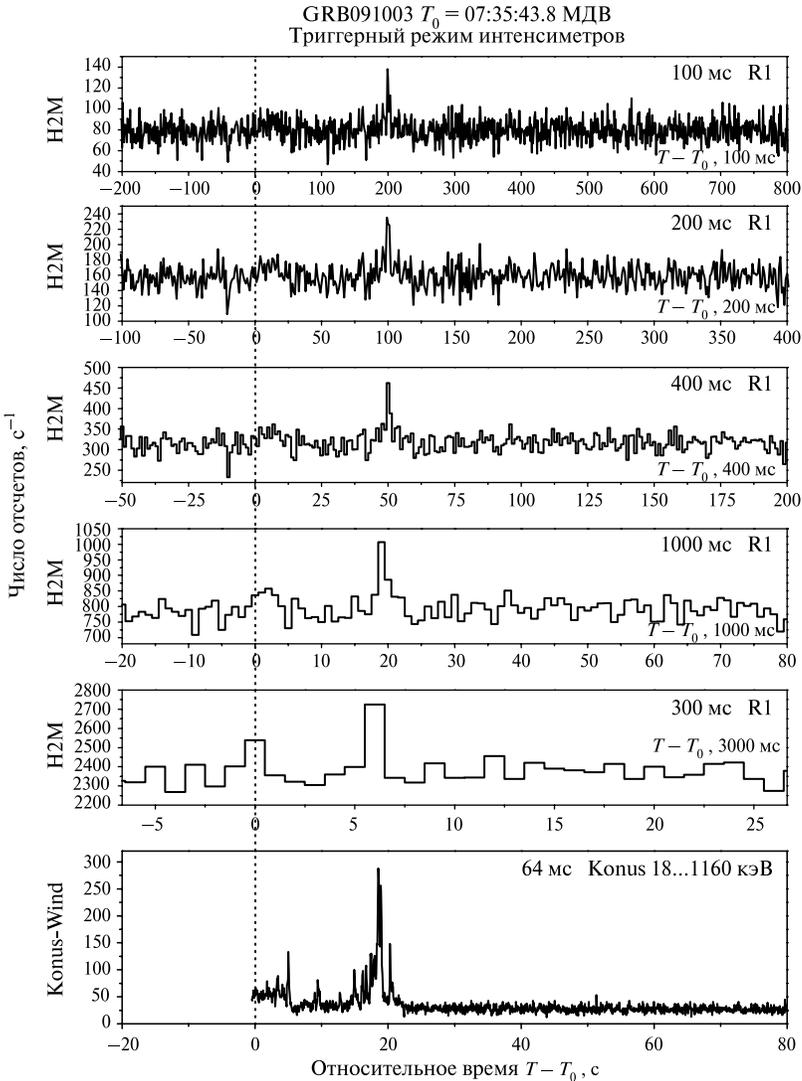


Рис. 10а. Гамма-всплеск GRB091003. Время накопления в R-каналах (слева) 2 с

**Рис. 10б.** Гамма-всплеск GRB091003

Режим работы интенсиметров каналов низких энергий в рассматриваемый период времени позволял получить информацию о потоках излучения с дискретностью $0,1$ с, однако такая статистика недостаточна для выделения мультипиковой структуры события.

ПОЛЕТНАЯ КАЛИБРОВКА И МЕТОДЫ БЫСТРОЙ ОЦЕНКИ СМЕЩЕНИЯ ШКАЛЫ ПРИБОРА

В ходе летных испытаний прибора «Наталья-2М» была отмечена долговременная нестабильность энергетических шкал каналов прибора, проявления которой не компенсируются системой автостабилизации (САС). Однозначное соотношение изменения калибровки с каким-либо известным фактором представляется весьма трудоемкой задачей, однако, по крайней мере, влиянием только температурных условий данные смещения объяснены быть не могут. Являясь важным инструментом поддержания заданных параметров измерительного тракта, система автостабилизации энергетической шкалы прибора не способна полностью компенсировать влияние всех воздействующих на него факторов. Во-первых, САС является комбинированным устройством, чьи узлы также подвержены дестабилизирующим воздействиям. Во-вторых, система имеет ряд функциональных ограничений, связанных с принципом ее работы. Например, она не позволяет компенсировать влияние факторов, изменяющих световой выход сцинтилляционного кристалла и характеристики светодиода. Эти процессы могут быть вызваны воздействием ионизирующего излучения или изменением температурного режима. Именно для учета подобных явлений долговременных изменений используется блок полетной калибровки (БСД). Его основа — радиоактивный изотоп ^{60}Co , энергия гамма-квантов распада которого не зависит ни от каких воздействий. Любые дестабилизирующие факторы (как внешние, так и внутренние по отношению к данному блоку, например, уменьшение активности изотопа со временем) оказывают влияние только на эффективность выделения гамма-линий (эффективность мечения) и статистику в калибровочных спектрах.

Блок полетной калибровки

Для настройки и калибровки низкоэнергичных R- и L-каналов спектрометра во время проведения летного эксперимента, учета влияния долговременных эффектов старения (светодиодов системы стабилизации, монокристаллов CsI(Tl)) и температурной зависимости световых выходов детекторов в приборе «Наталья-2М» служит блок БСД. Блок содержит калибровочный гамма-источник в виде полистирольного сцинтиллятора с внедренным изотопом ^{60}Co . Активность источника ^{60}Co на момент запуска КА — $1,65 \cdot 10^3$ Бк. В соответствии со схемой распада изотопа ^{60}Co излучение гамма-квантов

всегда сопровождается β -частицами со средней энергией 96 кэВ, что позволяет создать источник «меченых» гамма-квантов. Полистирольный сцинтиллятор просматривается ФЭУ-85, сигнал с которого используется как сигнал «мечения». Для получения калибровочных спектров в состав регистрирующей аппаратуры прибора введен дополнительный канал АЦП, работающий с сигналами R- и L-диапазонов в режиме совпадений с сигналом «мечения». Эффективность «мечения» гамма-квантов составляет ~95 %, а коэффициент подавления фона в калибровочных спектрах достигает $\sim 10^3$. Для исключения сигналов калибровочного источника из научных данных сигнал БСД в штатном режиме работает «запретом» для всех остальных АЦП. БСД монтируется на СЕ-1М таким образом, чтобы гамма-источник симметрично облучал торцевые грани модулей всех четырех слоев (A, B, C и D).

Проведение полетной калибровки детекторов прибора «Наталья-2М»

В соответствии с программой измерений в ходе проведения летного эксперимента для настройки и калибровки R- и L-диапазонов используются спектры от встроенного источника «меченых» фотонов ^{60}Co , для калибровки M- и H-диапазонов (высокие энергии) — спектры релятивистских протонов первичного космического излучения (в режиме телескопа).

Подробно методика полетных калибровок прибора изложена в работе [Архангельский и др., 2010].

При нормальной работе прибора, после проведения первоначальных настроек, для контроля возможных изменений предполагалось периодически поочередно переводить каналы прибора в калибровочный режим и, при необходимости, после обработки спектров на Земле, проводить корректировку энергетических шкал каналов путем изменения амплитуды импульса светодиода системы стабилизации (для каждого слоя спектрометра используется отдельный светодиод). В случае же обнаружения существенного рассогласования модулей слоя методика значительно усложняется и процедура подстройки фактически преобразуется в полную помодульную перекалибровку прибора.

За время активного существования прибора «Наталья-2М» на орбите было проведено три цикла полетной калибровки: март-апрель, июнь и ноябрь 2009 г. На рис. 11 представлены спектры совпадений с данными БСД (источник ^{60}Co) в энергетическом канале R3 (0,2...2 МэВ), набранные за трехчасовые интервалы в указанные

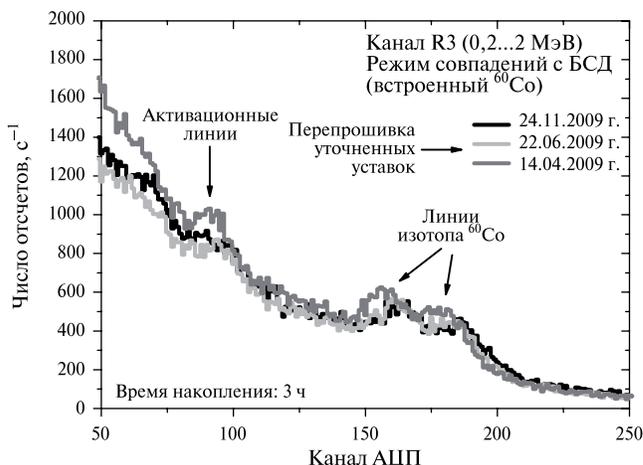


Рис. 11. Калибровочные спектры канала R3 прибора «Наталья-2М»

периоды времени (по шкале абсцисс — данные каналов АЦП). Хорошо заметно скачкообразное изменение калибровки канала июньского спектра по отношению к апрельскому, что связано с изменением уставок системы стабилизации для данного канала при проведении послепусковых подстроек.

В то же время заметно смещение между спектрами, набранными в июне и в ноябре, хотя изменения настроек в этот период не проводилось. Данные изменения могут быть связаны с долговременными эффектами нестабильности спектрометрических каналов прибора.

Для спектрометра «Наталья-2М» контроль изменения калибровок отдельных модулей имеет определяющее значение. Прежде всего согласование шкал важно для энергетического канала средних энергий (L-диапазон 1...18 МэВ), в которых формирование выходного сигнала происходит посредством суммирования сигналов с отдельных модулей. Расхождение шкал в этом случае приводит к ухудшению энергетического разрешения прибора в диапазоне ядерных линий.

Однако использование системы полетной калибровки от встроенного радиоактивного источника не лишено недостатков:

- для набора спектров необходимо перевести исследуемый канал в калибровочный режим, при этом набор штатных спектров в этом канале невозможен;
- для получения достаточной для обработки статистики в калибровочных спектрах требуется продолжительное время (несколько

часов), причем требуемое время растет с увеличением расстояния от радиоактивного источника до исследуемого модуля;

- необходимо многократно выдавать большие группы команд.

Наиболее существенный недостаток — невозможность непрерывных (или достаточно частых) калибровочных измерений, в то время как стабильность параметров прибора желательно постоянно отслеживать.

Методы оценки параметров прибора по фоновым спектрам

Для непрерывной оценки изменений энергетической шкалы каналов спектрометра использовались фоновые линии, возникающие в спектрах прибора при активации его элементов под действием потоков заряженных частиц.

На рис. 12 представлен набранный в экваториальной области 26.11.2009 г. за 50 мин типичный фоновый спектр низкоэнергетичного R-диапазона, в котором регистрируются гамма-кванты с энергиями 0,2...2 МэВ. На спектре хорошо видны группы гамма-линий с максимумами в областях энергий 410, 480 и 680 кэВ, являющиеся результатом активации изотопов цезия и йода, входящих в состав кристаллов сцинтилляционных детекторов CsI(Tl) прибора «Наталья-2М». Активация происходит главным образом в области

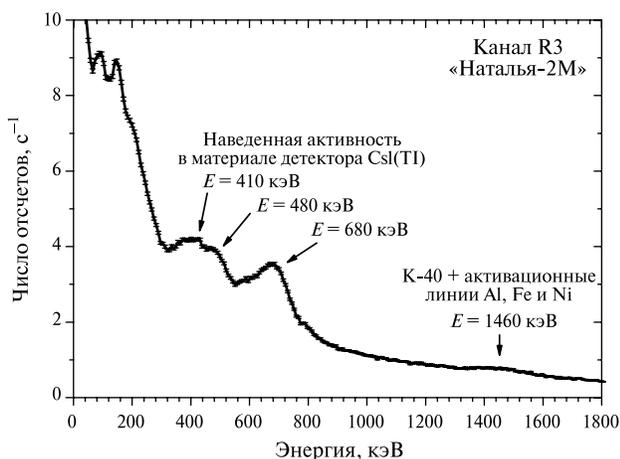


Рис. 12. Активационные линии в фоновом спектре канала R3 (0,2...2 МэВ) прибора «Наталья-2М»

Южно-Атлантической аномалии (ЮАА), которую космический аппарат пересекает примерно восемь раз в сутки. При этом образуются как коротко-, так и относительно долгоживущие изотопы. При анализе спектров с секундным временем накопления хорошо прослеживается уменьшение амплитуды комбинированных пиков после прохождения области ЮАА и смещение положения их максимумов в результате распада короткоживущих изотопов. Кроме того, на спектре виден слабо выраженный пик в области энергии 1460 кэВ, вклад в который вносят линия изотопа ^{40}K , содержащегося в материале (стекле) ФЭУ детекторов, а также линии, образовавшиеся при активации алюминия, железа и никеля в элементах конструкции КА.

В целом негативный эффект активации детекторов потоками заряженных частиц может быть использован для грубой оценки стабильности параметров прибора в полете. В соответствии с данными измерений, по крайней мере, через 2 месяца после запуска КА, скорости образования и распада долгоживущих изотопов приходят в равновесие и, уже через виток после ЮАА, когда распадаются короткоживущие изотопы, активационные спектры стабилизируются (есть хорошая повторяемость на экваториальных участках). При этом оценка с использованием фоновых линий, в отличие от штатного калибровочного режима с помощью встроенного источника ^{60}Co , не требует перевода детектора в стробируемый режим набора спектров и, следовательно, не мешает физическим измерениям. Такая «быстрая» оценка опирается на группы активационных линий (не отдельные пики), поэтому ее результаты менее точны по сравнению с калибровкой с помощью встроенного источника.

Для подтверждения эффективности методики, основанной на анализе смещения фоновых линий, были проведены оценки изменения калибровок шкал энергетических каналов R1–R4 для июня и ноября 2009 г. двумя методами: штатным, по спектрам встроенного радиоактивного источника, набранным в совпадениях с БСД, а также для близких по времени измерений по фоновым линиям (рис. 13).

Анализ показывает, что не только общее направление «ухода» калибровок, но и параметры шкал энергетических каналов регистрации, полученные по обоим методикам, находятся в хорошем соответствии друг с другом. Таким образом, «быстрая» фоновая методика достаточно эффективна.

Как было сказано ранее, цикл послепусковой настройки каналов регистрации гамма-квантов R (0,2...2 МэВ) и L (1...18 МэВ) был завершен в июне 2009 г. Для проверки стабильности работы прибора проводился ежедневный анализ фоновых спектров, набранных в энергетических каналах R1–R4 и L, в спектрах которых хорошо

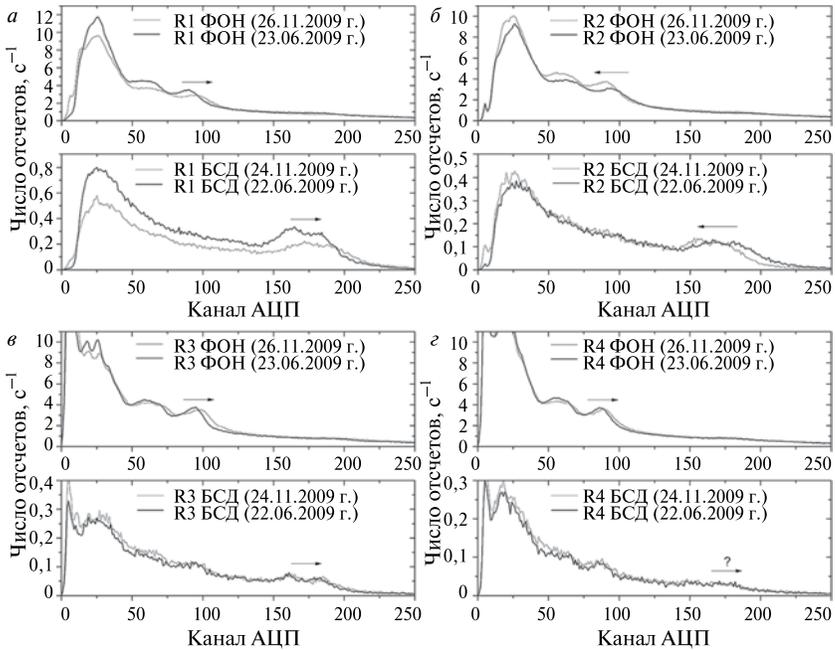


Рис. 13. Сравнение изменения параметров спектрометрических каналов R-диапазона с использованием калибровочных спектров встроенного изотопа ^{60}Co и фоновых спектров (активационные линии)

видны линии, образующиеся в результате активации сцинтилляционных детекторов CsI(Tl), определялись положения максимумов групп пиков, сравнивались полученные в разные дни результаты. Эти данные позволяли проводить корректировку шкал по фоновым пикам, а также служили основанием для перекалибровки каналов штатными методами. Такая необходимость возникает, например, вследствие рассогласованного изменения параметров спектрометрических каналов прибора, сигналы которых суммируются при формировании энергетических диапазонов L, M, N. При этом наблюдается не только существенный уход шкал по отношению к предыдущим измерениям, но и различие по величине ухода для разных каналов. Ожидалось, что влияние существенной части факторов (например, температурных условий) будет приводить к синхронным и сравнительно пропорциональным изменениям в идентичных каналах прибора. При этом не происходит ухудшения спектрометрических характеристик, только несколько изменяются границы

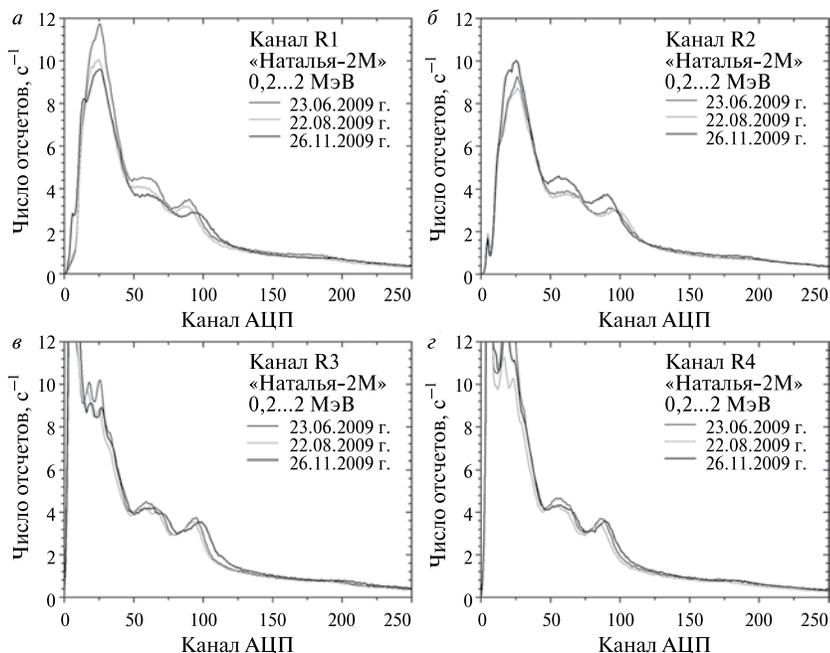


Рис. 14. Фоновые спектры каналов R1–R4 (0,2...2 МэВ) прибора «Наталья-2М», набранные в экваториальной области 23.06.2009 г., 22.08.2009 г. и 26.11.2009 г. Различия в левой части спектров каналов R1, R2 и R3, R4 объясняются разными порогами регистрации

энергетических диапазонов регистрации излучения. Однако существует возможность расхождения параметров каналов, связанная как с различием индивидуальных характеристик элементов спектрометрических трактов, так и с вероятностью полного или частичного выхода из строя этих элементов.

На рис. 14 приведены фоновые спектры четырех каналов R-диапазона (0,2...2 МэВ) прибора «Наталья-2М», набранные в экваториальной области 23.06.2009 г., 22.08.2009 г. и 26.11.2009 г. за 50 мин (после калибровки). Видно, что R-каналы прибора ведут себя по-разному, фоновые спектры в июне/августе практически совпадают, ноябрьские смещены, причем «уход» калибровки в область больших энергий (смещение линий вправо) может быть объяснен как результат нормальной работы системы автоподстройки при медленной деградации параметров светодиодной системы. Смещение калибровок может быть также связано с изменением температурных

условий в гермоотсеке КА в ноябре в связи с перенастройкой системы терморегулирования (световойход кристалла CsI(Tl) сильно зависит от температуры).

Значительное изменение коэффициента преобразования зависимости энергии от номера канала АЦП со временем (~2 % в месяц) из-за деградации детектора (по мнению авторов) отмечалось во время проведения эксперимента с прибором СОНГ КА «КОРОНАС-Ф», также использующим в качестве регистрирующего блока сборку ФЭУ и сцинтиллятора CsI(Tl) [Котов и др., 2002; Архангельская и др., 2005].

На рис. 14б приведен пример рассогласованного изменения — «уход» калибровки канала R2 в противоположную сторону относительно трех других каналов R-диапазона. Такое поведение канала представляется не вполне понятным, так как подобным образом система реагировала бы на увеличение регистрируемого светового сигнала от светодиода или улучшение оптического контакта ФЭУ — сцинтиллятор.

Выявленные изменения параметров спектрометрических каналов потребовали проведения перекалибровки детектора, которая была осуществлена в конце ноября 2009 г.

На рис. 15а представлены калибровочные спектры ^{60}Co в каналах R-диапазона спектрометра, построенные на общей шкале энергий. Хорошо заметно, как падает интегральная загрузка каналов при увеличении расстояния от радиоактивного источника до модуля детектора (R1 расположен ближе к источнику, R4 — дальше). Существенный вклад случайных совпадений сигнала «мечения», выдаваемого блоком БСД, с фоновыми событиями делает идентификацию пиков кобальта для удаленных модулей трудной задачей. К сожалению, из-за потери связи с КА «КОРОНАС-Фотон» не удалось провести второй этап настройки, а именно, сведение шкал отдельных каналов при помощи изменения уставок системы стабилизации (усиления ФЭУ), поэтому были только скорректированы соответствующим образом границы диапазонов каналов R1-R4.

На рис. 15б приведены соответствующие фоновые спектры перекалиброванных каналов, набранные через два дня. Видно, что положения пиков активационных линий совпали.

Полетная калибровка каналов высоких энергий

Для калибровки M (7...250 МэВ) и H (50...1600 МэВ) диапазонов в ходе проведения летного эксперимента использовались накопленные спектры энерговыделений релятивистских протонов первично-

го космического излучения (режим телескопа). Регистрировались энергетические потери заряженных частиц, проходящих прибор «насквозь» (с малыми углами падения — $\pm 13^\circ$ относительно нормали) через область в центре рабочей поверхности размером примерно 8×8 см [Архангельский и др., 2010].

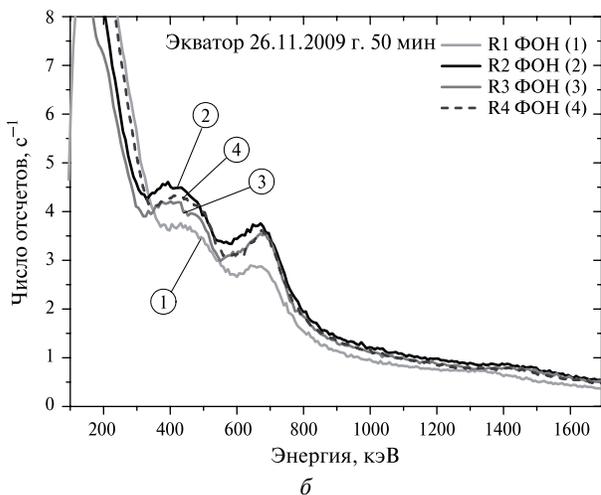
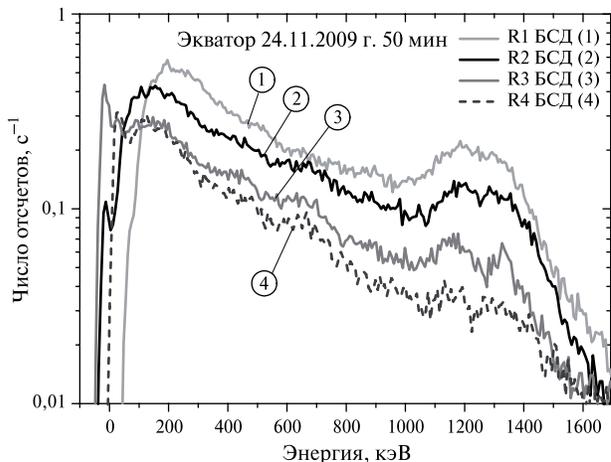


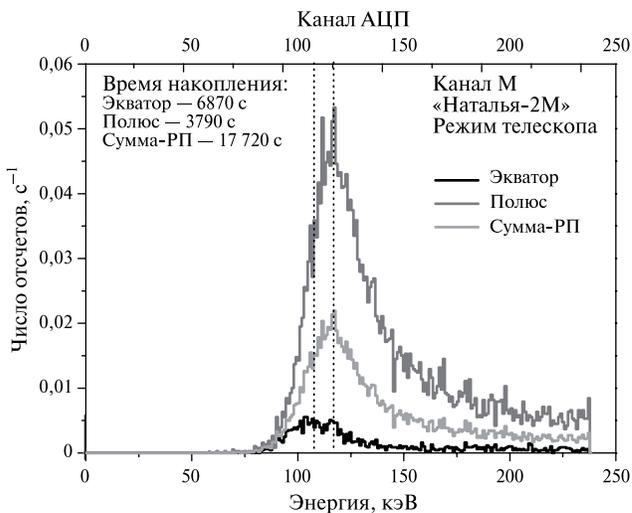
Рис. 15. Калибровочные спектры каналов R1–R4 (0,2...2 МэВ) прибора «Наталья-2М», набранные 24.11.2009 г. (а), фоновые спектры тех же каналов после калибровки 26.11.2009 г. (б)

На рис. 16 представлены спектры энерговыделений в каналах М и Н, набранные в режиме телескопа при проведении первоначальных калибровок в мае 2009 г. Отдельными кривыми на графиках представлены спектры для экваториальных и приполярных участков орбиты, также приведен полный спектр за 6 ч (вычтены радиационные пояса). Основной вклад в спектр частиц, как и ожидалось, вносят области высоких широт.

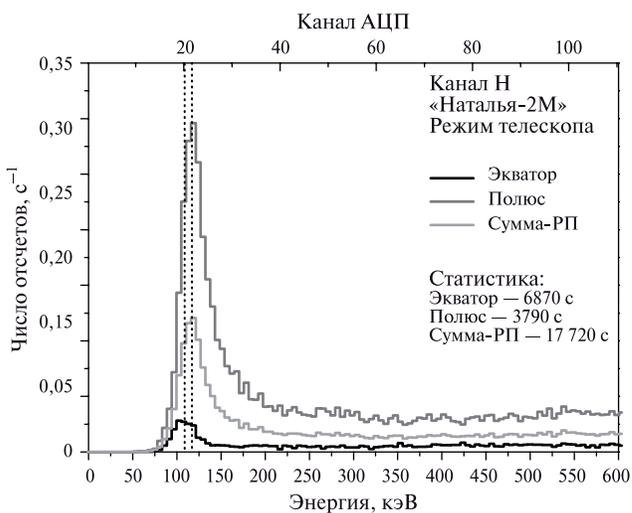
Как видно на рис. 16, положение максимумов энерговыделений высокоэнергичных протонов существенно зависит от того, в каких широтах набирался спектр. Максимумы пиков для спектров, набранных в экваториальных и полярных областях, не совпадают вследствие различия в пороге геомагнитного обрезания. Основной вклад в спектр на экваторе вносят протоны с энергией более 10 ГэВ (порог обрезания для вертикальных направлений ~14...17 ГэВ). В то же время для полярных областей на широтах ~80° пороговая энергия протонов падает до сотен килоэлектронвольт и нижняя граница энергий частиц, дающих вклад в спектр, ограничивается минимальной энергией протонов, необходимой для прохождения сквозь весь детектор (300...500 МэВ), поэтому регистрируются в основном протоны с энергиями ≤ 1 ГэВ, потери для которых выше.

Хотя вклад экваториальных областей в суммарный спектр мал, при калибровке выбирались именно экваториальные участки, так как кривая ионизационных потерь на энергиях около 10 ГэВ имеет простой аналитический вид (медленный логарифмический рост).

На рис. 17 представлены фоновые спектры, набранные 22.08.2009 г. и 26.11.2009 г. в энергетических каналах М и Н в экваториальной области за 50 мин. Приведенные спектры не имеют выраженных особенностей, поэтому методика «быстрой» оценки стабильности параметров М- и Н-каналов опирается на сравнение формы спектров, набранных в разное время. Поскольку для областей высоких энергий энергетическое разрешение детектора гораздо менее существенно, чем для области ядерных линий, параметры спектрометра подстраиваются по данным R- и L-каналов, а для М- и Н-каналов проводится периодическая перекалибровка. Анализ формы спектров, снятых в августе 2009 г. и через три месяца в ноябре 2009 г., показывает, что фоновые спектры практически идентичны с учетом погрешностей (незначительные отличия могут объясняться теми же факторами, что и для каналов низких энергий — медленной деградацией светодиодной системы и изменением температурных условий). Применение доступных методов контроля состояния детекторов позволяет сделать заключение о стабильной работе энергетических каналов М и Н прибора «Наталья-2М».



а



б

Рис. 16. Калибровочные спектры энергосделений протонов высоких энергий в энергетических каналах М (а) и Н (б) прибора «Наталья-2М» в режиме телескопа

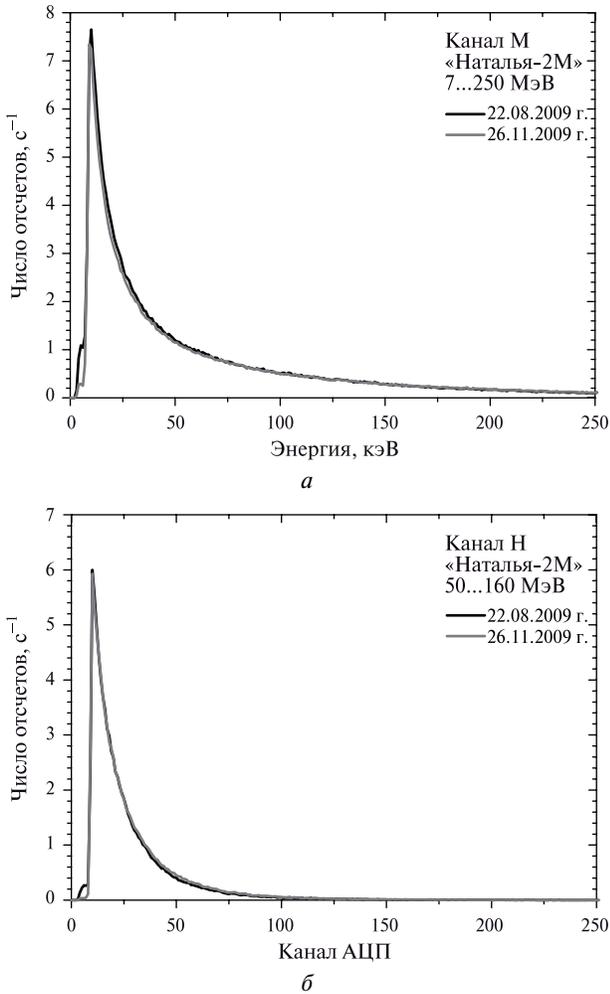


Рис. 17. Фоновые спектры в каналах М (7...250 МэВ) и Н (50...600 МэВ) прибора «Наталья-2М»

Заключение

Из-за низкой активности Солнца за время функционирования прибор «Наталья-2М» не зарегистрировал солнечных вспышек в диапазоне энергий гамма-квантов 0,2...1600 МэВ. Непродолжительные

возрастания солнечной активности в июле и октябре–ноябре 2009 г. не сопровождались появлением вспышек класса выше C2.7 и не имели жесткой компоненты излучения с потоком, достаточным для их уверенного выделения детекторами прибора относительно уровня фона.

За период с 19.02.2009 г. по 01.12.2009 г. прибор «Наталья-2М» работал нормально, в штатном режиме (01.12.2009 г. прибор был отключен из-за сбоя в системе электропитания КА). Прибор непрерывно (за исключением периодов настройки и калибровки) регистрировал временные профили скоростей счета интенсиметров и фоновые спектры во всех энергетических каналах. При обработке на Земле передаваемых с орбиты данных регулярно проводилась оценка стабильности параметров детекторов прибора. Во время проведения эксперимента все детекторы в составе прибора «Наталья-2М» работали стабильно, небольшие отклонения зафиксированы только для модуля A2 (энергетический канал R2), в спектрах которого обнаружен сравнительно большой уход пиков калибровочного источника от заданного при настройке положения. Для устранения рассинхронизации шкал детекторов R-диапазона потребовалось проведение подстройки параметров канала R2.

За время реализации программы научных исследований прибором «Наталья-2М» было зарегистрировано несколько событий типа «гамма-всплеск» в энергетическом диапазоне 0,2...18 МэВ (R- и L-каналы прибора).

Литература

- [Архангельский и др., 2010] *Архангельский А. И., Бессонов М. В., Буслов А. С.* и др. Спектрометр высокоэнергичных излучений «Наталья-2М». Полетная калибровка, настройка и первые научные данные // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту КОРОНАС-Фотон: Тр. рабочего совещания. Россия, Таруса, 22–24 апр. 2009. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 55–82. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Архангельская и др., 2005] *Архангельская И. В., Червякова О. И., Архангельский А. И.* и др. Изучение стабильности работы спектрометрического тракта аппаратуры АВС-Ф в низкоэнергетическом γ -диапазоне // Научная сессия МИФИ, 2005. Т. 7. С. 32–33.
- [Космический..., 2008] Космический комплекс «КОРОНАС-Фотон»: Справочные материалы. ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008.
- [Котов и др., 2010] *Котов Ю. Д., Юров В. Н., Архангельский А. И.* и др. Спектрометр высокоэнергичных излучений «Наталья-2М». Первоначальное включение, проверка работоспособности и настройка на орбите КА

- «КОРОНАС-Фотон» // *Космич. наука и технология*. 2010. Т. 16. № 2. С. 58–64.
- [Котов и др., 2002] *Котов Ю. Д., Архангельская И. В., Архангельский А. И.* и др. Предварительные результаты обработки данных с прибора АВС-Ф в энергетическом диапазоне 0,1...11 МэВ // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2002. Т. 66. № 11. С. 1666–1668.
- [Юров и др., 2005] *Юров В. Н., Самойленко В. Т., Лупарь Е. Э.* и др. Спектрометр высокоэнергичных излучений «Наталья-2М» космического проекта КОРОНАС-Фотон // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2005. Т. 69. № 6. С. 914–917.
- [Chupp, 1990] *Chupp E. L.* Emission Characteristics of Three Intense Solar Flares Observed in Cycle 21 // *Astrophysical J.* 1990. V. 73. P. 213–226.
- [Kotov et al., 2001] *Kotov Yu. D., Yurov V. N., Samoilenko V. T., Rubtsov I. V.* Stabilized 0.3...2000 MeV Gamma-Ray Spectrometer for Satellite Mission CORONAS-Photon // *Proc. ICRC*. 2001. P. 3030–3033.

HIGH-ENERGY SPECTROMETER NATALYA-2M. ON-ORBIT FUNCTIONING AT CORONAS-PHOTON SPACECRAFT

Е. Е. Лупарь, В. Н. Юров, К. Ф. Власик

*National Research Nuclear University “MEPhI”
(NRNU MEPhI), Moscow*

In this paper the results of space experiment Natalya-2M onboard space vehicle CORONAS-Photon are presented. Some aspects of functioning of the instrument Natalya-2M on orbit, concerning working efficiency and stability of performances, and the scientific data received with Natalya-2M are described. The concise description of blocks and structural elements of the instrument essentially determining formation of an energy band and providing capabilities of in-flight adjustment is resulted. Registrabilities of the spectrometer for the solar events which have occurred during measurement time are analyzed.

Keywords: CORONAS-Photon, Solar physics, Natalya-2M, gamma-spectrometer, in-flight calibration, gamma-spectra, temporal profiles, solar flares, gamma-ray bursts (GRB).

Lupar Evgeny Eduardovich — engineer, e-mail: EELupar@mephi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — deputy director of the Astrophysics Institute MEPhI, PhD, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

Vlasik Konstantin Fedorovich — leading engineer, PhD, e-mail: KFV6490@mail.ru.

РЕГИСТРАЦИЯ БЫСТРЫМ РЕНТГЕНОВСКИМ МОНИТОРОМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КРАТКОВРЕМЕННЫХ СОБЫТИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Ю.А. Трофимов, В.Н. Юров, Ю.Д. Котов

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Федерального агентства
по образованию РФ, Институт астрофизики (ИАФ), Москва*

Быстрый рентгеновский монитор (БРМ), предназначенный для измерения потока жесткого рентгеновского и гамма-излучений солнечных вспышек в диапазоне энергий 20...600 кэВ с временным разрешением до 1 мс, работал на борту космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» с 19 февраля по 1 декабря 2009 г. К сожалению, надежно зарегистрировать излучение хотя бы одной солнечной вспышки не удалось, так как во время работы БРМ на орбите наблюдалась аномально низкая солнечная активность. Интенсивность жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек была ниже порога регистрации детектором прибора. Однако БРМ регистрировал события, не связанные с солнечными вспышками: кратковременные возрастания скорости счета (продолжительностью не более 1 мс), вероятно, вызванные прохождением через детектор протонов и ядер космических лучей, более длительные возрастания скорости счета (продолжительностью 1...2 с), причины возникновения которых не установлены, и космические гамма-всплески.

Ключевые слова: БРМ (Быстрый Рентгеновский Монитор), сцинтиллятор $\text{YAlO}_3(\text{Ce})$, рентгеновское излучение солнечных вспышек, гамма-всплески, протоны космических лучей.

КОНСТРУКЦИЯ И НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА

Быстрый рентгеновский монитор работал в составе комплекса научной аппаратуры космического аппарата (КА) «КОРОНАС-Фотон»

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

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора Института астрофизики МИФИ, кандидат физико-математических наук, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

Котов Юрий Дмитриевич — директор Института астрофизики МИФИ, кандидат физико-математических наук, e-mail: kotov@mephi.ru.

с 19 февраля по 1 декабря 2009 г. Прибор предназначался для измерения потока жесткого рентгеновского и гамма-излучений солнечных вспышек в диапазоне энергий 20...600 кэВ в шести дифференциальных энергетических каналах (20...30; 30...40; 40...50; 50...70; 70...130; 130...600 кэВ) с временным разрешением до 1 мс [Kotov et al., 1996].

Регистрация излучения осуществлялась сцинтилляционным детектором на основе кристалла алюмоиттриевого перовсита, активированного церием ($YAlO_3(Сe)$ или $YAP:Ce$), диаметром 70 мм и высотой 10 мм. Сцинтиллятор просматривается фотоэлектронным умножителем ФЭУ-183 с рабочим диаметром фотокатода 72 мм. Для уменьшения фоновой загрузки детектора перед кристаллом расположен коллиматор, ограничивающий угол зрения прибора 12° . Коллиматор представляет собой сотовую конструкцию, собранную из медных пластин высотой 85 мм и толщиной 1 мм. Расстояние между пластинами 6 мм.

На рис. 1 представлена зависимость эффективности регистрации детектора БРМ от энергии излучения. Данная зависимость была получена по результатам численного моделирования отклика детектора в пакете Geant4 [Agostinelli et al., 2003]. В расчетах применялась модель детектора, максимально соответствующая блоку детектора прибора БРМ, учитывались элементы конструкции блока, оказывающие наибольшее влияние на регистрируемый поток излучения, и зависимость энергетического разрешения детектора от энергии излучения. Максимальная эффективность регистрации детектора составила 72 % при энергии 80 кэВ. Падение эффективности при

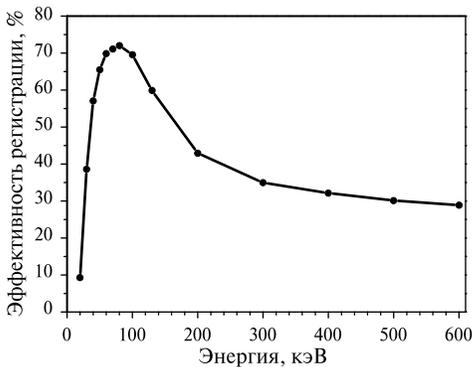


Рис. 1. Зависимость эффективности регистрации детектора прибора БРМ от энергии излучения

больших энергиях связано с уменьшением сечения взаимодействия и малой толщиной сцинтиллятора (1 см), при меньших энергиях — вызвано поглощением излучения во входном окне детектора (1 мм алюминиевого сплава Д16Т) и нижним порогом энергетической шкалы (часть событий из-за конечного разрешения детектора дает сигнал меньше 20 кэВ). На величине эффективности регистрации сказывается также поглощение в медном коллиматоре, который закрывает примерно 27 % площади сцинтиллятора.

Временное разрешение прибора БРМ определялось интервалами времени накопления данных и изменялось командами с Земли в диапазоне от 1 мс до примерно 1 мин. В режиме с временным разрешением 1 мс прибор мог работать непрерывно не более 30 с. Это ограничение определялось скоростью информационного обмена с системой сбора и регистрации научной информации КА (ССРНИ) и объемом буферной памяти контроллера прибора БРМ. Временное разрешение — не менее 7 мс в режиме непрерывного проведения измерений. В табл. 1 приведены доли времени работы прибора в режимах с различным временным разрешением на борту КА «КОРОНАС-Фотон».

Таблица 1

Доля времени работы прибора БРМ в режимах с различным временным разрешением на борту КА «КОРОНАС-Фотон» с 19.02.2009 по 1.12.2009

| Временное разрешение, мс | Доля времени, % |
|--------------------------|-----------------|
| 1000 | 10 |
| 100 | 4 |
| 20 | 12 |
| 10 | 66 |
| Не работал | 8 |

Подробнее конструкция и характеристики прибора описаны в работе [Трофимов и др., 2011].

ФОНОВЫЕ УСЛОВИЯ НА ОРБИТЕ

Космический аппарат «КОРОНАС-Фотон» был запущен на круговую околоземную орбиту высотой около 550 км и наклоном 82,5°. Для данной орбиты характерны достаточно сложные наблюдательные и фоновые условия с точки зрения регистрации жесткого рентгеновского и гамма-излучения Солнца. Во-первых, примерно

26 % времени КА находился в тени Земли, и регистрация солнечного излучения была невозможна. Во-вторых, наблюдались значительные потоки заряженных частиц при пересечении радиационных поясов Земли (РПЗ). На рис. 2 приведен типичный временной профиль фоновой скорости счета прибора БРМ за один виток. Экваториальные участки орбиты оптимальны для регистрации событий, скорость счета порядка 100 отсчетов в секунду в канале 20...600 кэВ. Гораздо менее пригодны для регистрации событий области полярных шапок, где скорость счета прибора в канале 20...600 кэВ достигала 1000 отсчетов в секунду, что связано с потоками заряженных частиц космических лучей [Трофимов и др., 2010]. В моменты нахождения в зонах внешнего и внутреннего (Южно-Атлантическая аномалия) радиационных поясов регистрация полезных событий невозможна. В табл. 2 приведены доли времени работы прибора на борту КА «КОРОНАС-Фотон» на различных участках орбиты.

Таблица 2

Доля времени работы прибора БРМ на различных участках орбиты КА «КОРОНАС-Фотон» с 19.02.2009 по 1.12.2009

| Условия наблюдения | Доля времени, % |
|---|-----------------|
| Хорошие (экваториальные участки орбиты) | 40 |
| Удовлетворительные (области полярных шапок) | 45 |
| Непригодные (радиационные пояса Земли) | 15 |

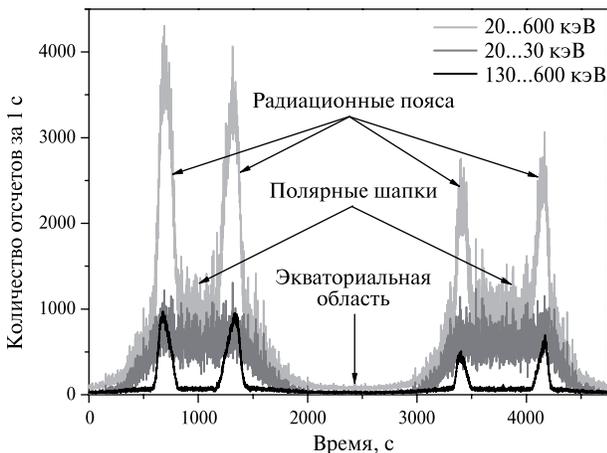


Рис. 2. Временной профиль фоновой скорости счета прибора БРМ за один виток в каналах: 20...600, 20...30 и 130...600 кэВ

ВЫБРОСЫ

При переключении БРМ в режим с временным разрешением 20 или 10 мс в данных, получаемых с прибора, наблюдались выбросы — резкие увеличения скорости счета в каналах в течение 1–2 последовательных наборов (серые вертикальные линии на рис. 3). Уменьшение временного разрешения до 1 мс не позволило увидеть временную структуру выбросов, они так и остались событиями длительностью 1–2 набора. Это означает, что длительность выброса не превышает 1 мс, а двухнаборные выбросы связаны со случайными наложениями данных событий или регистрацией одного события в конце первого и начале второго набора.

Исследование данного явления на массивах данных с временным разрешением 1 мс показало, что статистика выбросов подчиняется распределению Пуассона со средним около пяти событий в секунду на экваториальных участках орбиты и порядка 50 событий в секунду в полярных областях. На рис. 4 представлен широтный ход количества выбросов, кривая построена по данным с временным разрешением 10 мс, полученным за один «проход» участка орбиты. При таком временном разрешении не представляется возможным корректно определить количество выбросов в полярных областях, так как существенные искажения вносит большое количество наложений

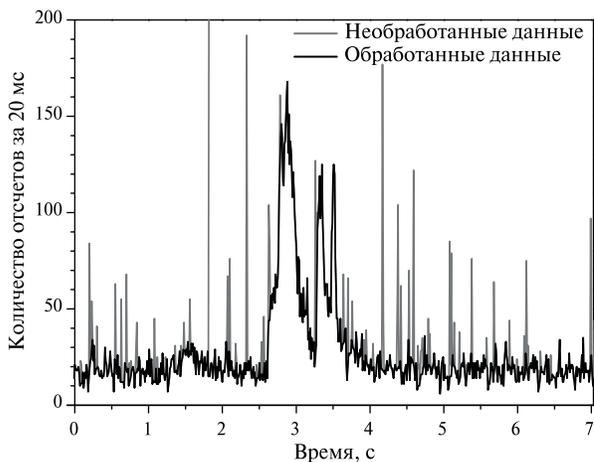


Рис. 3. Выбросы (серые вертикальные линии) в данных прибора на фоне гамма-всплеска GRB090408B, канал 20...600 кэВ. Черная линия — результат обработки алгоритмом корректировки данных

событий друг на друга. По этой причине на рисунке в приполярных областях количество выбросов чуть более 30 в секунду вместо 50 событий в секунду, полученных по данным с разрешением 1 мс. Широтный ход количества выбросов коррелирует с широтным ходом скоростей счета в каналах прибора, из чего можно сделать вывод, что изменение количества выбросов в зависимости от координат, так же как и изменение фоновых скоростей счета в каналах, связано с конфигурацией магнитного поля Земли.

Вероятнее всего, выбросы связаны с прохождением через сцинтиллятор детектора протонов и ядер космических лучей (КЛ) высоких энергий. Действие земного магнитного поля приводит к эффекту геомагнитного обрезания космических лучей: для каждой геомагнитной широты Земли с данного направления могут приходить частицы с энергией выше пороговой. На рис. 4 треугольниками представлены результаты расчета потока протонов КЛ через сцинтиллятор прибора БРМ по данным, приведенным в [Seo et al., 1991], с учетом зависимости порога геомагнитного обрезания от координат [Птускин, 1991]. В области от -30 до $+45^\circ$ порог обрезания превышает 5 ГэВ, и результаты расчета хорошо согласуются с количеством выбросов. С увеличением широты порог обрезания снижается, что приводит к росту потока протонов.

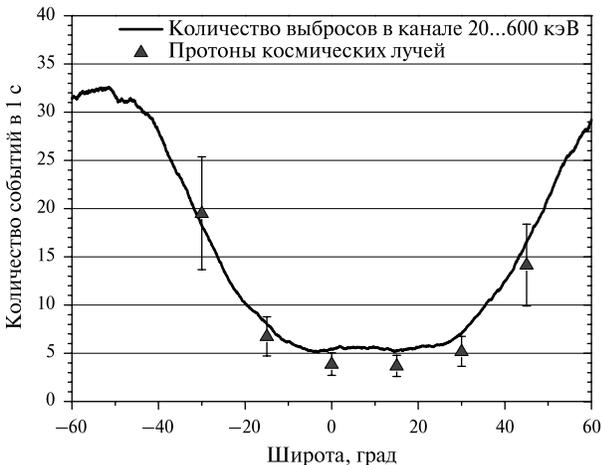


Рис. 4. Широтный ход количества выбросов в канале 20...600 кэВ и потока протонов космических лучей через сцинтиллятор детектора БРМ

Релятивистский протон, проходя через сцинтиллятор прибора, теряет порядка 15 МэВ в 1 см $YAlO_3$. Такое большое энерговыделение в кристалле, возможно, вызывает в нем продолжительное послесвечение, которое, регистрируясь как множество отдельных импульсов малой амплитуды, образует выброс, либо перегружающий импульс приводит к дребезгу в электронном тракте прибора, который также может регистрироваться как выброс.

Максимальное количество отсчетов в выбросе или амплитуда наблюдается в канале 20...30 кэВ и быстро убывает с ростом энергии в последующих каналах. Большинство выбросов имеет малую амплитуду и не распространяется дальше второго канала (30...40 кэВ).

Для уменьшения влияния выбросов на флуктуации скорости счета в каналах и корректного отображения зарегистрированных событий данные с прибора подвергались обработке специальным корректирующим алгоритмом. На рис. 3 демонстрируется действие данного алгоритма на примере гамма-всплеска GRB090408B, зарегистрированного прибором БРМ 8 апреля 2009 г. Можно заметить, что выбросы (серые вертикальные линии) успешно удалены, тогда как временной профиль события (гамма-всплеска) практически не искажился.

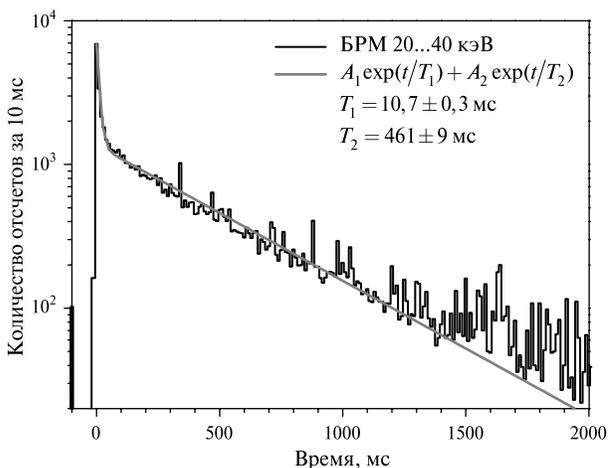


Рис. 5. Большой выброс длительностью около 1 с, зарегистрированный прибором БРМ 2009.11.21, T0 09:01:59,93 UTC, диапазон 20...40 кэВ, A_1 и A_2 — нормирующие коэффициенты перед exp

В данных прибора БРМ были также обнаружены события необычно большой амплитуды и длительности. В отличие от выбросов данные события имеют временную структуру: моментальный рост (1–2 набора), быстрый спад с постоянной времени (T_1) порядка 10 мс, затем медленный спад с постоянной времени (T_2) несколько сотен миллисекунд (рис. 5). При анализе данных с прибора БРМ было найдено около двадцати событий данного типа, большая часть из них зарегистрирована в экваториальной области как на освещенных, так и на теневых участках орбиты. Вероятно, такие события имеют причины возникновения, отличные от вышеописанных выбросов, однако природа данных явлений пока не установлена.

ГАММА-ВСПЛЕСКИ

Несмотря на то, что прибор не предназначен для регистрации гамма-всплесков (малая эффективная площадь детектора, ограниченный коллиматором и конструкционными элементами КА угол зрения прибора), БРМ зарегистрировал не менее восьми гамма-всплесков: GRB090406, GRB090408B, GRB090618, GRB090709, GRB090820, GRB090926A, GRB091003A, GRB091031. Регистрация всплесков была подтверждена как другими приборами КА «КОРОНАС-Фотон» («Конус-РФ», «Пингвин-М», «Наталья-2М»), так и аппаратурой на других космических аппаратах (Wind, Swift, Fermi). На рис. 6 приведены временные профили шести гамма-всплесков, зарегистрированных прибором БРМ с наилучшей статистикой.

Гамма-всплески равномерно распределены по небесной сфере и направление прихода излучения от них произвольно. Так как прибор БРМ был разработан для регистрации солнечного излучения на борту КА, имеющего солнечную ориентацию, то детектор имеет минимальную толщину вещества и максимальную эффективную площадь вдоль оси прибора, ориентированной на центр диска Солнца. При отклонении от оси прибора эффективная площадь детектора сокращается за счет уменьшения видимой площади кристалла и увеличения толщины вещества конструктивных элементов, закрывающих детектор, в том числе и коллиматора. Особенно сильно увеличение толщины вещества сказывается на менее энергичной части спектра, что приводит к значительному уменьшению эффективности регистрации излучения от гамма-всплесков в низкоэнергичных каналах прибора. По этой причине на приведенных графиках энергетические диапазоны начинаются не с 20, а с 40...50 кэВ. Для увеличения статистики отсчетов было также произведено суммирование последовательных наборов вплоть до двух секунд.

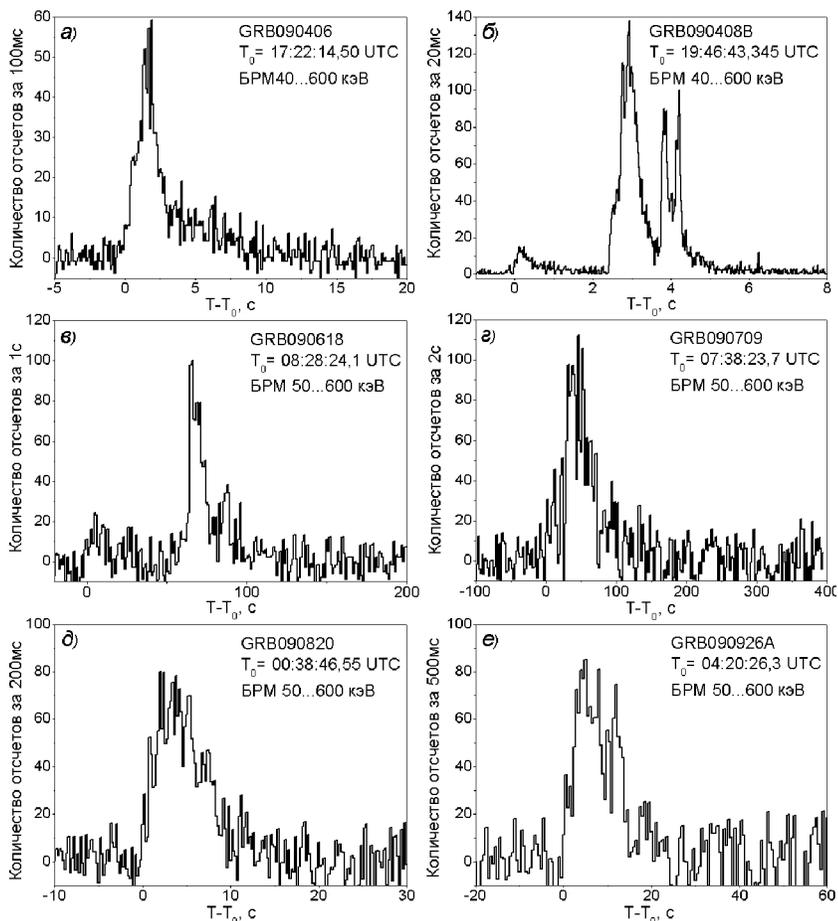


Рис. 6. Временные профили некоторых гамма-всплесков, зарегистрированных прибором БРМ: *а* — GRB090406; *б* — GRB090408b; *в* — GRB090618; *г* — GRB090709; *д* — GRB090820; *е* — GRB090926a

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

В 2009 г. Солнце находилось в минимуме активности. За время работы прибора БРМ на орбите на Солнце произошло тринадцать вспышек С-класса и ни одной вспышки М или Х классов. Рентгеновское излучение практически всех солнечных вспышек имело интенсивность ниже порога чувствительности прибора.

Так, например, крупнейшая в 2009 г. вспышка 5 июля класса C2,7 по оценке должна была дать вклад в скорость счета в канале 20...30 кэВ около 14 соб. с⁻¹, тогда как фоновая скорость счета в этот момент составляла 800 соб. с⁻¹. Столь малый вклад события в скорость счета прибора объясняется двумя причинами: небольшой интенсивностью данной солнечной вспышки в рассматриваемом

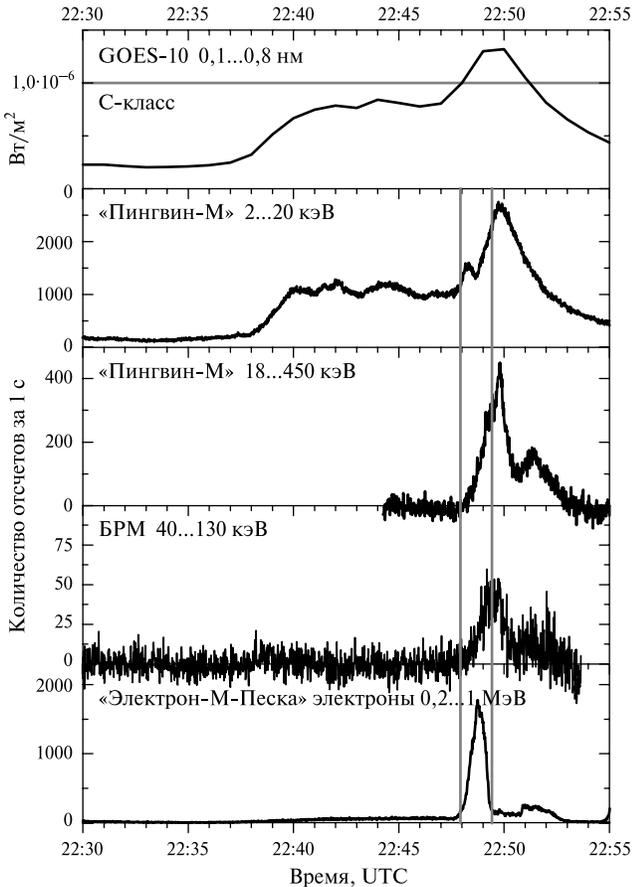


Рис. 7. Солнечная вспышка 26 октября 2009 г. класса C1.3 по данным аппаратуры КА GOES-10 и приборов «Пингвин-М» и БРМ КА «КОРОНАС-Фотон» и высыпание электронов РПЗ в то же время по данным прибора «Электрон-М-Песка» КА «КОРОНАС-Фотон»

диапазоне энергий (порядка $2 \text{ соб. с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ в диапазоне 20...30 кэВ) и малой эффективной площадью прибора БРМ в канале 20...30 кэВ, которая, в свою очередь, вызвана низкой эффективностью регистрации в данном диапазоне (см. рис. 1). Оценка интенсивности этой вспышки получена с использованием спектральных данных прибора RT-2, который также был установлен на борту КА «КОРОНАС-Фотон» [Rao et al., 2010].

Во время вспышки класса C1,3, произошедшей 26 октября 2009 г., ряд приборов КА «КОРОНАС-Фотон», в том числе прибор БРМ, зарегистрировал возрастание скорости счета в каналах жесткого рентгеновского излучения. Прибор регистрировал данное возрастание начиная с 22:48 UTC в течение 3 мин в диапазоне энергий 40...130 кэВ. Временной профиль события, по данным БРМ, совпадает с данными прибора «Пингвин-М», входившего в состав научной аппаратуры КА «КОРОНАС-Фотон» [Kotov et al., 2011], в диапазоне 18...450 кэВ (рис. 7). Время максимума интенсивности данного события согласуется с максимумом интенсивности мягкого рентгеновского излучения по данным аппаратуры спутника GOES 10 в диапазоне 0,1...0,8 нм (1,5...12 кэВ) и прибора «Пингвин-М» в диапазоне 2...20 кэВ.

Анализатор заряженных частиц «Электрон-М-Песка» КА «КОРОНАС-Фотон» зарегистрировал возрастание скорости счета электронов энергией 0,2...1 МэВ, связанное с высыпанием частиц из РПЗ. Данное высыпание (нижний график рис. 7) частично перекрывается с возрастанием скорости счета в данных приборов БРМ и «Пингвин-М». Следовательно, начальная фаза события, зарегистрированного приборами БРМ и «Пингвин-М» (с 22:48:00 по 22:49:30 UTC), вероятно, является суммой событий, связанных с солнечной вспышкой и воздействием электронов РПЗ.

Заключение

Прибор БРМ успешно работал в составе комплекса научной аппаратуры КА «КОРОНАС-Фотон» с 19 февраля по 1 декабря 2009 г. 66 % этого времени прибор вел наблюдения в режиме с временным разрешением 10 мс. В данных прибора наблюдались выбросы — кратковременные изменения скорости счета в каналах прибора с длительностью 1–2 набора, вероятно, связанные с прохождением через сцинтиллятор прибора энергичных протонов и ядер космических лучей. Помимо этого наблюдались более продолжительные события, длительностью до 1...2 с, причины возникновения которых не установлены. К сожалению, в 2009 г. Солнце находилось в минимуме

активности, интенсивность рентгеновского излучения большинства солнечных вспышек в диапазоне энергий более 20 кэВ была недостаточна для регистрации прибором БРМ. Единственное событие типа солнечная вспышка было зарегистрировано 26 октября 2009 г., однако оно частично перекрылось по времени с высыпанием электронов РПЗ. Прибор зарегистрировал не менее восьми космических гамма-всплесков, в том числе и очень яркое событие GRB090408B, произошедшее 8 апреля 2009 г.

Литература

- [Птускин, 1991] *Птускин В. С.* Космические лучи // Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 1173.
- [Трофимов и др., 2010] *Трофимов Ю. А., Котов Ю. Д., Юров В. Н.* и др. Быстрый рентгеновский монитор (БРМ), результаты первого этапа летных испытаний // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту КОРОНАС-Фотон: Тр. рабочего совещания / Под ред. Р. Р. Назирова, И. В. Чулкова, В. Н. Юрова. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 143–154.
- [Трофимов и др., 2011] *Трофимов Ю. А., Юров В. Н., Котов Ю. Д.* и др. Эксперимент с прибором «Быстрый Рентгеновский Монитор» на борту КА «КОРОНАС-Фотон» // Астроном. вестн., 2011. Т. 45. № 2. С. 150–156.
- [Agostinelli et al., 2003] *Agostinelli S., Allison J., Amako K.* Geant4 — a Simulation Toolkit // NIM. 2003. V. A506. P. 250–303.
- [Kotov et al., 1996] *Kotov Yu. D., Runtso M. F., Samoilenko V. T.* et al. The Fast X-ray Monitor (FXM) of the PHOTON Satellite Project // Moscow Phys. Soc. 1996. V. 6. P. 331–336.
- [Kotov et al., 2011] *Kotov Yu. D., Glyanenko A. S., Arkhangel'sky A. I.* et al. Experimental Study of Parameters of X-ray Radiation from Solar Flares Using the PENGUIN-M Instrument Aboard the CORONAS-PHOTON Spacecraft // Solar System Research. 2011. V. 45. N. 45. P. 135–145.
- [Rao et al., 2010] *Rao A. R., Malkar J. P., Hingar M. K.* et al. RT-2 Detection of Quasi-Periodic Pulsations in the 2009 July 5 Solar Hard X-ray Flare // Astrophysical J. 2010. V. 714. P. 1142.
- [Seo et al., 1991] *Seo E. S., Ormes J. F., Streitmatter R. E.* et al. Measurement of Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra During the 1987 Solar Minimum // Astrophysical J. 1991. V. 378 P. 763–772.

**REGISTRATION OF NON-STATIONARY EVENTS
OF SHORT-DURATION BY BRM INSTRUMENT****Yu. A. Trofimov, V. N. Yurov , Yu. D. Kotov***National Research Nuclear University "MEPhI"
(NRNU MEPhI), Moscow*

The Fast X-ray Monitor (BRM) instrument had operated aboard the CORONAS-Photon mission from February 19, until December 1, 2009. The instrument was intended for the registration of the hard X-ray and gamma-ray radiation of solar flares in the 20...600 keV energy range in six differential energy channels (20...30, 30...40, 40...50, 50...70, 70...130, and 130...600 keV) with temporal resolution up to 1 ms. The instrument couldn't reliably register the solar flare radiation because the solar activity was in minimum and the flux of solar radiation was too low for registration by the detector of BRM. But the instrument had observed effects which didn't relate with solar flares: short pulses (duration no more than 1ms), possibly produced by protons of cosmic rays, more longer pulses (duration about 1...2 s), their nature is unknown, and gamma-ray bursts (GRBs).

Keywords: BRM, FXM, Fast X-Ray Monitor, YAP:Ce, X-ray radiation of solar flares, gamma-ray bursts, protons of cosmic rays.

Trofimov Yury Alekseevich — engineer, e-mail: YuTrofimov@gmail.com.

Yurov Vitaly Nikolaevich — deputy director of the Astrophysics Institute NRNU MEPhI, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

Kotov Yury Dmitrievich — director of the Astrophysics Institute NRNU MEPhI, e-mail: Kotov@mephi.ru.

**ЭКСПЕРИМЕНТ КОНУС-РФ: ОСНОВНЫЕ
НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ
ПО ПРОДОЛЖЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА**

**Ф. П. Олейник¹, М. В. Уланов¹, Р. Л. Аптекарь¹,
С. В. Голенецкий¹, Е. П. Мазец¹, 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), Санкт-Петербург

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Федерального агентства по образованию РФ, Институт астрофизики (ИАФ), Москва

Приведен ряд научных результатов эксперимента КОНУС-РФ на борту российской орбитальной обсерватории «КОРОНАС-Фотон». Высокочувствительный скинтилляционный гамма-спектрометр «Конус-РФ» с двумя детекторами, ориентированными на космическом аппарате (КА) в солнечном и антисолнечном направлениях, обеспечивал исследования временных и спектральных характеристик солнечных вспышек и космических гамма-всплесков в широком энергетическом диапазоне 10 кэВ – 10 МэВ с миллисекундным временным разрешением. Эксперимент проводился с февраля по ноябрь 2009 г. За это время было зарегистрировано три солнечных вспышки, восемь всплесков от мягких гамма-репитеров и 82 космических гамма-всплеска. Из них 21 гамма-

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

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

Аптекарь Рафаил Львович — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: aptekar@mail.ioffe.ru.

Голенецкий Сергей Владимирович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: golen@mail.ioffe.ru.

Мазец Евгений Павлович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, e-mail: mazets@mail.ioffe.ru.

Свинкин Дмитрий Сергеевич — аспирант, e-mail: svinkin@mail.ioffe.ru.

Фредерикс Дмитрий Дмитриевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: fred@mail.ioffe.ru.

Котов Юрий Дмитриевич — директор, кандидат физико-математических наук, e-mail: kotov@mephi.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора, кандидат физико-математических наук, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

всплеск был зарегистрирован синхронно с экспериментом Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук (Санкт-Петербург) КОНУС-ВИНД на борту американского КА Wind. Обсуждаются предложения по продолжению эксперимента.

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

Введение

Исследования рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек в широком энергетическом интервале 10 кэВ – 10 МэВ с высоким временным разрешением, выполненные в ходе эксперимента КОНУС-РФ, являются важной составной частью научной программы орбитальной обсерватории «КОРОНАС-Фотон». Дополнительная задача эксперимента — изучение космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров.

Устройство и основные характеристики научной аппаратуры «Конус-РФ» подробно рассмотрены в работе [Уланов и др., 2010]. Аппаратура представляет собой высокочувствительный гамма-спектрометр, программа работы которого оптимизирована для двух научных задач: исследования вспышек жесткого рентгеновского излучения Солнца и исследования космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров.

Кратко излагается ряд результатов исследований, полученных в эксперименте КОНУС-РФ в составе обсерватории «КОРОНАС-Фотон» в период февраль–декабрь 2009 г. и обсуждаются предложения по продолжению исследований.

1. ИССЛЕДОВАНИЯ ВСПЫШЕК ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Период работы обсерватории «КОРОНАС-Фотон» характеризуется низким уровнем солнечной активности. Тем не менее ряд солнечных вспышек был зарегистрирован и детально исследован аппаратурой «Конус-РФ». Первое солнечное событие было зарегистрировано 5 июля 2009 г. Оно четко проявилось в каналах 8...40 кэВ на приэкваториальном участке орбиты космического аппарата. На рис. 1 приведены временные профили этого события, зарегистрированные солнечным детектором в режиме «Фон». Аналогичные данные для вспышки 27 октября 2009 г. показаны на рис. 2.

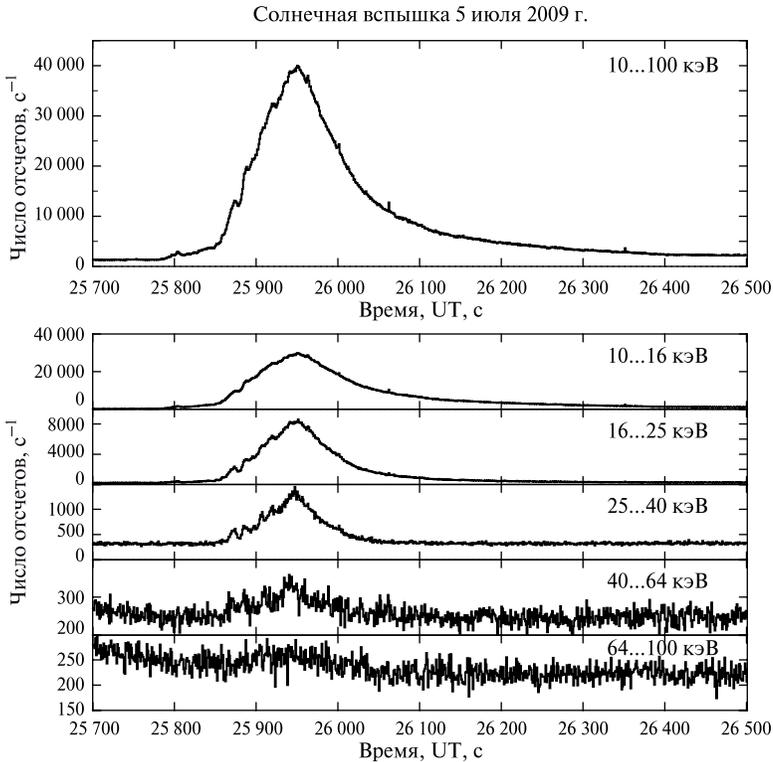


Рис. 1. Временные профили солнечной вспышки класса C2.7 5 июля 2009 г. Верхняя панель — суммарный временной профиль, нижняя панель — профили в различных энергетических каналах

2. ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ И МЯГКИХ ГАММА-РЕПИТЕРОВ

Исследования космических гамма-всплесков продолжают оставаться одной из самых актуальных задач астрофизики высоких энергий и внеатмосферной астрономии. Механизм генерации экстремальных потоков энергии в их источниках остается важнейшей нерешенной задачей современной астрофизики. Комплексные всеобъемлющие исследования источников гамма-всплесков по данным их точной и оперативной локализации американской обсерваторией SWIFT в настоящее время проводятся на космических аппаратах Fermi, Agile, Integral, Wind и большой сети наземных и оптических телескопов.

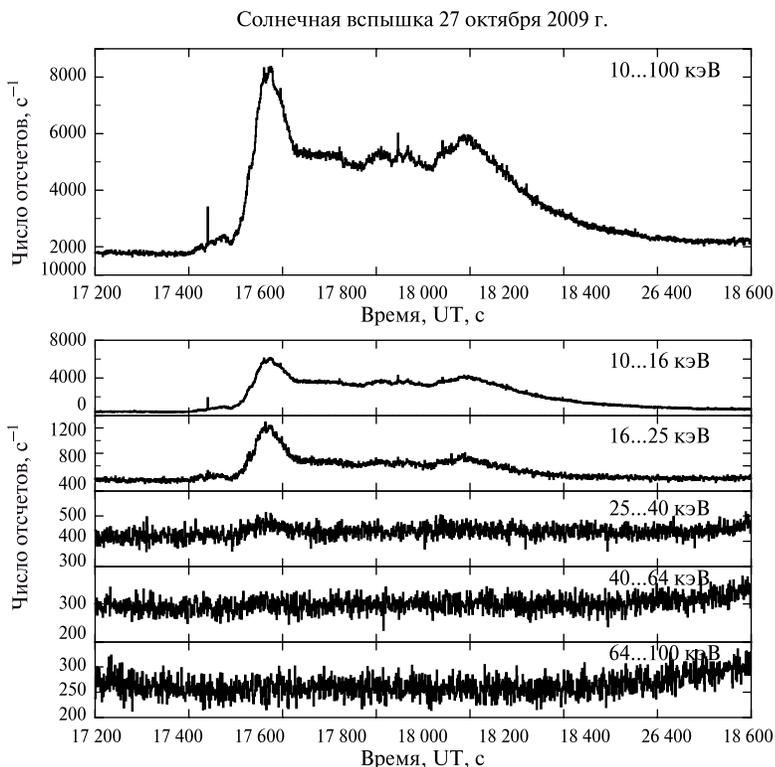


Рис. 2. Временные профили солнечной вспышки класса C1 27 октября 2009 г. Верхняя панель — суммарный временной профиль, нижняя панель — профили в различных энергетических каналах

Координаты источников всплесков, не попавшие в поле зрения телескопа BAT SWIFT, локализируются триангуляционным методом межпланетной сетью космических аппаратов с детекторами гамма-излучения IPN (Interplanetary Network), опорным сегментом которой является аппаратура «Конус-Винд» благодаря ее расположению в межпланетном пространстве с возможностью постоянного обзора всей небесной сферы. В аппаратуре «Конус-РФ» на основе современной элементной базы получила дальнейшее развитие оптимальная программа регистрации временных и спектральных характеристик гамма-всплесков, использованная в аппаратуре «Конус-Винд». Благодаря этому в эксперименте КОНУС-РФ появились широкие

возможности для изучения быстрой, до единиц миллисекунд, временной и спектральной переменности излучения космических гамма-всплесков, что исключительно важно для понимания природы и механизма генерации энергии в их источниках.

На рис. 3 и 4 показаны суммарный энергетический спектр гамма-всплеска GRB090408b (см. рис. 3) и энергетические спектры в различных фазах этого события. Данные наглядно свидетельствуют о сильной спектральной эволюции излучения всплеска.

Одним из наиболее важных результатов эксперимента КОНУС-РФ стало открытие нового, седьмого по счету, мягкого гамма-репитера. Он был обнаружен в синхронных наблюдениях аппаратуры «Конус-РФ», прибора GBM обсерватории Fermi и телескопа BAT обсерватории Swift, причем решающую роль сыграли высокая чувствительность и высокое временное разрешение аппаратуры «Конус-РФ» [Van der Horst et al., 2010].

С февраля по декабрь 2009 г. в эксперименте КОНУС-РФ зарегистрировано:

- 3 вспышки жесткого рентгеновского излучения Солнца;
- 82 гамма-всплеска, в том числе 52 в режиме «Всплеск»;
- 8 мягких повторных гамма-всплесков от SGR1806-20, от вспыхивающего рентгеновского пульсара AXP1E1547,0 и от нового репитера SGR0418+5729.

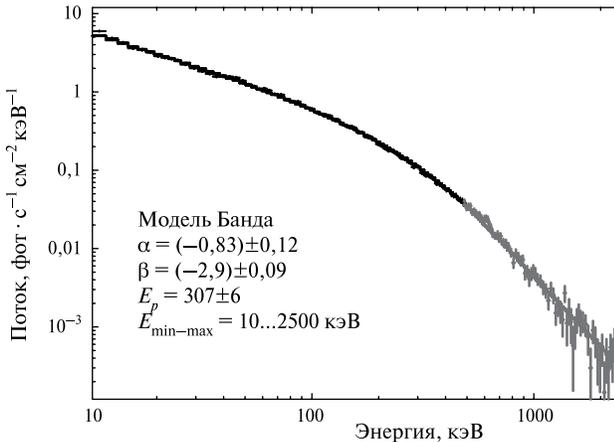


Рис. 3. Интегральный спектр исключительно яркого гамма-всплеска GRB090408b, спектр фитируется моделью Банда [Band et al., 1993] в диапазоне энергий 10...2500 кэВ

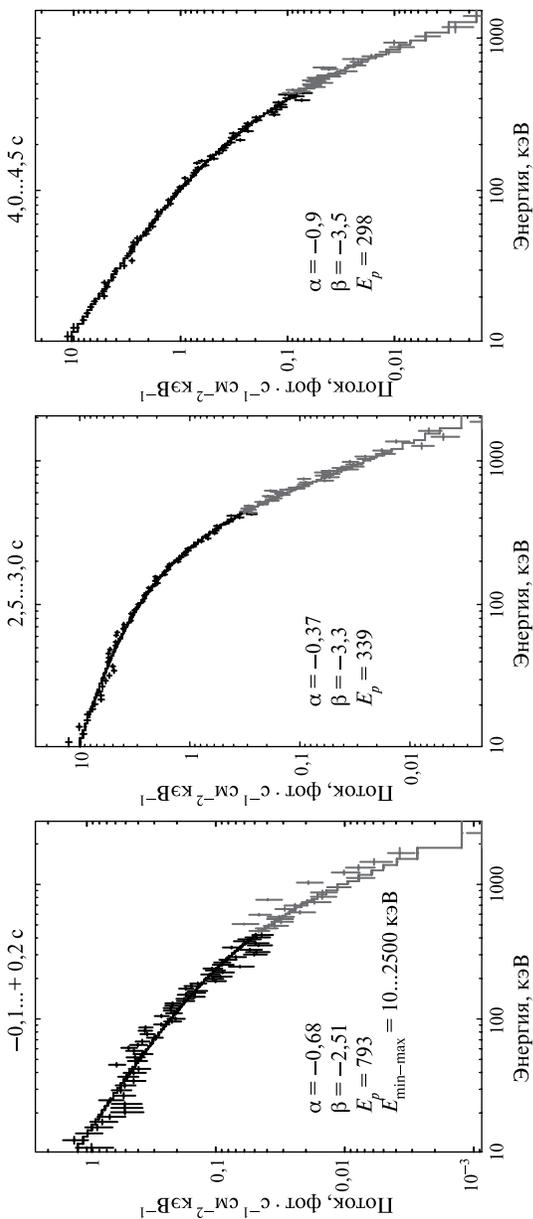


Рис. 4. Спектральная эволюция гамма-всплеска GRB090408b, спектр фильтруется моделью Банды в диапазоне энергий 10...2500 кэВ

3. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРОДОЛЖЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

Научная программа солнечной космической обсерватории, безусловно, должна быть продолжена с целью решения следующих научных задач:

- исследования с высоким временным разрешением кривых яркости и энергетических спектров вспышек жесткого рентгеновского излучения Солнца;
- исследования временных профилей, энергетических спектров и быстрой спектральной переменности космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров;
- синхронные наблюдения источников гамма-всплесков идентичными приборами с целью определения их координат триангуляционным методом.

Эти задачи налагают специфические требования к орбите космического аппарата (КА) и его ориентации в пространстве. Гамма-всплески представляют собой спорадические, редкие, кратковременные возрастания потоков космического рентгеновского и гамма-излучения в области энергий 10 кэВ – 10 МэВ. Моменты их появления и положение источников на небесной сфере не предсказуемы. Интенсивность вспышек в большинстве случаев весьма мала. Возможности обнаружения и изучения в значительной степени определяются уровнем существующего на орбите КА радиационного фона. Это справедливо и для вспышек жесткого рентгеновского излучения, несмотря на то, что их источник связан с диском Солнца.

Многолетний опыт проведения экспериментов ФТИ по исследованию гамма-всплесков и солнечных вспышек показал, что при наблюдениях с околоземных орбит с наклоном $i > 50^\circ$ КА значительную долю времени проводит в зонах радиационных поясов Земли. На околоземных орбитах высотой 400...500 км доля полезной продолжительности наблюдений составляет всего около ~ 20...25 %. Помимо радиационных поясов Земли это связано с экранированием Землей примерно 40 % небесной сферы. Реально, наблюдения гамма-всплесков и солнечных вспышек на околоземных КА возможны только на приэкваториальных участках орбит на витках, свободных от зон захваченной радиации.

Ситуация кардинально меняется при наблюдениях на больших удалениях от магнитосферы Земли, превышающих 50 тыс. км. В этом случае исключается экранирование Землей части небесной

сферы и воздействие на детекторы интенсивных потоков заряженных частиц радиационных поясов Земли. Радиационный фон в межпланетном пространстве отличается достаточно высокой стабильностью, которая нарушается только солнечными вспышками, интенсивность которых становится заметной только в годы максимума солнечной активности. Доля эффективной продолжительности наблюдений солнечных вспышек и гамма-всплесков на орбите, расположенной в межпланетном пространстве, возрастает до ~90...95 %. Это, практически, устраняет угрозу пропуска наиболее интересных событий. Многолетний опыт исследований космических гамма-всплесков и солнечных вспышек в экспериментах ФТИ КОНУС на межпланетных станциях «Венера» и американском КА Wind наглядно подтверждает эффективность такого подхода.

Таким образом, для исследований вспышек жесткого рентгеновского излучения Солнца и космических гамма-всплесков чрезвычайно эффективна высокоэллиптическая орбита с высотой апогея около 300 000 км.

Литература

- [Уланов и др., 2010] *Уланов М. В., Антекарь Р. Л., Голенецкий С. В.* и др. Эксперимент «КОНУС-РФ» по исследованию жесткого рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек и космических гамма-всплесков: первые научные результаты // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту «КОРОНАС-ФОТОН»: Тр. рабочего совещания / Под ред. Р. Р. Назирова, И. В. Чулкова, В. Н. Юрова. Таруса, 22–24 апр. 2009. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 128–142. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Band et al., 1993] *Band D., Matteson J., Ford L.* et al. BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I Spectral diversity // *Astrophysical J.* 1993. V. 413. P. 281.
- [Van der Horst et al., 2010] *Van der Horst A. J.* et al. Discovery of a New Soft Gamma Repeater: SGR J0418 + 5729 // *Astrophysical J. Letters.* 2010. V. 711. Iss. 1. P. L1–L6.

THE KONUS-RF EXPERIMENT: MAIN SCIENTIFIC RESULTS AND SUGGESTIONS FOR CONTINUATION OF THE EXPERIMENT

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

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

² *National Research Nuclear University "MEPhI"
(NRNU MEPhI), Moscow*

A number of scientific results of the experiment KONUS-RF onboard Russian space observatory CORONAS-Photon are given. The research was made by the high sensitive scintillation gamma-ray spectrometer Konus-RF with two detectors pointing at solar and anti-solar directions. It performed measurement of temporal and spectral characteristics of solar flares and cosmic gamma-bursts within 10 keV – 10 MeV energy range with the millisecond time resolution. The experiment had been carried out since February till November 2009. During this period there were registered 3 solar flares, 8 bursts from soft gamma- repeaters and 82 cosmic gamma-ray bursts. 21 of the bursts were detected synchronously with the Ioffe Institute KONUS-WIND experiment onboard American spacecraft Wind. Some suggestions on the further continuation of the experiment are considered.

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

Oleynik Philipp Petrovich — scientist, e-mail: oleynik.phil@mail.ioffe.ru.

Ulanov Mikhail Vladimirovich — scientist, e-mail: ulanov@mail.ioffe.ru.

Aptekar Rafail Lvovich — leading scientist, PhD, e-mail: aptekar@mail.ioffe.ru.

Golenetskii Sergey Vladimirovich — senior scientist, PhD, e-mail: golen@mail.ioffe.ru.

Mazets Evgeny Pavlovich — head of laboratory, doctor of sciences, e-mail: mazets@mail.ioffe.ru.

Svinkin Dmitry Sergeevich — postgraduate student, e-mail: svinkin@mail.ioffe.ru.

Frederiks Dmitry Dmitrievich — senior scientist, PhD, e-mail: fred@mail.ioffe.ru.

Kotov Yury Dmitrievich — director, PhD, e-mail: kotov@mephi.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — deputy director, PhD, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОДОЛЖЕНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ
ПОЛЯРИЗАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК,
НАЧАТЫХ НА АППАРАТЕ «КОРОНАС-ФОТОН»**

**В. А. Дергачев¹, В. П. Лазутков¹, Г. А. Матвеев¹,
Е. М. Круглов¹, М. И. Савченко¹, Д. В. Скородумов¹,
А. Г. Пятигорский¹, В. М. Хилькевич¹, В. В. Хмылко¹,
Ю. Д. Котов², А. С. Гляненко², В. Н. Юров²**

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

² *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Федерального агентства по образованию РФ, Институт астрофизики (ИАФ), Москва*

В данной работе предлагается новая конструкция рентгеновского поляриметра, предназначенного для измерения степени линейной поляризации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек. Эта конструкция может рассматриваться как коренная модернизация прибора «Пингвин-М», позволяющая

Дергачев Валентин Андреевич — заместитель директора, доктор физико-математических наук, e-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru.

Матвеев Геннадий Александрович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: genadiy.matveev@mail.ioffe.ru.

Круглов Евгений Михайлович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: E.Kruglov@mail.ioffe.ru.

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

Савченко Михаил Иванович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических 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.

Хилькевич Евгений Михайлович — инженер, e-mail: e.khilkevitch@mail.ioffe.ru.

Хмылко Владислав Викентьевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: vlad_fti@mail.ru.

Гляненко Александр Степанович — заведующий научно-исследовательским сектором, кандидат физико-математических наук, e-mail: asgl2005@rambler.ru.

Котов Юрий Дмитриевич — директор, кандидат физико-математических наук, e-mail: kotov@mephi.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора, кандидат физико-математических наук, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

существенно снизить габариты прибора и повысить эффективность использования его поверхности.

Ключевые слова: солнечные вспышки, рентгеновское излучение, поляриметр, космический эксперимент, поляризация, научная аппаратура, «Пингвин-М», «КОРОНАС-Фотон».

Проведенные наземные исследования и калибровки прибора «Пингвин-М» подтвердили возможность создания эффективного поляриметра жесткого рентгеновского излучения, основанного на измерении асимметрии поля рассеянного излучения при комптоновском рассеянии в активном рассеивателе и регистрации двойных совпадений сигнала рассеивателя (электрон отдачи) и детектора рассеянного излучения [Дергачев и др., 2009а, 2010а]. Напомним, что прибор «Пингвин-М» успешно функционировал на борту космического аппарата (КА) «КОРОНАС-Фотон» [Дергачев и др., 2009б, 2010б].

На рис. 1 представлены схемы детекторного узла прибора «Пингвин-М» (а) и новой конструкции поляриметра (б). Оба рисунка сделаны в одном масштабе, что дает возможность сравнить размеры обоих приборов. На рисунке заштрихованными прямоугольниками изображены кристаллы NaI или CsI, а светлыми кружками (а, б) или их частями (б) — пластиковые сцинтилляторы (паратерфенил или полистирол).

Конструкция, представленная на рис. 1б может рассматриваться как базовый элемент. Она допускает наращивание площади поляриметра путем совмещения таких элементов. На рис. 2 показана конструкция поляриметра, составленная из трех таких элементов. Как показал расчет, эффективная площадь поляриметра, представленного на рис. 2, в полтора раза выше, чем у прибора «Пингвин-М».

В приборе «Пингвин-М» тонкие кристаллы, регистрирующие рассеянное излучение, просматривались фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) с основной плоскости, что определило горизонтальное расположение последних. В новой конструкции предполагается просматривать кристаллы, регистрирующие рассеянное излучение, с торца. Это дает возможность расположить все ФЭУ вертикально. Такое расположение, кроме повышения прочности, надежности и технологичности конструкции, существенно снижает непроизводительную площадь прибора. Кристалл в данной конструкции имеет прямоугольную форму. Экспериментальное исследование такого модельного детектора с кристаллом CsI показало, что максимальный разброс амплитуды сигнала от радиоактивного источника по поверхности кристалла не превышает 15 %.

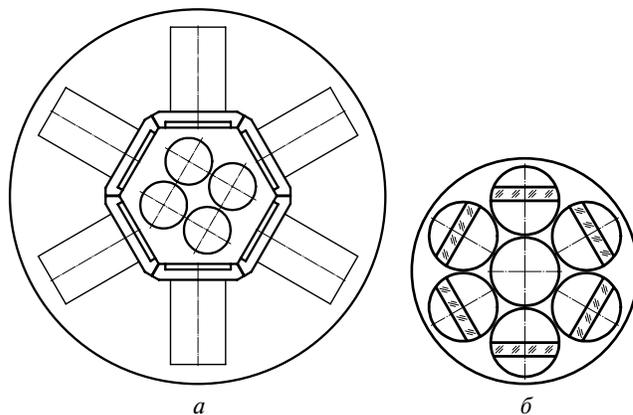


Рис. 1. Детекторные блоки прибора «Пингвин-М» (а) и новой конструкции (б)

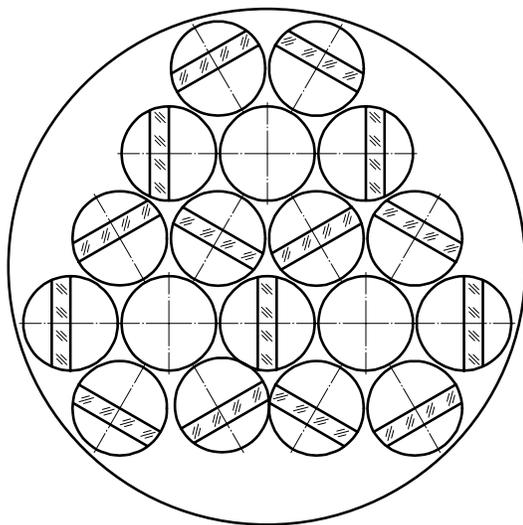


Рис. 2. Конструкция поляриметра, составленного из трех «базовых» элементов

Прибор «Пингвин-М» содержит четыре активных рассеивателя и шесть детекторов рассеянного излучения. Таким образом при регистрации совпадений каждого рассеивателя с каждым детектором рассеянного излучения получается 24 типа двойных совпадений.

Такая высокая избыточность информации (для определения поляризации минимально необходимо три независимых направления) позволяет отделять приборные эффекты (уход энергетических порогов) от поляризационных, что кардинально повышает надежность получаемой информации [Дергачев и др., 2010a].

В силу принципиального значения избыточность снимаемой поляриметрической информации сохранена и в новой конструкции поляриметра. Это достигается тем, что в качестве рассеивателей используется как центральный пластический рассеиватель, так и пластическая часть каждого комбинированного детектора. В качестве детекторов рассеянного излучения используются кристаллические части комбинированных детекторов. Различение сигнала от пластика и кристалла на каждом ФЭУ комбинированного детектора производится по форме импульса. Учитывая, что совпадения сигналов с пластика и кристалла в пределах одного комбинированного детектора не фиксируются, получается 36 типов двойных совпадений между органическими и неорганическими сцинтилляторами ($5 \cdot 6 + 6 = 36$).

На рис. 3 приведен один из вариантов новой конструкции детекторного блока поляриметра.

В приборе «Пингвин-М» для сцинтилляционных детекторов проводилась стабилизация усиления с помощью светодиодов и калибровка с помощью встроенного радиоактивного источника на основе изотопа ^{133}Ba , а пропорциональный детектор калибровался

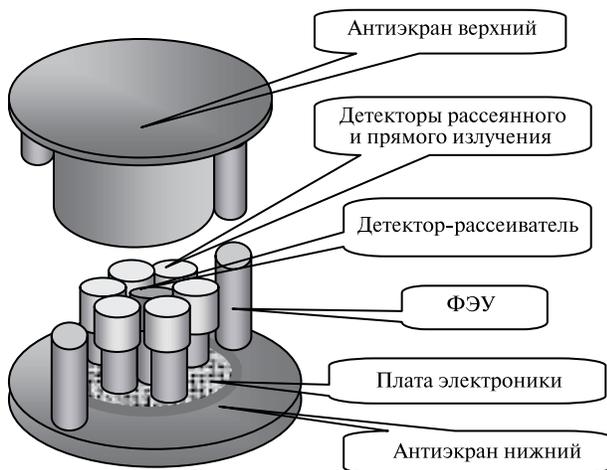


Рис. 3. Вариант новой конструкции детекторного блока

с помощью встроенного радиоактивного источника на основе изотопа ^{55}Fe . Подстройка усиления по результатам калибровок производилась с помощью команд, подаваемых на борт КА. Эта схема стабилизации энергетических порогов успешно функционировала на всех этапах работы с прибором «Пингвин-М» [Дергачев и др., 2009б, 2010б], поэтому возможно применить подобную схему стабилизации энергетических порогов и для нового прибора.

Использование пассивных γ -источников в качестве контрольных реперов создает дополнительный γ -фон, в том числе и в канале двойных совпадений. Возможно применение «меченых» γ -источников, где в качестве метки используется предшествующий α - или β -распад. При высокой эффективности «метки», регистрируемой в специальном детекторе (тонкий сцинтиллятор + ФЭУ), вклад такого источника в фон детекторов будет незначительным. В настоящее время ведутся работы по созданию такого «меченого» γ -источника.

Одним из факторов, ухудшающих глубину модуляции по азимутальному углу при измерении поляризации, является многократное рассеяние γ -кванта как в самом рассеивателе, так и в конструкционных материалах прибора. Точное определение энергетических потерь в совпадающих по времени детекторах (точность определяется разрешением детекторов) с учетом кинематических ограничений процесса однократного рассеяния позволяет снизить вклад событий, связанных с многократным рассеянием.

В этой связи и вообще для улучшения характеристик прибора имеет смысл рассмотреть возможность записи подробной и максимально точной информации по каждому событию (зарегистрированному кванту). Можно ограничиться только двойными совпадениями, учитывая, что скорость счета в двойных совпадениях (поляриметрическая информация) составляет несколько процентов от скорости счета прямого излучения (одионочные события). В аппаратуре «Пингвин-М» для накопления информации в двойных совпадениях использовалась довольно грубая сетка порогов: в рассеивателях — четыре, а в детекторах рассеянного излучения — пять энергетических окон. Такого грубого разбиения недостаточно для очистки информации от событий, вызванных многократным рассеянием.

Литература

[Дергачев и др., 2009 а] *Дергачев В. А., Матвеев Г. А., Круглов Е. М., Лазутков В. П., Савченко М. И., Скородумов Д. В., Пятигорский Г. А., Чичикалюк Ю. А., Шишов И. И., Хмылко В. В., Васильев Г. И., Драневич В. А.,*

- Крутьков С. Ю., Степанов С. В., Котов Ю. Д., Юров В. Н., Гляненко А. С., Архангельский А. И., Горелый Ю. А., Рубцов И. В. Поляриметрия жесткого рентгеновского излучения прибором «Пингвин-М», основанным на эффекте комптоновского рассеяния, в космическом эксперименте «КОРОНАС-Фотон» // Изв. РАН, Сер. физ. 2009. Т. 73. № 3. С. 437–438.
- [Дергачев и др., 2009б] Дергачев В. А., Круглов Е. М., Лазутков В. П., Матвеев Г. А., Пятигорский А. Г., Савченко М. И., Скородумов Д. В., Котов Ю. Д., Гляненко А. С., Архангельский А. И., Бессонов М. В., Буслов А. С., Юров В. Н. Первые результаты работы прибора «Пингвин-М» на борту КА «КОРОНАС-Фотон» // Тр. Всерос. ежегод. конф. по физике Солнца «Год астрономии: Солнечная и солнечно-земная физика – 2009». Санкт-Петербург, Пулково. 5–11 июля 2009. СПб.: ГАО РАН, 2009. С. 165–168.
- [Дергачев и др., 2010а] 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., Котов Ю. Д., Юров В. Н., Гляненко А. С., Архангельский А. И., Горелый Ю. А., Рубцов И. В. Прибор «Пингвин-М», предназначенный для исследования поляризации жесткого рентгеновского излучения Солнца в космическом проекте «КОРОНАС-Фотон» // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту «КОРОНАС-ФОТОН»: Тр. рабочего совещания. Россия, Таруса. 22–24 апр. 2009. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 83–106. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Дергачев и др., 2010б] Дергачев В. А., Матвеев Г. А., Круглов Е. М., Лазутков В. П., Савченко М. И., Скородумов Д. В., Пятигорский А. Г., Шишов И. И., Котов Ю. Д., Юров В. Н., Гляненко А. С., Архангельский А. И., Бессонов М. В., Буслов А. С. Функционирование поляриметра жесткого рентгеновского излучения Солнца «Пингвин-М» на борту космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту «КОРОНАС-ФОТОН»: Тр. рабочего совещания. Россия, Таруса. 22–24 апр. 2009. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 167–182. (Сер. «Механика, управление и информатика»).

**THE PERSPECTIVES OF CONTINUATIONS
EXPERIMENTS ON MEASUREMENT OF SOLAR X-RAY
FLARES POLARIZATION BEGUN ON CORONAS-PHOTON
SATELLITE**

**V. A. Dergachev¹, G. A. Matveev¹, E. M. Kruglov¹, V. P. Lazutkov¹,
M. I. Savchenko¹, D. V. Skorodumov¹, A. G. Pyatigorsky¹,
E. M. Khilkevitch¹, V. V. Khmylko¹, Yu. D. Kotov²,
A. S. Glyanenko², V. N. Yurov²**

¹ *Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS
(PhTI RAS), St. Petersburg*

² *National Research Nuclear University "MEPhI"
(NRNU MEPhI), Moscow*

In the given work the new construction of X-ray polarimeter, intended for measurement of linear polarization degree of hard X-ray radiation of solar flares, is offered. The offered construction can be considered as radical modernization of the device Penguin-M, allowing essentially to lower dimensions of the device and to raise efficiency of use of his surface.

Keywords: solar flare, X-ray, polarimetry, space experiment, polarization, scientific equipment, Penguin-M, CORONAS-Photon.

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

Matveev Gennady Aleksandrovich — senior scientist, PhD, e-mail: genadiy.matveev@mail.ioffe.ru.

Kruglov Evgeny Mikhailovich — senior scientist, PhD, e-mail: E.Kruglov@mail.ioffe.ru.

Lazutkov Vadim Petrovich — scientist, e-mail: vadim.lazutkov@mail.ioffe.ru.

Savchenko Mikhail Ivanovich — senior scientist, PhD, 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.

Khmylko Vladislav Vikentevich — senior scientist, PhD, e-mail: vlad_fti@mail.ru.

Khilkevitch Evgeny Mikhailovich — engineer, e-mail: e.khilkevitch@mail.ioffe.ru.

Kotov Yury Dmitrievich — director, PhD, e-mail: kotov@mephi.ru.

Glyanenko Alexander Stepanovich — head of the scientific group, PhD, e-mail: asgl2005@rambler.ru.

Yurov Vitaly Nikolaevich — deputy director, PhD, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

**ГАММА-СПЕКТРОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КРИСТАЛЛА $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$
И СЖАТОГО КСЕНОНА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ
ЛИНЕЙЧАТОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ
СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК**

**К. Ф. Власик, В. В. Дмитренко, В. М. Грачев,
Е. А. Жучкова, Ю. Д. Котов, А. В. Кочемасов,
Е. Э. Лупарь, Ю. А. Трофимов, С. Е. Улин,
З. М. Утешев, В. Н. Юров**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Федерального агентства
по образованию РФ, Москва*

Представлены основные результаты изучения спектрометрических характеристик сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и ксенонового детектора, имеющих наилучшее энергетическое разрешение, равное 3 и 2 %, соответственно, для энергии гамма-квантов 662 кэВ. Эффективная площадь кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 7,6 \times 7,6$ см и детектора на сжатом ксеноне с чувствительным объемом 2000 см^3 составила 20 см^2 для энергии 1 МэВ. Высокие линейность энергетической шкалы, температурная стабильность и радиационная стойкость делают эти детекторы наиболее перспективными для проведения космических экспериментов по исследованию гамма-излучения солнечных вспышек.

Власик Константин Федорович — ведущий инженер, кандидат физико-математических наук, e-mail: KFVlasik@mephi.ru.

Дмитренко Валерий Васильевич — профессор, доктор физико-математических наук, e-mail: VVDmitrenko@mephi.ru.

Грачев Виктор Михайлович — доцент, e-mail: VMGrachev@mephi.ru.

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

Котов Юрий Дмитриевич — директор ИАФ МИФИ, кандидат физико-математических наук, e-mail: kotov@mephi.ru.

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

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

Трофимов Юрий Алексеевич — инженер, e-mail: YuTrofimov@gmail.com.

Улин Сергей Евгеньевич — профессор, доктор физико-математических наук, e-mail: SEUlin@gmail.com.

Утешев Зияэтдин Мухамедович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: ZMUTESHEV@mephi.ru.

Юров Виталий Николаевич — заместитель директора ИАФ МИФИ, кандидат физико-математических наук, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

Ключевые слова: сцинтиллятор $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, сжатый ксенон, спектрометры гамма-излучения, энергетическое разрешение, радиационная стойкость, собственная активность, космические исследования Солнца, солнечные вспышки.

Введение

Исследование гамма-излучения, которое образуется во время солнечных вспышек, крайне важно для понимания ядерных процессов, происходящих на поверхности и в недрах Солнца, а также для предсказания результатов воздействия солнечной активности как на Землю, так и на околоземное космическое пространство.

За долгое время изучения Солнца с помощью космических аппаратов детекторы на основе сцинтилляционных кристаллов $\text{NaI}(\text{Tl})$ и BGO широко использовались для регистрации гамма-излучения солнечных вспышек. Высокая эффективность и возможность промышленного изготовления кристаллов NaI и BGO больших размеров позволяют создать научную аппаратуру, обладающую большой светосилой. Однако детекторы этого типа имеют невысокое энергетическое разрешение, которое обычно не превышает 7 % для сцинтиллятора $\text{NaI}(\text{Tl})$ и 12 % для BGO , соответствующее энергии гамма-квантов 662 кэВ. Сравнение характеристик детекторов различных солнечных космических экспериментов приведено в табл. 1.

Наиболее перспективными для наблюдения солнечных вспышек в рентгеновском и гамма-диапазонах считаются полупроводниковые детекторы из особо чистого германия, энергетическое разрешение которых на порядок лучше, чем у сцинтилляционных детекторов. Но для достижения высокого энергетического разрешения германиевые детекторы необходимо охлаждать до температуры жидкого азота (-196°C), поэтому в условиях космического эксперимента требуется организация пассивного или активного охлаждения германиевых детекторов, что приводит к увеличению массы и размеров научной аппаратуры. Другим недостатком полупроводниковых детекторов является ухудшение их энергетического разрешения в результате радиационных повреждений кристаллов, вызванных потоками высокоэнергичных космических частиц, во время длительного пребывания научной аппаратуры на орбите.

По этим причинам задача создания гамма-спектрометрической аппаратуры для исследования Солнца, обладающей высокими энергетическим разрешением и чувствительностью, радиационной стойкостью и температурной стабильностью, остаётся актуальной и в настоящее время.

Таблица 1

Основные характеристики детекторов различных солнечных космических экспериментов

| Солнечная миссия | Орбита, наклонение | Тип детектора, размер, количество | Энергетический диапазон, МэВ | Энергетическое разрешение для энергии 662 кэВ, % | Эффективная площадь для энергии 1 МэВ, см ² |
|---|--------------------|---|------------------------------|--|--|
| SMM, GRS [Forrest et al., 1980], (1980–1989) | 570 км, 28,5° | NaI(Tl), Ø7,6×7,6 см, 7 шт. | 0,3...9 (до 140) | 7 | 110 |
| SOLAR-A, GRS [Yoshimori et al., 1991], (1991–2001) | 550 км, 31,3° | BGO, Ø7,6×5,1 см, 2 шт. | 0,2...10 (до 100) | 12,5 | 70 |
| CGRO, OSSE [Johnson et al., 1993], (1991–2000) | 450 км, 28,5° | NaI(Tl)-CsI(Na), Ø33×10,2 см, Ø33×7,6 см, 4 шт. | 0,05...10 (до 250) | 7,8 | 380 |
| RHessi [Smith et al., 2002], Spectrometer, (2002) | 600 км, 38° | Ge, Ø7,1×8,5 см, 9 шт. | 0,03...17 | 0,5 | 80 |
| «КОРОНАС-Фотон» [Котов и др., 2011], «Наталья-2М», (2009) | 550 км, 82,5° | CsI(Tl), 38×8×4,5 см, 16 шт. | 0,2...1600 | 10 | 920 |

ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КРИСТАЛЛА $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$

Со времени открытия в 2001 г. сегодня коммерчески производятся сцинтилляционные кристаллы бромид лантана $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, активированного церием, больших размеров, порядка тысячи кубических сантиметров, и поэтому стало возможным рассматривать применение этого сцинтиллятора для исследования гамма-излучения солнечных вспышек.

Бромид лантана обладает прекрасными сцинтилляционными свойствами, представленными в табл. 2. Световой выход сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ составляет 63 000 фотонов/МэВ, что в 1,65 раза больше, чем световой выход традиционного сцинтиллятора $\text{NaI}(\text{Tl})$. Благодаря высокому световому выходу и хорошей линейной зависимости светового выхода от энергии гамма-квантов, $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ имеет энергетическое разрешение в два раза лучше, чем у кристалла $\text{NaI}(\text{Tl})$. Для энергии гамма-квантов 662 кэВ энергетическое разрешение сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ составляет 3 %, что в настоящее время является наилучшим значением для сцинтилляционных кристаллов. В табл. 3 приведены значения энергетического разрешения и отношения эффективности по пику полного поглощения для сцинтилляторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{NaI}(\text{Tl})$ одинакового размера — $\varnothing 7,6 \times 7,6$ см [Bril-LanCe™..., 2009].

Высокая плотность $5,3 \text{ г/см}^3$ и эффективный атомный номер $Z = 47$ позволяют для сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ получить эффективность регистрации гамма-квантов, особенно в фотопике, превосходящую эффективность кристаллов $\text{NaI}(\text{Tl})$ и чистого германия. На рис. 1 представлены расчетные зависимости значений эффективной площади от энергии гамма-квантов для кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ различных размеров, выпускаемых промышленно. Полученные в результате математического моделирования с помощью пакета программ GEANT4 значения эффективной площади по пику полного поглощения (произведение эффективности детектора по фотопику и его чувствительной площади) составили 20 см^2 для $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 7,6 \times 7,6$ см и 40 см^2 для $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 7,6 \times 20$ см для энергии гамма-квантов, равной 1 МэВ. Для увеличения эффективности регистрации гамма-излучения солнечных вспышек возможно использование сборки из нескольких кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, как это было сделано для кристаллов $\text{NaI}(\text{Tl})$ и чистого германия в космических экспериментах, представленных в табл. 1.

Таблица 2

Основные физические характеристики сингилляционных кристаллов и чистого германия

| Параметр | Кристалл | | CsI(Tl) [Глобус, Гривев, 2000] | WGO [Глобус, Гривев, 2000] | LaCl ₃ (Ce) [Bril-LanCe TM ..., 2009] | LaBr ₃ (Ce) [Bril-LanCe TM ..., 2009] | Ge |
|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---|---|------|
| | NaI(Tl) [Глобус, Гривев, 2000] | NaI(Tl) [Глобус, Гривев, 2000] | | | | | |
| Плотность, г/см ³ | 3,67 | 3,67 | 4,51 | 7,13 | 3,86 | 5,29 | 5,36 |
| Эффективный атомный номер, Z | 51 | 51 | 54 | 74 | 48 | 47,4 | 32 |
| Абсолютный световой выход, фотон/МэВ | 38 000 | 38 000 | 54 000 | 10 000 | 50 000 | 63 000 | — |
| Относительный световой выход, % от светового выхода NaI(Tl) | 100 | 100 | 47 | 18 | 120 | 165 | — |
| Энергетическое разрешение для энергии 662 кэВ, % | 6,5 | 6,5 | 7,3 | 10 | 3,5 | 3,0 | 0,3 |
| Положение максимума люминесценции, нм | 415 | 415 | 550 | 480 | 350 | 380 | — |
| Время высвечивания, нс | 230 | 230 | 630...1000 | 300 | 28 | 16 | — |

Таблица 3

Сравнение спектретрических характеристик сингилляционных кристаллов LaBr₃(Ce) и NaI(Tl), имеющих одинаковые размеры Ø7,6×7,6 см [BrilLanCeTM ..., 2009]

| Радионуклид | Энергия гамма-квантов, кэВ | Энергетическое разрешение | | Отношение площади фотопика LaBr ₃ (Ce) к площади фотопика NaI(Tl) |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|------------|--|
| | | LaBr ₃ (Ce), % | NaI(Tl), % | |
| ⁵⁷ Co | 122 | 6,6 | 8,9 | 1,05 |
| ¹³³ Ba | 356 | 3,8 | 9,1 | 1,06 |
| ¹³⁷ Cs | 662 | 2,9 | 7,0 | 1,18 |
| ⁶⁰ Co | 1332 | 2,1 | 5,4 | 1,43 |
| ²⁰⁸ Pb | 2615 | 1,6 | 4,5 | 1,65 |

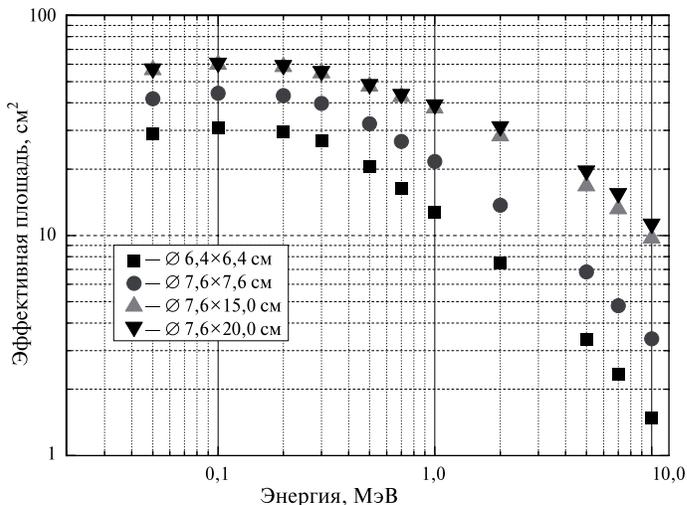


Рис. 1. Расчетные значения эффективной площади сцинтилляторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ по пику полного поглощения для кристаллов различных размеров

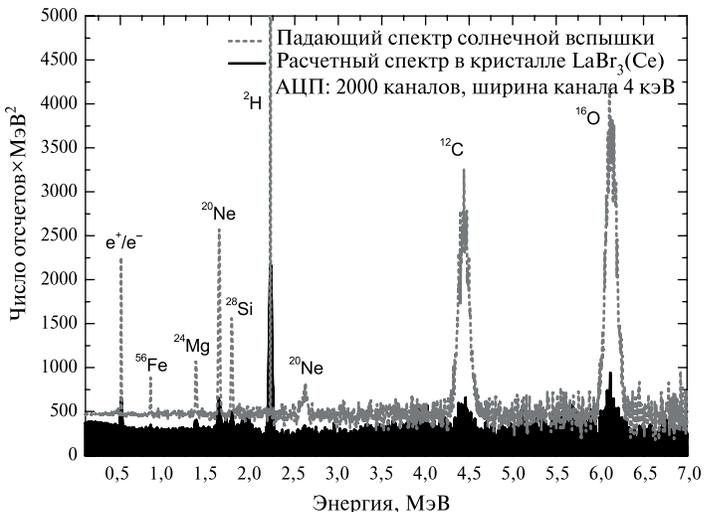


Рис. 2. Отклик сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 7,6 \times 7,6$ см на солнечную вспышку 04.06.1991 г. класса X12+

Для изучения способности сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ регистрировать гамма-линии солнечных вспышек был рассчитан отклик кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 7,6 \times 7,6$ см на солнечную вспышку 04.06.1991 г. класса X12+, характеристики которой были исследованы аппаратурой OSSE CGRO [Murphy et al., 1997]. Результаты моделирования, представленные на рис. 2, демонстрируют хорошую способность сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ разрешать все основные гамма-линии солнечных вспышек.

Достоинством сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ является его высокое быстродействие. При оптимальной концентрации Ce^{3+} время высвечивания $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ достигает 16 нс при отсутствии интенсивной медленной компоненты и послесвечения, что обеспечивает временное разрешение порядка нескольких сотен пикосекунд для детекторов этого типа [BrilLanCe™..., 2009].

Кроме того, сцинтиллятор $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ обладает высокой температурной стабильностью. Нестабильность светового выхода кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ в зависимости от температуры составляет около 0,01 %/°C, а энергетическое разрешение детектора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ изменяется с 3,3 до 3,5 % для энергии гамма-квантов 662 кэВ при изменении температуры от -30 до $+60$ °C, что объясняется температурной нестабильностью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) [Moszynski et al., 2006].

Для изучения радиационной стойкости сцинтиллятор $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ облучался протонами с энергиями 61...184 МэВ. Спектр протонов имитировал мощную солнечную вспышку в августе 1972 г. [Owens et al., 2007]. Энергетическое разрешение $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ не ухудшилось при увеличении флюенса протонов до 10^{11} протон/см². При увеличении флюенса протонов выше 10^{10} протон/см² в спектре появились значимые активационные линии, соответствующие изотопам ⁷⁶Br, ⁷⁷Br и ⁷⁹Kr. Величина активации кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ соответствует величине активации кристаллов CsI(Tl) и германия при флюенсах протонов выше 10^{10} протон/см² (поглощенная доза составила 100 Гр) и на порядок меньше, чем у германия при флюенсах протонов ниже 10^{10} протон/см².

Существенным недостатком сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ является его собственная активность, которая может мешать проведению низкофоновых измерений. Собственная активность кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ определяется наличием в нем изотопа ¹³⁸La, концентрация которого составляет 0,09 % от природного изотопа ¹³⁹La, и ²²⁷Ac. На рис. 3 показаны спектр фона сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 2,54 \times 2,54$ см и линии, обусловленные распадом изотопов ¹³⁸La и семейства ²²⁷Ac [BrilLanCe™..., 2009].

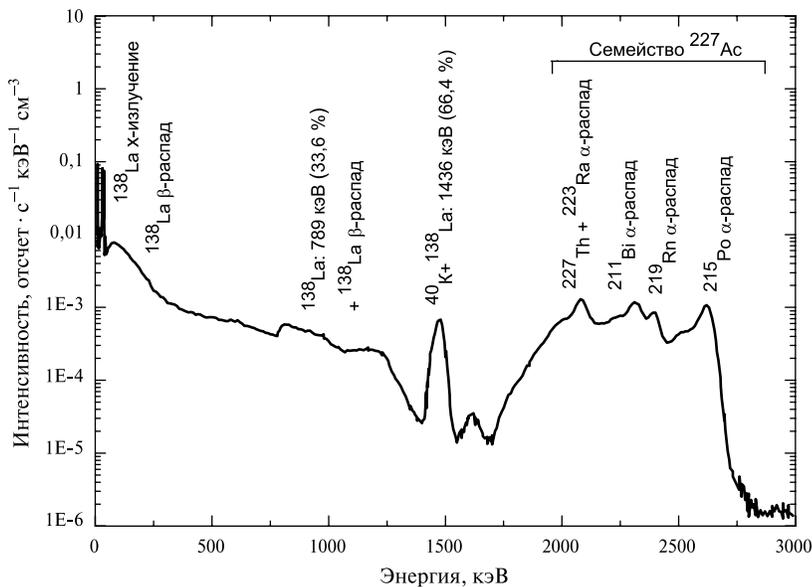


Рис. 3. Фоновый спектр, измеренный сцинтилятором $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 2,54 \times 2,54$ см

Суммарная собственная активность $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ составила 3 отсчет·с⁻¹·см⁻³ в диапазоне энергий 20...3000 кэВ. Суммарная собственная активность, вызванная распадом семейства изотопа ²²⁷Ac, составила 0,6 отсчет·с⁻¹·см⁻³ в диапазоне энергий 1700...3000 кэВ. Уменьшить собственную активность $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ на 20 % можно путем снижения загрязнения изотопом ²²⁷Ac исходного сырья, используемого при производстве кристаллов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$.

К недостаткам сцинтилятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ можно отнести его высокую гигроскопичность и стоимость. Стоимость кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 7,6 \times 7,6$ см производства фирмы «Сент Гобен» (Франция) составляет 56 000 дол., кристалл $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 2,54 \times 2,54$ см, изготовленный в Институте физики твердого тела РАН (Россия), стоит 3500 дол.

Благодаря высоким энергетическому разрешению, радиационной стойкости и температурной стабильности сцинтилятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ можно считать хорошей альтернативой не только кристаллам $\text{NaI}(\text{Tl})$, но и сверхчистому германию, при проведении космических экспериментов по исследованию гамма-излучения солнечных вспышек.

ГАММА-СПЕКТРОМЕТР НА ОСНОВЕ СЖАТОГО КСЕНОНА

Первые работы по созданию ксеноновых гамма-детекторов были выполнены в Московском инженерно-физическом институте (МИФИ) в начале 1980 г. [Власик и др., 1999]. Они базировались на результатах ранее проведенных в МИФИ фундаментальных исследований свойств ксенона как рабочего вещества детекторов и показали, что физический предел энергетического разрешения ксеноновых детекторов составляет около 0,5 % для гамма-квантов с энергией 662 кэВ [Дмитренко и др., 1980].

Для проведения исследований на космических аппаратах был разработан гамма-детектор, схема которого показана на рис. 4. Основной детектора является наполненная сжатым ксеноном цилиндрическая ионизационная камера с экранирующей сеткой, работающая в импульсном режиме. Зарядочувствительный усилитель

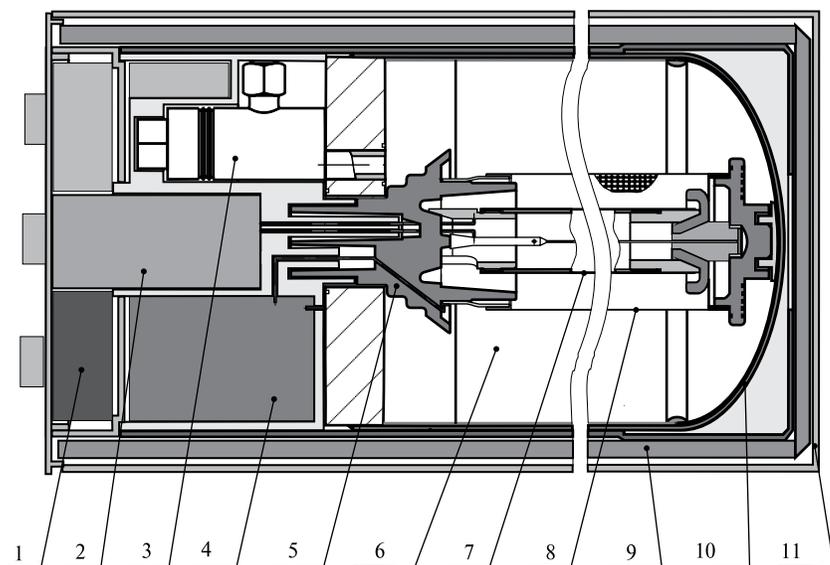


Рис. 4. Общая схема ксенонового гамма-детектора: 1 — преобразователь напряжения для высоковольтного источника; 2 — зарядочувствительный усилитель; 3 — кран для наполнения детектора газом; 4 — блок высоковольтного питания; 5 — керамический гермоввод; 6 — цилиндрическая ионизационная камера; 7 — анод; 8 — экранирующая сетка; 9 — термоизоляция; 10 — катод, являющийся корпусом ионизационной камеры; 11 — защитный алюминиевый корпус

предназначен для усиления электрического сигнала, образующегося на аноде камеры при регистрации вторичных заряженных частиц, возникающих в результате взаимодействия гамма-квантов с рабочим веществом детектора — ксеноном. Высоковольтный источник питания вырабатывает напряжения 20 и 10 кВ, подаваемые на катод и экранирующую сетку гамма-детектора. Корпус ионизационной камеры с толщиной стенки 3 мм обеспечивает двукратный запас механической прочности. Наружный алюминиевый корпус предназначен для герметизации и защиты ксенонового детектора от внешних механических воздействий, на его лицевой панели имеются разъемы, через которые обеспечивается подача напряжения питания и вывод полезного сигнала.

Преимуществом ксенонового детектора является высокое энергетическое разрешение, которое составляет 2,0 % при энергии гамма-квантов 662 кэВ. На рис. 5 представлены зависимости энергетического разрешения от энергии гамма-квантов для ксенонового детектора и сцинтилляторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{NaI}(\text{Tl})$ размером $\varnothing 7,6 \times 7,6$ см, которые показывают, что энергетическое разрешение детектора на сжатом ксеноне в 1,5 раза лучше, чем энергетическое разрешение сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, и в 3,5 раза лучше, чем у кристалла $\text{NaI}(\text{Tl})$. Ксеноновый детектор имеет линейную зависимость положения пика полного поглощения от энергии гамма-квантов. Для диапазона энергий 0,05...2,6 МэВ отклонение этой зависимости от прямой линии не превышает 0,5 %.

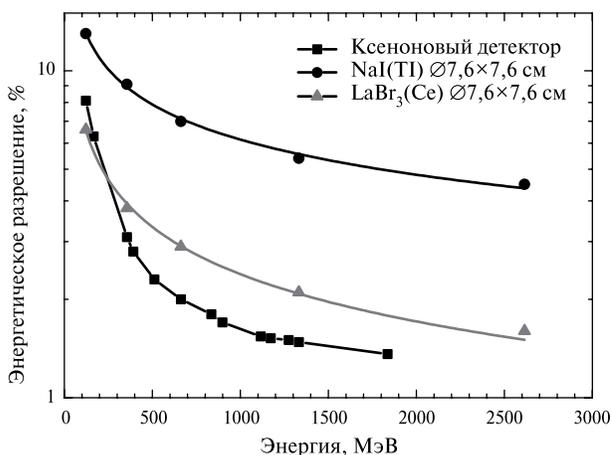


Рис. 5. Энергетическое разрешение ксенонового детектора и сцинтилляторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{NaI}(\text{Tl})$

Основные технические характеристики ксенонового гамма-детектора

| | |
|--|-----------------------------|
| Энергетический диапазон | 0,05...5 МэВ |
| Энергетическое разрешение для энергии 662 кэВ . . . | 2,0 % |
| Эффективность регистрации по пику полного поглощения для энергии 662 кэВ. | 11 % |
| Плотность ксенона | 0,3...0,4 г/см ³ |
| Чувствительный объем | 2000 см ³ |
| Быстродействие. | 10 мкс |
| Габариты. | ∅150×320 мм |
| Масса | 5 кг |
| Напряжение питания. | 24...27 В |
| Потребляемая мощность. | 5 Вт |

Детектор на основе сжатого ксенона имеет высокую температурную стабильность. При изменении температуры от 10 до 175 °С энергетическое разрешение детектора меняется на величину менее 0,5 %, а положение пика полного поглощения смещается на величину менее 1 % от значений при комнатной температуре, что объясняется нагревом электронных компонентов зарядочувствительного усилителя, а не ухудшением характеристик самого ксенонового детектора.

Ксеноновый детектор обладает высокой радиационной стойкостью [Власик и др., 1998]. Не наблюдалось ухудшения энергетического разрешения и изменения положения пика полного поглощения при облучении детектора на сжатом ксеноне потоками нейтронов с флюенсом 10^7 нейтрон/см² и энергией до 12 МэВ. При этом было обнаружено, что ксеноновый детектор активируется, по крайней мере, в 20 раз меньше, чем сцинтиллятор NaI(Tl). В отличие от кристалла LaBr₃(Ce), в фоновом спектре ксенонового детектора появляются только две активационные линии ксенона с энергиями 164 и 236 кэВ и периодами полураспада 12 и 9 дней. Детектор на сжатом ксеноне не имеет собственной активности.

Недостатком ксенонового детектора является его невысокая эффективность регистрации гамма-квантов высоких энергий. Эффективность регистрации по фотопику данного детектора на сжатом ксеноне составляет 11 % для энергии гамма-квантов 662 кэВ и снижается до 4 % для энергии 1332 кэВ, при расположении источника вдоль оси детектора. При расположении источника перпендикулярно оси детектора эффективность регистрации гамма-квантов составляет 4 и 1 % для энергии 662 и 1332 кэВ, соответственно. Эффективная площадь ксенонового детектора, имеющего чувствительный объем 2000 см³ и плотность ксенона 0,4 г/см³, равна 20 см² для энер-

гии гамма-квантов 1 МэВ. Повысить эффективность регистрации гамма-квантов ксеноновым детектором можно путем увеличения чувствительного объема детектора и повышения плотности ксенона.

В настоящее время на базе цилиндрического ксенонового детектора создается гамма-спектрометрическая аппаратура «Сигнал», предназначенная для регистрации линейчатого гамма-излучения солнечных вспышек и космических гамма-всплесков, которую планируется установить на космическом аппарате «Интергелиозонд».

Заключение

Среди существующих детекторов гамма-излучения, за исключением полупроводниковых детекторов из особо чистого германия, сцинтиллятор $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и детектор на основе сжатого ксенона обладают наилучшим энергетическим разрешением, равным 3 и 2 %, соответственно, для энергии гамма-квантов 662 кэВ. Эффективная площадь кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 7,6 \times 7,6$ см и детектора на сжатом ксеноне с чувствительным объемом 2000 см^3 составляет 20 см^2 для энергии 1 МэВ. Кроме того, рассмотренные детекторы обладают высокой линейностью, температурной стабильностью и радиационной стойкостью, что делает их перспективными для использования при проведении космических экспериментов по исследованию гамма-излучения солнечных вспышек. Характеристики обоих детекторов позволяют эффективно регистрировать и исследовать линейчатое гамма-излучение в солнечных вспышках, но следует отметить, что верхняя граница диапазона регистрации гамма-квантов детектора на сжатом ксеноне будет составлять 3...5 МэВ.

Литература

- [Власик и др., 1998] Власик К. Ф., Грачев В. М., Дмитренко В. В., Улин С. Е., Утешев З. М., Юркин Ю. Т. Влияние потоков протонов и нейтронов на спектрометрические характеристики гамма-спектрометра на сжатом ксеноне // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 3. С. 19–24.
- [Власик и др., 1999] Власик К. Ф., Грачев В. М., Дмитренко В. В., Улин С. Е., Утешев З. М. Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 5. С. 114–122.
- [Глобус, Гринев, 2000] Глобус М. Е., Гринев Б. В. Неорганические сцинтилляторы. Новые и традиционные материалы. Харьков: Акта, 2000.
- [Дмитренко и др., 1980] Дмитренко В. В., Романюк А. С. и др. Сжатый ксенон как рабочее вещество для регистрации гамма-квантов малых энергий // Элементарные частицы и космические лучи. 1980. Вып. 5. С. 72.

- [Котов и др., 2011] *Котов Ю. Д., Юров В. Н., Лунарь Е. Э., Власик К. Ф., Архангельский А. И., Глянченко А. С., Рубцов И. В., Кадилин В. В., Тышкевич В. Г.* Спектрометр высокоэнергичных излучений «Наталья-2М». Функционирование на орбите в составе КА «КОРОНАС-Фотон» // *Астроном. вестн.* 2011. Т. 45. № 2. С. 103–127.
- [BrilLanCe™..., 2009] *BrilLanCe™ Scintillators Performance Summary, 2009.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.detectors.saint-gobain.com.
- [Forrest et al., 1980] *Forrest D. J., Chupp E. L.* et al. The gamma-ray spectrometer for the solar maximum mission // *Solar Physics.* 1980. V. 65. P. 15–23.
- [Johnson et al., 1993] *Johnson W. N., Kinzer R. L.* et al. The Oriented Scintillation Spectrometer Experiment instrument description // *Astrophysical J. Supplement Series.* 1993. V. 86. P. 693–712.
- [Moszynski et al., 2006] *Moszynski M., Nassalski A.* et al. Temperature dependences of $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ and $\text{NaI}(\text{Tl})$ scintillators // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* 2006. V. A568. P. 739–751.
- [Murphy et al., 1997] *Murphy R. J., Share G. H.* et al. Accelerated particle composition and energetics and ambient abundances from gamma-ray spectroscopy of the 1991 June 4 solar flare // *Astrophysical J.* 1997. V. 490. P. 883–900.
- [Owens et al., 2007] *Owens A., Bos A. J. J.* et al. Assessment of the radiation tolerance of $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ scintillators to solar proton events // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* 2007. V. A572. P. 785–793.
- [Smith et al., 2002] *Smith D. M., Lin R. P.* et al. The RHESSI spectrometer // *Solar Physics.* 2002. V. 210. P. 33–60.
- [Yoshimori et al., 1991] *Yoshimori M., Okudaira K.* et al. The wide band spectrometer on the SOLAR-A // *Solar Physics.* 1991. V. 136. P. 69–88.

**GAMMA-RAY SPECTROMETERS BASED ON $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$
SCINTILLATOR AND HIGH PRESSURE XENON
FOR SPECTROSCOPY OF SOLAR FLARES
GAMMA-RAY LINES EMISSION**

**K. F. Vlasik, V. V. Dmitrenko, V. M. Grachev, E. A. Zhuchkova,
Yu. D. Kotov, A. V. Kochemasov, E. E. Lupar, Yu. A. Trofimov,
S. E. Ulin, Z. M. Uteshev, V. N. Yurov**

*National Research Nuclear University “MEPhI”
(NRNU MEPhI), Moscow*

The basic results of an investigation into spectrometric characteristics of $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ scintillator and xenon detector, having the high energy resolution at gamma-ray energy of 662 keV equal 3 and 2 %, accordingly, are presented. The effective area of $\varnothing 7.6 \times 7.6$ cm $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ crystal and high pressure xenon detector with 2000 cm³

sensitive volume is 20 cm^2 at 1 MeV. Good linearity, high temperature stability and radiation hardness, do these detectors by the most perspective for carrying out of space experiments on research of solar flares gamma-ray emission.

Keywords: $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ -scintillator, high pressure xenon, gamma-ray spectrometers, energy resolution, radiation hardness, self-activity, Solar space research, solar flares.

-
- Vlasik Konstantin Fedorovich** — leading engineer, PhD, e-mail: KFVlasik@mephi.ru.
Dmitrenko Valery Vasilyevich — professor, Ph.D, e-mail: VVDmitrenko@mephi.ru.
Grachev Victor Mikchailovich — associate professor, PhD, e-mail: VMGrachev@mephi.ru.
Zhuchkova Evgenya Anatolevna — engineer, e-mail: jan-k@mail.ru.
Kotov Yury Dmitrievich — director of the Astrophysics Institute MEPhI, PhD, e-mail: kotov@mephi.ru.
Kochemasov Alexey Viktorovich — engineer, e-mail: kochemasov@rambler.ru.
Lupar Evgeny Eduardovich — engineer, e-mail: EELupar@mephi.ru.
Trofimov Yury Alekseevich — engineer, e-mail: YuTrofimov@gmail.com.
Ulin Sergey Evgenievich — professor, Ph.D, e-mail: SEUlin@gmail.com.
Uteshev Ziyaetdin Mukhamedovich — Senior scientist, PhD, e-mail: ZMUteshev@mephi.ru.
Yurov Vitaly Nikolaevich — deputy director of the Astrophysics Institute MEPhI, PhD, e-mail: VNYurov@mephi.ru.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 16.02.2012

Заказ 3282

Формат 70×108¹/₃₂

Тираж 100

8,83 уч.-изд. л.