

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

УДК 551.5

Проект «КОРОНАС-ФОТОН»

С. Н. Волков, А. В. Горбунов,
Р. С. Салихов, В. П. Ходненко

Рассматривается история появления и осуществления программы фундаментальных исследований Солнца. В настоящее время не только специалистами, но и большинством населения нашей планеты, осознано влияние солнечной активности на многие процессы, идущие на Земле и непосредственно влияющие на условия жизни и здоровье людей. На первый план выдвигается проблема возможного изменения климата (потепление) в долгосрочной перспективе (в масштабах столетий и тысячелетий) и связанное с этим – краткосрочный прогноз (в масштабе десятилетий). До сих пор причина изменения климата точно не установлена. Обсуждаются две причины: во-первых, изменение средней величины излучения Солнца за столетие и, во-вторых, антропогенная причина – изменение радиационного баланса атмосферы из-за парникового эффекта. Точное знание степени влияния каждого из этих факторов на изменение климата напрямую определяет принятие человечеством соответствующих мер глобального характера. Дана общая характеристика и определены цели проекта «КОРОНАС-ФОТОН» и состав его участников. Приводятся назначение космического комплекса «КОРОНАС-ФОТОН», характеристики, состав одноимённого космического аппарата и задачи эксперимента. Рассматривается состав комплекса научной аппаратуры, его задачи и целевое назначение.

Представлены программы работы и основные научные результаты, полученные космическим аппаратом «КОРОНАС-ФОТОН», который стал единственным отечественным специализированным научным аппаратом начала нашего столетия. Последним объясняется достаточно полное изложение в статье различных аспектов проведённых исследований.

Ключевые слова: космический аппарат, фундаментальное исследование, солнечная активность, комплекс научной аппаратуры, система электропитания, солнечные вспышки, гамма-излучение, спектры излучения, жёсткое рентгеновское излучение.

История проекта. В 1992 г. Российская академия наук и Академия наук Украины подписали соглашение по реализации программы фундаментальных исследований Солнца «КОРОНАС» (Комплексные орбитальные околоземные наблюдения активности Солнца). Этот крупный международный проект предполагал запуск трёх космических аппаратов (КА), которые должны были исследовать 11-летний цикл активности Солнца. КА «КОРОНАС-И» должен был отправиться на орбиту в 1993 г., «КОРОНАС-Ф» – в 1994-м, а «КОРОНАС-ФОТОН» – в 1995 г., соответственно, для того, чтобы совокупный срок службы аппаратов позволил изучить Солнце в течение всего 11-летнего цикла его активности.

Однако задержка с финансированием проекта привела к тому, что КА «КОРОНАС-И» запустили с космодрома Плесецк в 1994 г., «КОРОНАС-Ф» – в 2001-м, а «КОРОНАС-ФОТОН» – только в 2009 г. Проект «КОРОНАС-ФОТОН» был включен в международную программу «Жизнь со звездой».

К 2009 г. оба предыдущих КА «КОРОНАС» вышли из строя, поэтому следующий КА решили оборудовать новейшей научной техникой, не имеющей аналогов в мире. КА «КОРОНАС-ФОТОН», в отличие от предыдущих КА этой программы, сделали не на базе днепропетровской платформы «АУОС-СМ», а на базе российского метеоспутника «Метеор-3М».

КА «КОРОНАС-ФОТОН» стал первым за последние почти десять лет отечественным научным спутником, выведенным на орбиту в рамках долгосрочной российской программы исследования Солнца и солнечно-земных связей.

Общий вид и характеристики КА «КОРОНАС-ФОТОН» приведены на рис. 1 и в табл. 1 соответственно.

Общая характеристика и цели проекта «КОРОНАС-ФОТОН». 30 января 2009 г. в 16 ч 30 мин ракета-носитель (РН) «Циклон-3» вывела КА «КОРОНАС-ФОТОН» на околоземную орбиту с космодрома Плесецк.

Изначально дата старта была назначена на 29 января, однако за несколько минут до запуска во время отделения ферм крепления стартового стола от РН была нарушена нормальная работа дренажного клапана её второй ступени, что обусловило пуск КА «КОРОНАС-ФОТОН» со второй попытки.

Основные цели проекта [1]:

- исследование процессов накопления энергии и её трансформации в энергию ускоренных частиц во время солнечных вспышек;
- изучение механизмов ускорения, распространения и взаимодействия энергетических частиц в атмосфере Солнца;
- исследование корреляции солнечной активности с физико-химическими процессами в верхней атмосфере Земли;

– систематическое исследование гамма-излучения солнечных вспышек вплоть до энергий 2000 МэВ;

– регистрация нейтронов аппаратурой с большой эффективной площадью.

Измерение линейкой поляризации излучения должно было открыть новый канал получения информации о механизмах ускорения и переноса электронов в области вспышки.

Впервые в солнечных исследованиях должны были быть применены новые типы сцинтилляторов (УА 103), позволяющие повысить быстродействие аппаратуры до долей микросекунды и увеличить достоверность получаемых данных.

Участники проекта. Головная организация по КК «КОРОНАС-ФОТОН»: АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Разработчик и изготовитель КА «КОРОНАС-ФОТОН»: АО «НИИЭМ».

Головная организация по НКУ КА «КОРОНАС-ФОТОН»: ФГУП «НИИ ТП».

Головная организация по использованию КК «КОРОНАС-ФОТОН»: НИЯУ «МИФИ».

Головная организация по НКПОР: НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы».

Главный оператор КК: Институт астрофизики НИЯУ МИФИ (ИАФ НИЯУ МИФИ).

Головной организацией по КНА «ФОТОН» был определён ИАФ НИЯУ МИФИ, которым была создана сеть научных организаций, занятых разработкой отдельных приборов комплекса.

Назначение КК «КОРОНАС-ФОТОН» [1]:

– регистрация спектров жёсткого электромагнитного излучения в широком энергетическом диапазоне от 20 КэВ до 2000 МэВ с высоким временным и амплитудным разрешением и подробным исследованием гамма-излучения;

– построение изображений диска Солнца с высоким угловым и временным разрешением в рентгеновском диапазоне;

– измерение линейной поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек;

– регистрация нейтронов солнечного происхождения;

– мониторинг жёсткого ультрафиолетового, жёсткого рентгеновского и вариаций интенсивности солнечного излучения;

– регистрация потоков, энергетических спектров и направления прихода электронов, протонов и ядер;

– регистрация рентгеновского излучения областей плоскости эклиптики, в которых находятся достаточно интенсивные рентгеновские источники.

Наряду с получением новых сведений о вспышечных процессах на Солнце должны быть исследованы

процессы и явления, относящиеся к физике солнечно-земных связей и имеющие прикладное значение:

– характеристики выбросов из атмосферы Солнца корональных масс и их влияния на солнечно-земные связи;

– динамики параметров верхней атмосферы Земли на основе мониторинга поглощения солнечного жёсткого излучения в моменты захода спутника в тень Земли и выхода из неё;

– динамики области проникновения солнечных космических лучей в атмосферу Земли во время геомагнитных возмущений;

– динамики потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли.

КА «КОРОНАС-ФОТОН». КА «КОРОНАС-ФОТОН» создан на базе КА «Метеор-3М» с максимальным использованием блоков комплексов управления и служебных систем.

Общий вид КА «КОРОНАС-ФОТОН» показан на рис. 1, а компоновочная схема на рис. 2.

Характеристики КА «КОРОНАС-ФОТОН» представлены в табл. 1.

Задачи эксперимента:

1. Физика Солнца и солнечно-земных связей:

– определение функции распределения ускоренных в солнечной вспышке электронов, протонов и ядер и их эволюции с высоким временным разрешением;

– исследование различия в динамике ускорения электронов и протонов;

– исследование особенностей эволюции функции распределения для высокоэнергетических частиц (вплоть до энергий в несколько ГэВ);

– исследование угловой анизотропии взаимодействующих частиц на основании статистического анализа спектров излучения и параметров линейной поляризации жёсткого рентгеновского излучения;

– изучение эволюции во времени энергетических спектров жёсткого электромагнитного излучения в широком энергетическом диапазоне от 12 до 2000 МэВ, потоков мягкого рентгеновского и ультрафиолетового (УФ) излучений;

– изучение временного поведения жёсткого рентгеновского излучения в солнечных вспышках и гамма-всплесках;

– изучение эффектов направленности в области гамма-излучения высоких энергий;

– регистрация нейтронов солнечного происхождения;

– определение механизмов и условий ускорения электронов и протонов на разных фазах вспышки и параметров области удержания (распространения) ускоренных частиц;

– определение обилия элементов в области генерации гамма-излучения методом гамма-спектроскопии и по скорости захвата нейтронов низких энергий в атмосфере Солнца;

– определение вида энергетического спектра ускоренных протонов и ядер и динамики этих спектров по соотношению ядерных гамма-линий;

– исследование химического и изотопного составов ускоренных в солнечной вспышке ядер, а также энергетических и временных характеристик электронов и протонов;

– изучение аномальной компоненты космических лучей и захваченной магнитным полем Земли радиации;

– мониторинг верхних слоёв атмосферы, осуществляемый по поглощению в них солнечных (рентгеновского и УФ-) излучений, а также жёсткого ультрафиолета спокойного Солнца.

2. Астрофизика:

– исследование рентгеновского и гамма-излучения космических гамма-всплесков;

– исследование рентгеновских источников, расположенных в плоскости эклиптики.

Комплекс научной аппаратуры (КНА) «ФОТОН» КА «КОРОНАС-ФОТОН» (табл. 2) включал в

себя 11 научных и 2 служебных прибора, созданных научными организациями России, Украины, Индии и Польши.

Кроме КНА в состав КА «КОРОНАС-ФОТОН» (рис. 3) входили: бортовой комплекс обеспечения систем (БКОС) и бортовой комплекс управления (БКУ).

БКОС включал в себя: систему энергоснабжения (СЭС), систему ориентации и стабилизации (СОС), систему обеспечения теплового режима, антенно-фидерное устройство (АФУ).

В состав БКУ входили: бортовая управляющая машина 17М223-2, бортовая аппаратура (БА) командно-измерительной системы (КИС) «Компарус-А2», блок кодового обмена, блок выдачи команд управления (БВКУ-1, БВКУ-2); блок сопряжения «Три-Д»; БА телесигнализации ТА 923 М3; передатчик ТМ-информации.

Программа работы. В промежуток времени со 2-х по 45-е сутки полёта производились проверочные включения БА.

Первыми операциями с КНА «ФОТОН» были включение магнитометра СМ-8М и открытие защитной крышки прибора «ФОКА», проведённые

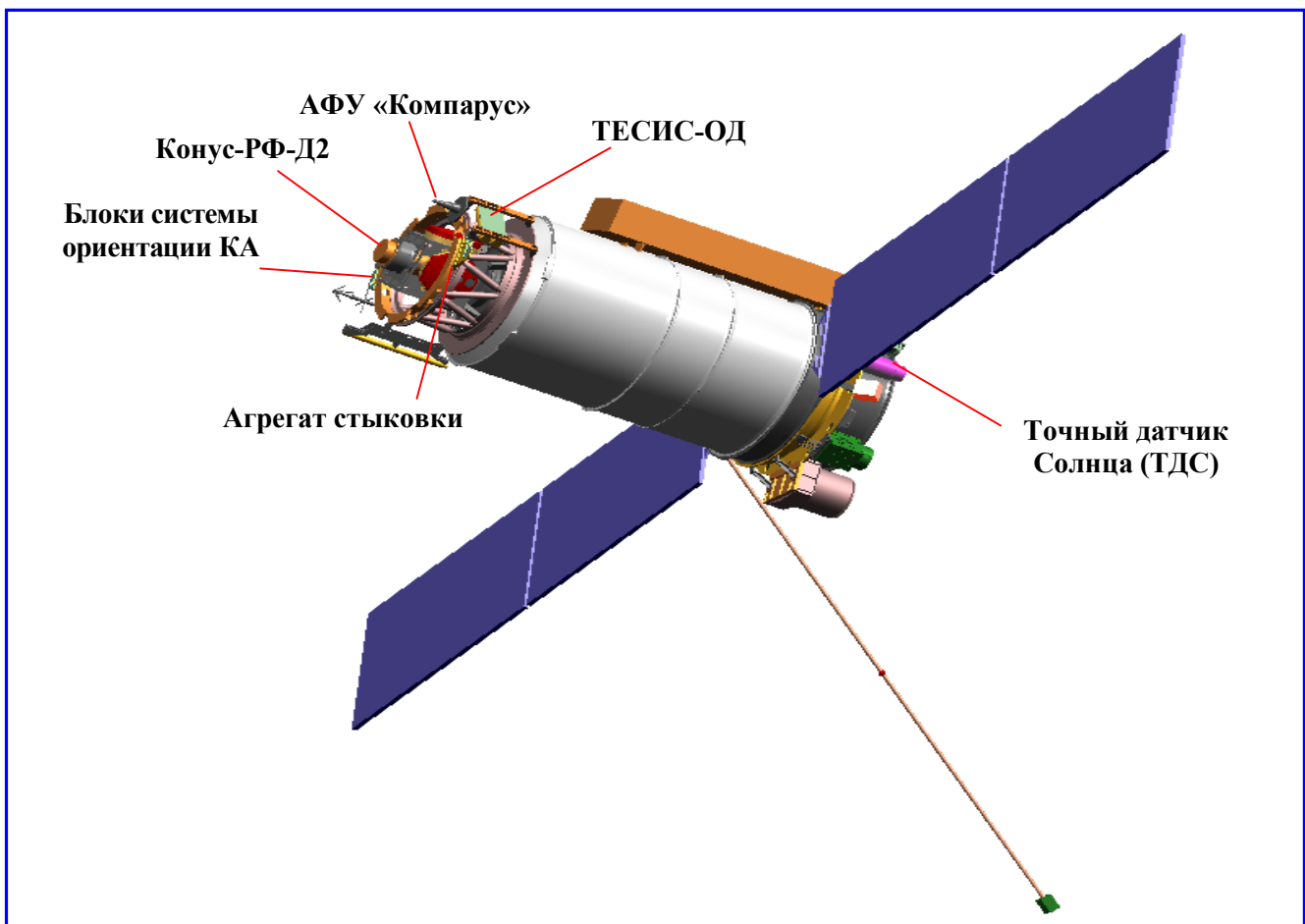


Рис. 1. Общий вид КА «КОРОНАС-ФОТОН»

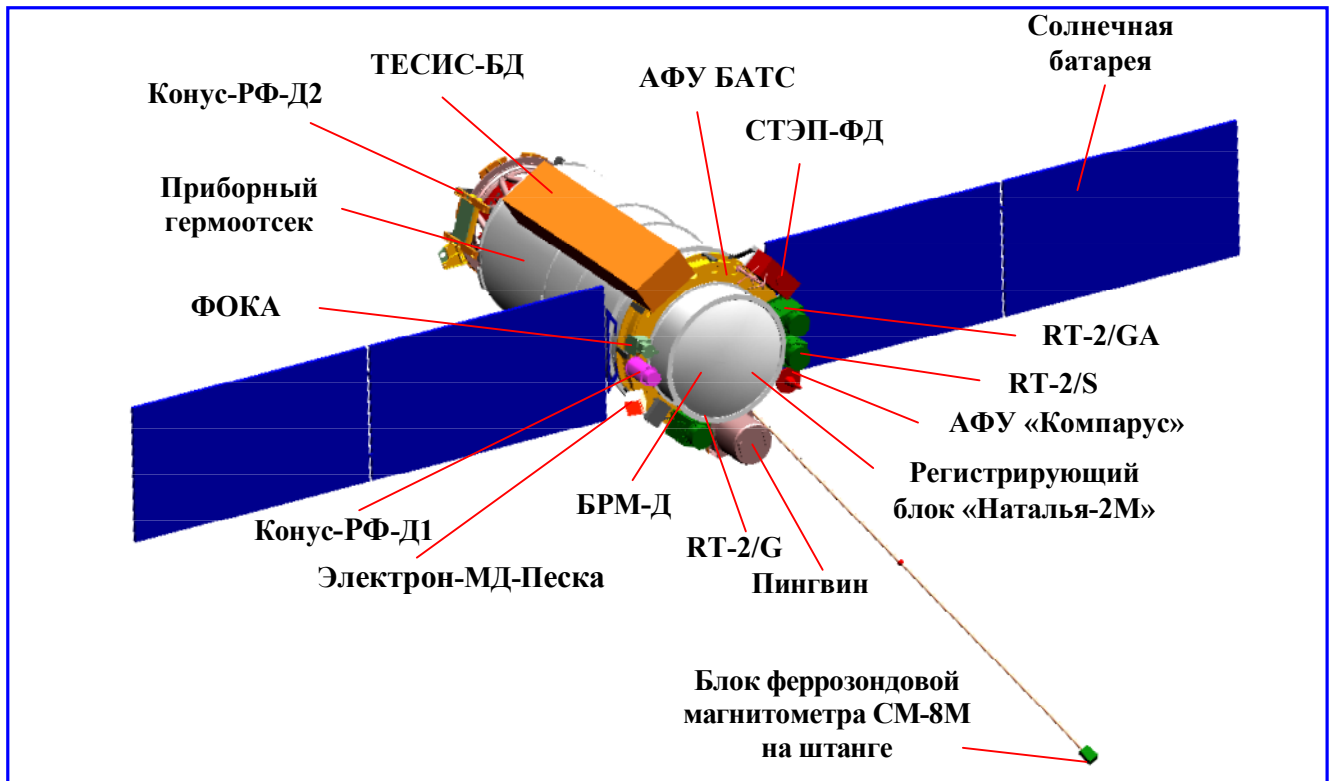


Рис. 2. Компоновочная схема КА «КОРОНАС-ФОТОН»

Таблица 1

Характеристики КА «КОРОНАС-ФОТОН»

Масса КА, кг	1900
Масса КНА, кг	540
Тип орбиты	Квазикруговая
Параметры орбиты	
Высота, км	540 ... 583
Наклонение, град.	82,48
Период, мин	95,67
Планировавшийся САС, лет	Не менее 3
Стабилизация угловых скоростей КА, град./с	Не более 0,005
Параметры системы электропитания	
Напряжение, В	27 ⁺⁷ ₋₃
Энергопотребления научной аппаратуры, Вт	Не менее 400
Максимальное энергопотребление (в течение 15 мин за виток), Вт	600
Среднесуточное энергопотребление, Вт	400
Температура газа в герметичном отсеке КА в диапазоне, °С	5 ... 35
Объем запоминаемой научной информации за сутки, Гбит	8,2
Объем информации, передаваемой за один сеанс связи, Мбит	2048
Особенности КА	
Постоянная ориентация продольной оси КА на Солнце за счёт вращения аппарата	
Точность ориентации оси, угл. мин	Не хуже 5
Точность определения ориентации продольной оси КА на Солнце, угл. мин	Не хуже 3
Точность определения местоположения КА на орбите	
Вдоль орбиты, м	±1000
По высоте и боковому направлению, м	±500
Объем сбрасываемой научной информации за сутки, Гбайт	1

Таблица 2

Состав КНА КА «КОРОНАС-ФОТОН» [2]*

Название научной аппаратуры	Использование в научных экспериментах (задачи и цели)	Организация-разработчик
Гамма-излучение и нейтроны		
Спектрометр высокоэнергетических излучений «Наталья-2М»	Задачи: исследование физических механизмов ускорения электронов, протонов и ядер на различных фазах развития солнечных вспышек, а также определение физических параметров областей удержания (распространения) ускоренных частиц. Цели: изучение эволюции во времени энергетических спектров жёсткого электромагнитного излучения в широком энергетическом диапазоне от 0,3 МэВ до 2 ГэВ, регистрация нейтронов солнечного происхождения с энергиями 20 – 300 МэВ	Национальный исследовательский ядерный университет (ИАФ НИЯУ МИФИ), Москва, Россия
Телескоп-спектрометр низкоэнергетического гамма-излучения RT-2	Задачи: исследование рентгеновского и гамма-излучения Солнца и других космических источников: галактических и внегалактических рентгеновских источников, ядер активных галактик, гамма-всплесков, жёсткого рентгеновского диффузного фона. Цели: регистрация временных профилей солнечного рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне 15 КэВ – 1 МэВ с временным разрешением 0,1 с, спектрометрия солнечного рентгеновского и гамма-излучения в энергетических диапазонах 10 КэВ – 1 МэВ, получение изображения солнечных вспышек в жёстком рентгеновском диапазоне с использованием полупроводникового детектора на основе CdZnTe и CMOS-матрицы с нанесённым на неё GdOS-сцинтиллятором	Институт фундаментальных исследований Тата (TIFR), Мумбай (Бомбей), Индия
Поляриметр-спектрометр жёсткого рентгеновского излучения «Пингвин-М»	Задачи: исследование процессов накопления магнитной энергии и её трансформации в энергию ускоренных частиц и излучений во время солнечных вспышек, изучение динамики процессов энерговыведения в слабых вспышках. Цели: измерение параметров линейной поляризации жёсткого рентгеновского излучения солнечных вспышек в энергетическом диапазоне 20 – 150 КэВ, рентгеновская и гамма-спектроскопия солнечных вспышек в диапазоне 18 – 450 КэВ, мягкое рентгеновское излучение 2 – 10 КэВ, мониторинг	Национальный исследовательский ядерный университет (ИАФ НИЯУ МИФИ), Москва, Россия; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Санкт-Петербург, Россия
Рентгеновский и гамма-спектрометр «КОНУС-РФ»	Задачи: исследование рентгеновского и гамма-излучения Солнца, исследование космических гамма-всплесков. Цели: постоянный мониторинг вспышек жёсткого рентгеновского излучения Солнца и космических гамма-всплесков, а также поиск необычных транзиентных явлений в рентгеновских и гамма-лучах по данным непрерывного обзора небесной сферы, исследование временной истории и спектральной эволюции солнечных рентгеновских вспышек с высоким временным разрешением от 2 мс	Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
Комплекс космических телескопов «Тесис». Рентгеновский фотометр-спектрогелиометр Solar Photometer in X-rays (SphinX) в составе «Тесис»	Цели: мониторинг солнечной активности с высоким временным (до секунды) и пространственным разрешением, УФ-мониторинг Солнца, исследование рентгеновски активных областей на Солнце и их эволюции (активные области, корональные дыры, яркие точки, вспышки, транзиенты и др.), наблюдение солнечной EUV-короны на расстоянии от 0,7 м до 4 радиусов Солнца с высоким пространственным разрешением, диагностика солнечной плазмы по рентгеновским изображениям Солнца, получаемым одновременно в нескольких спектральных каналах, исследование влияния солнечной активности на верхнюю атмосферу Земли	Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия; Центр космических исследований Польской академии наук, Варшава, Польша

Продолжение табл. 2

Название научной аппаратуры	Использование в научных экспериментах (задачи и цели)	Организация-разработчик
Гелиосейсмология		
Многоканальный солнечный фотометр «Сокол»	Задачи: изучение внутреннего строения Солнца методом гелиосейсмологии. Цели: долговременные непрерывные наблюдения вариаций интенсивности солнечного излучения в диапазоне длин волн 280 – 1500 нм, изучение на основе полученных из наблюдений спектров глобальных солнечных колебаний характеристик внутренних слоёв Солнца, изучение зависимости параметров солнечных колебаний от уровня солнечной активности	Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова, Троицк, Россия
Космические лучи		
Анализатор заряженных частиц «Электрон-М-Песка»	Задачи: исследование динамики области проникновения солнечных космических лучей в магнитосферу Земли во время геомагнитных возмущений, исследование динамики потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли, изучение поведения электронов в области внутреннего радиационного пояса Земли; поиск и исследование гамма-излучения солнечных вспышек, включая эмиссию в ядерных линиях, изучение временной структуры гамма-всплесков и их энергетических спектров и закономерностей быстрой спектральной эволюции, детальное изучение радиационной фоновой обстановки на орбитах КА и её вариаций с целью обнаружения других космических транзиентов, а также постоянных дискретных источников при их покрытии Землёй	Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), Россия
Рентгеновское излучение		
Быстрый рентгеновский монитор	Задачи: исследование процессов накопления магнитной энергии и её трансформации в энергию ускоренных частиц и излучений во время солнечных вспышек, изучение динамики процессов энерговыделения в слабых вспышках. Цели: быстрый мониторинг жёсткого рентгеновского излучения Солнца в энергетическом диапазоне 20 – 600 КэВ с временным разрешением до 2 – 3 мс, определение временного профиля вспышек рентгеновского излучения на Солнце в шести поддиапазонах энергии	Национальный исследовательский ядерный университет (ИАФ НИЯУ МИФИ), Москва, Россия
Многоканальный монитор УФ-излучения «ФОКА»	Задачи: изучение механизмов возникновения и развития солнечных вспышек и вариаций солнечного излучения, изучение состояния верхних слоев атмосферы Земли. Цели: мониторинг УФ-излучения Солнца в диапазонах длин волн: 1 – 11 нм, 27 – 37 нм, 121,6 нм; определение коррекции между потоками излучения в XUV/EUV-диапазоне и потоками излучения в других энергетических диапазонах; оккультационные измерения поглощения УФ-излучения Солнца в слоях атмосферы Земли с высотами от 150 до 500 км; изучение энергетических спектров и потоков протонов, альфа-частиц и ядер группы C, N, O, ускоренных во время солнечных вспышек; регистрация потоков и энергетических спектров: протоны – 1 – 20 МэВ, электроны – 0,2 – 4,0 МэВ, ядра – (с Z < 26) 2 – 50 МэВ/нуклон. Регистрация потоков и энергетических спектров протонов, электронов и ядер на орбите КА	Национальный исследовательский ядерный университет (ИАФ НИЯУ МИФИ), Москва, Россия
Спутниковый телескоп электронов и протонов «СТЭП-Ф»	Задачи: исследование динамики энергетических спектров и пичч-угловых распределений высокоэнергичных электронов и протонов радиационных поясов Земли во время магнитных бурь и суббурь, в результате воздействия высокоскоростных потоков солнечного ветра на магнитосферу Земли; исследование волновых процессов и динамики высокоэнергетических частиц в магнитосфере Земли. Цели: регистрация потоков и спектров: протоны – 9,8 – 61,0 МэВ, электроны – 0,4 – 14,3 МэВ, альфа-частицы – 37,0 – 246,0 МэВ с измерением направлений прихода частиц с точностью 8 – 10°	Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

Окончание табл. 2

Название научной аппаратуры	Использование в научных экспериментах (задачи и цели)	Организация-разработчик
Вспомогательные системы КНА		
Магнитометр СМ-8М	Задачи: исследование коррекций потоков заряженных частиц на орбите спутника с возмущениями геомагнитного поля. Цели: мониторинг магнитного поля Земли с измерением трёх компонентов постоянного магнитного поля на орбите КА в диапазоне от -55 до $+55$ мкТл с погрешностью не более $0,3$ мкТл	АО «Геологоразведка», Санкт-Петербург, Россия, ИАФ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия
Система сбора и регистрации научной информации (ССРНИ)	Назначение: приём научной информации от 24-х источников массивов – научных приборов по последовательному интерфейсу со скоростью 62,5 или 125 Кбит/с, хранение информации в долговременной памяти; передача научным приборам команд управления (КПИ), кода бортового времени, «секундных» меток, выдача сохранённой и текущей информации в радиоканал со скоростью 7,68 Мбит/с или 15,36 Мбит/с для передачи на Землю; объём ЗУ не менее 12 Гбит	Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия
Блок управления и соединения БУС-ФМ	Назначение: подача питания на КНА и управление аппаратурой с помощью 200 разовых команд и формирование КПИ	Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия
Комплекс радиопередатчиков и АФУ	Назначение: передача научной информации на наземный пункт приёма на двух близких частотах диапазона 8,2 ГГц, выходная мощность – 8 Вт	ФГУП «РНИИ КП», Москва, Россия

*Научная аппаратура позволяла вести комплексные исследования электромагнитного излучения Солнца в широком диапазоне энергий от ближнего ультрафиолета до высокоэнергетичного гамма-излучения ~ 1 ГэВ. Применение новейших детекторов и значительное увеличение пропускной способности радиолинии спутника позволило наблюдать изображения диска Солнца в рентгеновских лучах с временным разрешением лучше 1 мин, а в приборах по мониторингу излучений дойти до изучения динамики процессов с разрешением несколько миллисекунд.

4 февраля. Блок БИС-КФ был включён 13 февраля, и в тот же день осуществлён первый сброс тестовой информации на приёмные станции научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ). А 17 февраля был включён блок ССРНИ, и проведён тестовый сброс информации, записанной в память прибора на космодроме. После успешного завершения этих работ 19 февраля была включена большая часть научных приборов, а 20 февраля включены приборы «Наталья-2М» и «Тесис».

Надо отметить, что вывод КА «КОРОНАС-ФОТОН» на орбиту высотой ~ 550 км, наклоном $\sim 83^\circ$ позволил наблюдать Солнце интервалами до 25 суток, что примерно равно периоду вращения Солнца. Главным объектом изучения стали процессы накопления и выделения солнечной энергии во время вспышек.

Возможность непрерывного наблюдения Солнца, отвечающая условиям эксперимента, возникает из-за особенностей орбиты КА, который вращается вокруг Земли по орбите с высоким наклоном, т. е. почти перпендикулярно к плоскости эклиптики, где происходит годовое движение Земли вокруг Солнца. В результате, если плоскость орбиты

спутника поворачивается перпендикулярно к направлению на Солнце, то вся орбита оказывается освещённой, – ни одна из её точек не перекрывается Землёй. Для КА «КОРОНАС-ФОТОН» такая ситуация возникает три раза в год: в апреле, июле и октябре.

Непрерывное наблюдение Солнца, естественно, открывает перед учёными дополнительные научные возможности. Дело в том, что большинство активных событий на Солнце, хотя и носят взрывной характер, но занимают довольно продолжительное время. Это связано главным образом с гигантскими пространственными масштабами, которые охватывают явления на Солнце. Так, например, развитие эруптивных протуберанцев может занимать десять и более часов. Именно такое время проходит от начала движения протуберанца до его отрыва от Солнца. Корональные выбросы массы, играющие главную роль в воздействии Солнца на Землю, формируются в нижней короне Солнца в течение суток и более. Даже солнечные вспышки, импульсная фаза которых продолжается всего несколько минут, имеют очень продолжительную поствспышечную стадию, в течение которой

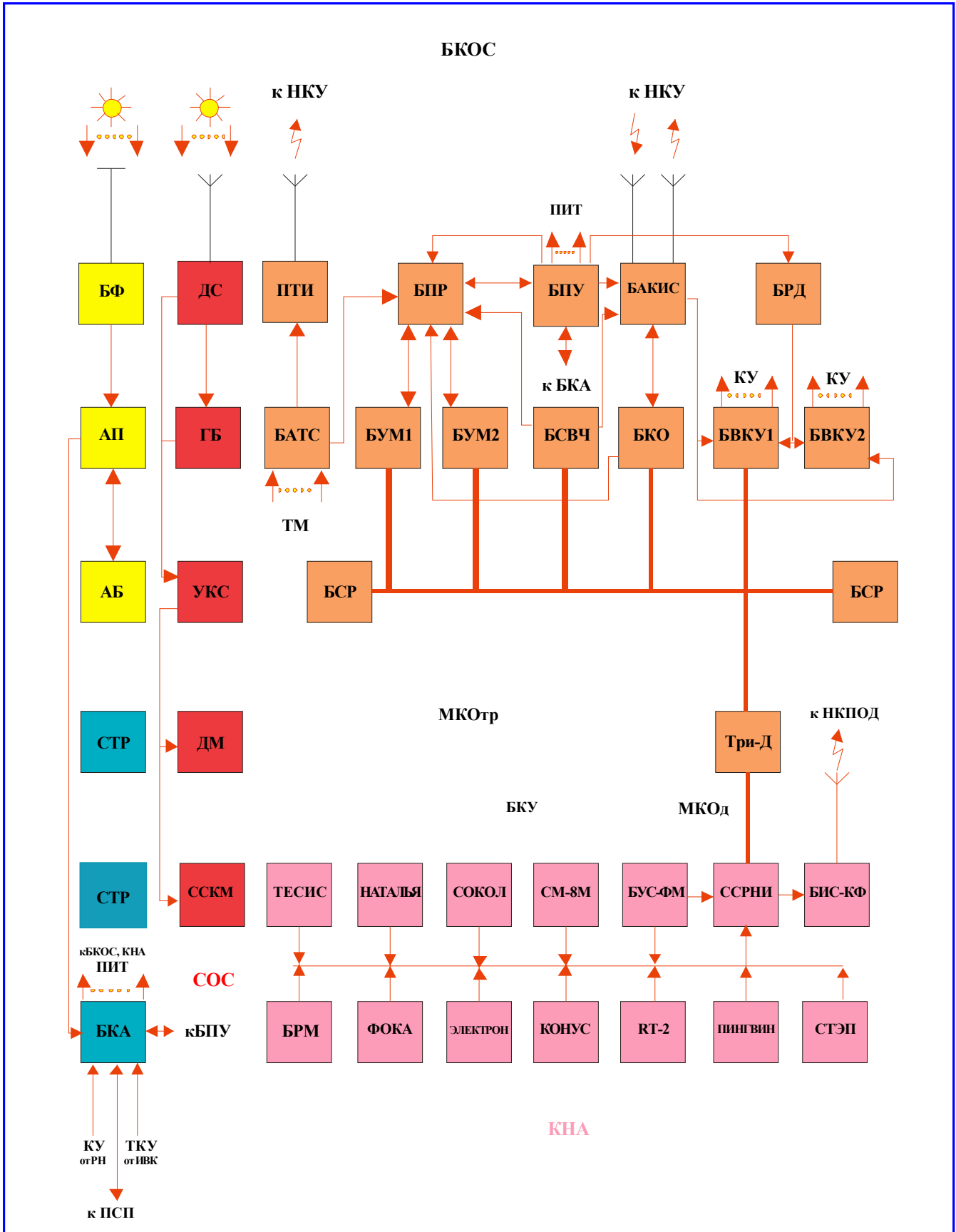


Рис. 3. Структурно-функциональная схема КА «КОРОНАС-ФОТОН»

возмущённая солнечная атмосфера релаксирует обратно к состоянию равновесия. Всё это делает невозможным наблюдение одного события полностью в течение освещённого участка орбиты, продолжающегося около часа. Бестеневые участки продолжительностью в сотни часов открывают совершенно иные возможности.

Первый сброс научной информации состоялся, как отмечалось выше, 13 февраля 2009 г., после чего последовали месяцы успешной работы.

Однако в сентябре – октябре 2009 г. на спутнике начались сбои, аварийное отключение научной аппаратуры, а 11 декабря 2009 г. связь с КА полностью прервалась. КА «КОРОНАС-ФОТОН» был потерян станциями КИП ВС РФ.

В течение последующих месяцев центр управления полётами (ЦУП) и командно-измерительные пункты (КИП) ВС РФ продолжали попытки выхода на связь с аппаратом. Однако в апреле 2010 г., когда визуальное наблюдение установило дезориентацию аппарата и разворот его панелями СБ к Земле, попытки его восстановить было решено прекратить. Необходимо отметить, что на момент выхода КА из строя все научные приборы оставались работоспособными и до последнего момента передавали на Землю научную информацию.

Общая продолжительность целевой работы КА составила 278 дней: с 26 февраля (день включения научной аппаратуры) до 30 ноября 2009 г. (день последнего получения научной информации).

Научные результаты. Данные, полученные с КА «КОРОНАС-ФОТОН», охватывают указанный выше период (с конца февраля по конец ноября 2009 года). Это был уникально длительный период глубокого минимума солнечной активности, при наличии лишь около двух десятков вспышек, немного превышающих минимальный уровень С-класса, и не было ни одной вспышки класса М или мощнее. Поэтому подавляющая часть информации получена в диапазонах от ультрафиолета до мягкого рентгена. Вместе с тем столь малый уровень активности позволил исследовать элементарные, не налагающиеся во времени друг на друга процессы, исследование которых в период активного Солнца неосуществимо, особенно приборами, не дающими изображения в соответствующем энергетическом диапазоне.

Основные научные результаты, полученные в ходе научной программы [2]:

Приборы «Тесис» и Sphinx. Получены первые в мире данные о тонкой структуре и динамике про-

межучной (на расстояниях от 0,5 до 1,5 солнечных радиусов) короны Солнца с температурой порядка 1 млн град.

Совместно с обсерваторией HINODE (Япония) обнаружен особый тип «горячих» корональных выбросов массы с температурой плазмы порядка 10^6 К.

Впервые в мире с временным разрешением в несколько минут зарегистрированы все стадии «отделения» выброса корональной массы от магнитного поля Солнца.

Получены первые данные о динамике горячих корональных рентгеновских точек и хромосферных спикул с временным разрешением порядка 1 с. Зарегистрирован новый тип событий – микровыбросы плазмы (джеты) в активных областях с продолжительностью события порядка 1 мин. Впервые в мире измерено ускорение вещества внутри хромосферных спикул.

Определён интегральный уровень мягкого рентгеновского излучения (энергия выше 1 кэВ) Солнца в минимуме активности. Он составил $4,7 \times 10^{-10}$ Вт/м², что в 20 раз ниже уровня чувствительности аппаратуры GOES.

За 9 месяцев наблюдения зарегистрировано 800 солнечных микровспышек с мощностью рентгеновского излучения на орбите Земли порядка 10 Вт/м².

Модифицирована шкала рентгеновских вспышек. В дополнение к классам А, В, С, М и Х введены два новых класса: S и Q, к первому из которых относятся вспышки с мощностью от 0,1 до 1 нановатта на м², ко второму – от 1 до 10 нановатт на м². На основании спектроскопических данных прибора SphinX измерена средняя температура короны в минимуме цикла солнечной активности. Она составила $1,81 \pm 0,05$ МК.

Прибор «ФОКА». Получены абсолютные значения потоков от спокойного Солнца в диапазонах 0,5 ... 7 и 27 ... 37 нм. Эти данные являются исходными для анализа физико-химической кинетики верхних слоёв атмосферы. Поглощение ультрафиолетового излучения спокойного Солнца верхними слоями атмосферы, измеренное при заходе спутника в тень Земли или выхода из неё, позволило отработать методику измерения плотности атмосферы Земли на высотах от 50 до 350 км.

На основании оккультационных измерений поглощения солнечного жёсткого ультрафиолета получены высотные профили плотности верхних слоёв атмосферы Земли (50 – 350 км) в период длительного полного отсутствия солнечной активности.

Приборы «Пингвин-М», RT-2 и «КОНУС». Показано, что в слабых вспышках (баллов B и C), наряду с тепловой компонентой рентгеновского излучения, всегда присутствует и нетепловая компонента.

Интенсивность регистрирующих излучений разных энергий на основании данных с приборов для нескольких вспышек изучена как в тепловой, так и в нетепловой областях. В одной из вспышек, по данным прибора, обнаружены квазипериодические осцилляции интенсивности излучения в жёстком рентгене.

Впервые обнаружена продольная линейная поляризация жёсткого рентгеновского излучения ($>15\%$) в сравнительно слабой вспышке (балла C 1,3), предыдущие измерения относились ко вспышкам класса X .

Прибор «Электрон-М-Песка». В минимуме цикла солнечной активности наблюдались значительные (более чем на порядок) возрастания потоков электронов во внешнем РПЗ на высоте 550 км, связанные с приходом высокоскоростных потоков солнечного ветра. На основании анализа данных предположительно, что наблюдавшееся возрастание потоков релятивистских электронов обусловлено усилением волновой активности.

По измерению потоков электронов с энергией выше 200 КэВ в высокоширотных областях обнаружено, что более чем в половине случаев пересечения внешней границы внешнего радиационного пояса наблюдались возрастания потоков электронов данных энергий, имеющие сложную структуру. Значительная часть зарегистрированных возрастаний потоков электронов наблюдалась при трёх и более последовательных пересечениях орбитой спутника полярного края внешнего радиационного пояса, что свидетельствует о возможности сравнительно длительного существования указанных структур (в течение 3 – 6 ч) при относительно небольших изменениях положения максимума и структуры потока частиц.

Прибор «СТЭП-Ф». В августе 2009 г. практически полностью отсутствовала солнечная активность. Однако потоки энергичных электронов в земной магнитосфере, регистрируемые приборами «СТЭП-Ф» на высоте полёта КА «КОРОНАС-ФОТОН» были переменны. Более того, повышения интенсивности и микровсплески потоков электронов в десятки и тысячи раз с энергиями до 0,5 МэВ наблюдались в тех зонах магнитосферы, где их не должно быть, а именно на низких широтах и вблизи экватора, в областях, далеко отстоящих от Бразильской магнитной аномалии. Девятого августа в промежутке времени между 9 и 11 по всемирному времени наблюдались несколько кратковременных и одно длительное повышение потоков электронов с энергиями 0,18 – 0,51 МэВ. Отсутствие

солнечной активности в августе 2009 г. и заметное усиление сейсмической активности (только за период 9 – 11 августа произошло 4 землетрясения с магнитудой 6 и более баллов) позволили сделать предположение: нестационарные потоки электронов с энергиями до 1 МэВ, наблюдавшиеся 9 августа, могли быть связаны с «подготовкой» землетрясения с магнитудой $M = 7,1$ в 10 ч 56 мин по всемирному времени с координатами 33° с. ш. и 138° в. д. (вблизи Японии). При этом высыпания частиц начинаются за 70 и ранее минут и длятся до самого землетрясения. «Эхо» землетрясения проявляется ещё некоторое время вплоть до восстановления устойчивого равновесия частиц в поясах.

Аппаратура «КОНУС-РФ». Зарегистрированы и исследованы ряд космических гамма-всплесков и всплесков от мягких гамма-репитеров. Первое гамма-всплесковое событие было зарегистрировано аппаратурой «КОНУС-РФ» 27 февраля 2009 г. от аномального рентгеновского пульсара SGR/AXJPEI547.0-5408 и подтверждено данными эксперимента «КОНУС-ВИНД». Результаты синхронных наблюдений в экспериментах «КОНУС-РФ» и «КОНУС-ВИНД» позволили зарегистрировать и детально исследовать исключительно интенсивный гамма-всплеск 8 апреля 2009 г. Наиболее важным научным результатом эксперимента «КОНУС-РФ» явилось открытие нового гамма-репитера SGRJ0418+5729. Данные аппаратуры «КОНУС-РФ» сыграли решающую роль в этом открытии: они позволили получить с максимальной детальностью временные профили первых двух всплесков и на их основе по данным наземной обработки данных телескопа «БАТ-СВИФТ» новый репитер был локализован.

Привлечение данных спутника RXTE привело к определению периода его постоянного излучения в области мягкого рентгеновского излучения.

Функциональная схема взаимодействия организаций при целевом использовании информации КА «КОРОНАС-ФОТОН» показана на рис. 4.

Наблюдение природного явления – солнечного затмения в космосе. КА «КОРОНАС-ФОТОН». Российская обсерватория «Тесис» (ФИАН) передала на Землю наблюдения солнечного затмения, сделанные 22 июля 2009 г. Благодаря особенности орбиты КА рентгеновские телескопы обсерватории увидели затмение дважды. Первый раз спутник прошёл через область затмения в 4:30 по московскому времени, а ещё через 4 ч телескопы сняли второе, наиболее глубокое прохождение Луны по Солнцу.

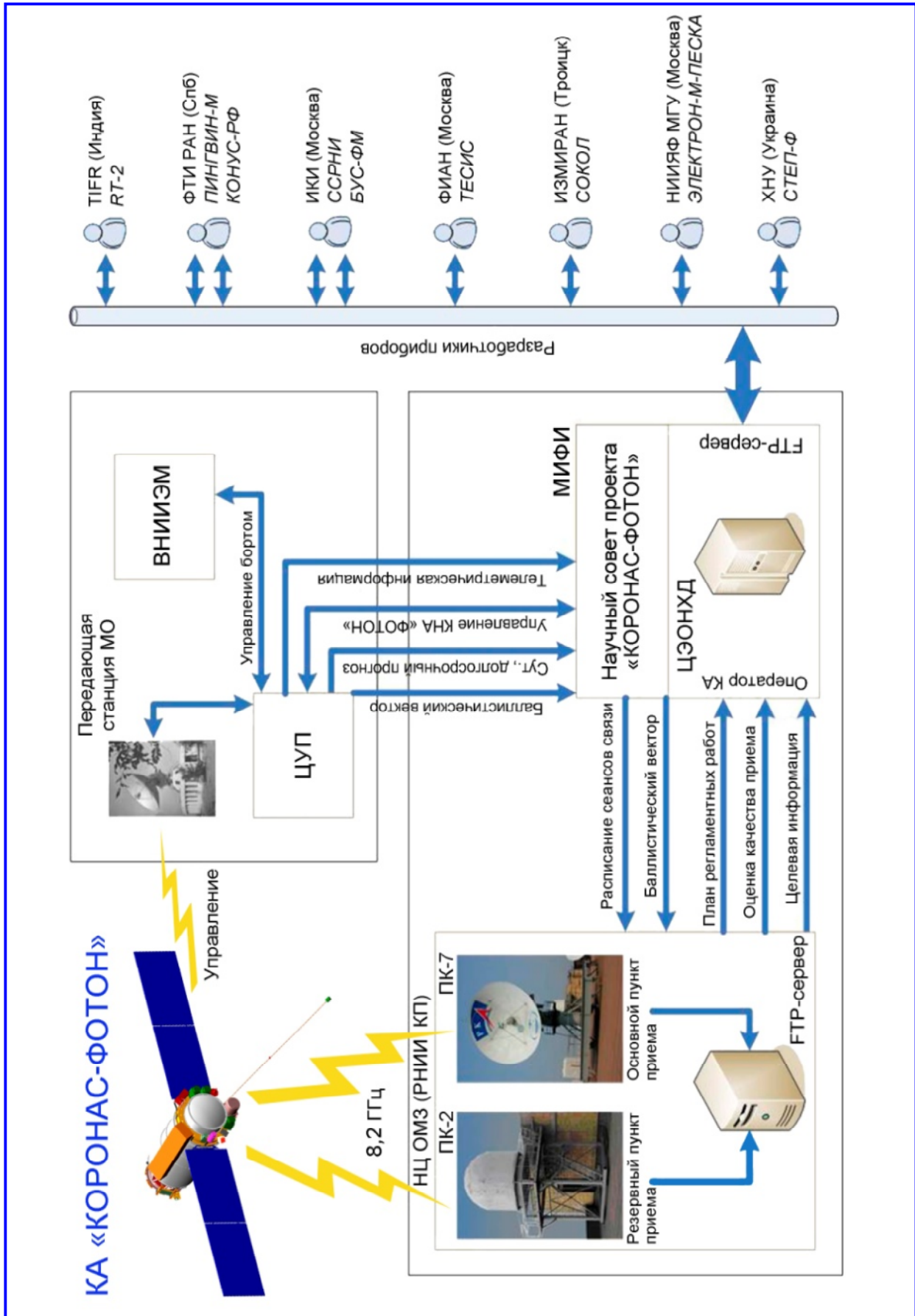


Рис. 4. Функциональная схема взаимодействия организаций при целевом использовании информации КА «КОРОНАС-ФОТОН»

Затмение стало испытанием не только для ученых (человеческий фактор), но и для системы ориентации КА, основным элементом которой являлись датчики Солнца. Именно во время полного солнечного затмения был потерян предыдущий солнечный спутник Японии YohRoh в результате полной разрядки аккумуляторной батареи (АБ) аппарата, до этого работавший на орбите более 10 лет.

Ранним утром 22 июля 2009 г. около часа по всемирному времени (5 ч утра по Москве) в одной точке небесной сферы сошлись траектории Луны и Солнца, и на поверхность Земли на территории Индии упала лунная тень. Затмение этого года было уникально по продолжительности. В его максимальной точке Земля погрузилась в темноту на 6 мин 39 с.

Однако до того, как лунная тень коснулась поверхности Земли, она прошла по объектам, находящимся в космосе. Именно спутники стали первыми свидетелями приближения тени Луны из глубины космоса к нашей планете, а также последними, кто проводил её уже после того, как она покинула поверхность Земли.

Затмение 22 июля 2009 г. смогли наблюдать только две из шести работающих в тот момент солнечных обсерваторий: российский спутник «КОРОНАС-ФОТОН» с комплексом телескопов «Тесис» и космический телескоп XRT на спутнике HINODE (Япония).

Во время этого затмения каждый из указанных спутников, в силу сложившихся обстоятельств на орбите, прошёл через тень дважды.

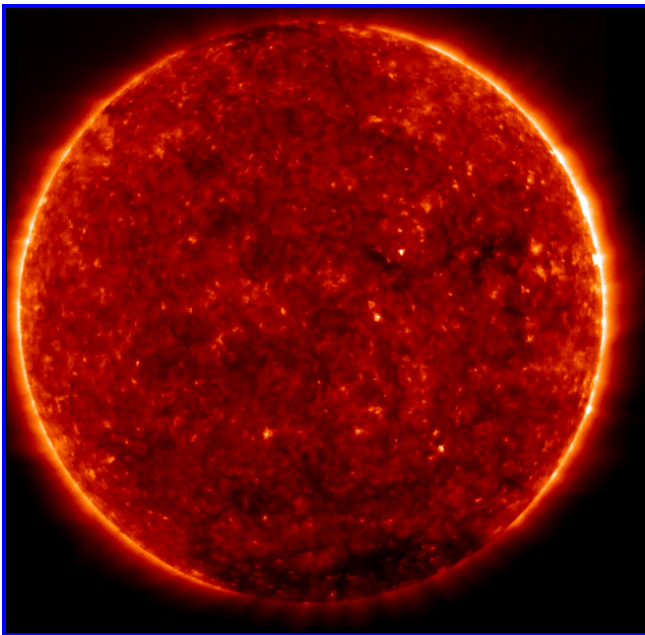


Рис. 5. Нижняя солнечная корона. Температура плазмы около 1 млн град. по Цельсию. Фото Лаборатории рентгеновской астрономии Солнца Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Первым из двух аппаратов, и вообще первым на нашей планете затмение Солнца увидел «Тесис».

В 04:30 по всемирному времени (8:30 по Москве) «Тесис» прошел почти по самому центру уже уходящей от Земли тени. Расстояние между центрами Луны и Солнца в точке максимального сближения составило только 0,07 град.

Заключение. На всём протяжении активного функционирования КА все научные приборы, входящие в комплекс научной аппаратуры, оставались работоспособными. За время полёта было собрано 380 Гб научной информации.

Первые снимки Солнца были сделаны 20 февраля 2009 г. во время пробного включения установленных на КА «КОРОНАС-ФОТОН» приборов. Телескопы «Тесис» сфотографировали нижнюю солнечную корону, переходный слой и дальнюю корону Солнца. Все изображения получены в рентгеновском диапазоне, что невозможно сделать на Земле, так как рентгеновское излучение почти полностью поглощается атмосферой. Фотографии же различных частей нашей звезды необходимы ученым для того, чтобы понять, как изменяется температура на Солнце.

Далее опубликован один из первых снимков Солнца, полученных КА «КОРОНАС-ФОТОН» (рис. 5).

Из-за того, что время активного функционирования аппарата пришлось на период спокойного Солнца, аппаратом не было зафиксировано крупных энергичных вспышек, поэтому часть научной аппаратуры так и не была использована в полной мере. В это же время целый ряд приборов показал уникальные результаты. В частности, прибор SphinX зафиксировал микровспышки в УФ-диапазоне, которые до сих пор не удавалось зафиксировать на других КА. С помощью телескопов были изучены короткоживущие активные структуры на поверхности Солнца, прибором «Электрон-М-Песка» были составлены подробные карты поясов заряженных частиц на орбите Земли. Прибором «КОНУС-РФ» зафиксированы несколько гамма-всплесков и репитеров. Успешно проведены измерения вспышек в мягком рентгеновском диапазоне прибором «Пингвин-М», а в УФ – прибором «ФОКА».

В частности, прибором «ФОКА» проведены измерения солнечного ультрафиолета через атмосферу Земли, что позволяет провести анализ состава и особенностей верхней атмосферы Земли. Ценная информация получена на индийском приборе RT-2 и украинском приборе «СТЭП-Ф».

На протяжении полёта с оперативностью 15 мин с момента сброса данных с борта информация с приборов «ФОКА» и «Пингвин-М» передавалась в Росгидромет, ежедневно туда направлялись изображения диска Солнца прибором «Тесис».

Эта информация использовалась до запуска КА «Метеор» для прогнозирования магнитных бурь на Земле.

Литература

1. Космический комплекс «КОРОНАС-ФОТОН». Справочные материалы. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – 102 с.

2. Солнечная система: Космический аппарат «КОРОНАС-ФОТОН». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stp.cosmos.ru/index.php id>.

3. Солнечные затмения в космосе, обсерватории «КОРОНАС-ФОТОН». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://galspace.spb.ru/nature.file/24079.html>.

Поступила в редакцию 10.12.2018

Сергей Николаевич Волков, доктор технических наук, 1-й заместитель генерального директора, т. (495) 366-42-56.

Александр Викторович Горбунов, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, т. (495) 623-41-81, e-mail: gor@hq.vniiem.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Рашид Салихович Салихов, кандидат технических наук, заместитель генерального директора

(АО «НИИЭМ»).

Владимир Павлович Ходненко, доктор технических наук, главный научный сотрудник, т. (495) 624-94-98.

E-mail: vniiem@orc.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

KORONAS-PHOTON PROJECT

**S. N. Volkov, A. V. Gorbunov,
R. S. Salikhov, V. P. Khodnenko**

The article considers the history of development and implementation of fundamental solar research program. At present the impact of solar activity on a great number of processes taking place on the Earth and directly affecting the living conditions and health of people has been realized not only by specialists, but also by a majority of the population of our planet. The priority is placed on the problem of potential climate change (warming) in the long run (on a scale of hundreds and thousands of years) and thereto related short-term prediction (on a decade scale). The reason of climate change has not been found until now. Two reasons are considered: firstly the change of medium magnitude of solar radiation over the duration of a century and secondly anthropogenic reason, i.e. the change in radiation balance of the atmosphere due to the greenhouse effect. An exact knowledge of the degree of each of these factors influence on the climate change directly conditions the global measures to be taken by mankind. The article provides the general characteristics and objectives of KORONAS-PHOTON Project along with the list of participants thereof.

The objectives of KORONAS-PHOTON space system, the performance specifications and components of the spacecraft of the same name, as well as the objectives of experiment are provided in the article. The scientific hardware components and their tasks and designations are described.

The article presents the programs of work and the main results of research received by KORONAS-PHOTON spacecraft which has become a unique Russian special-purpose scientific satellite of the beginning of the century. The latter explains a quite detailed presentation of various aspects of conducted research activities provided in the article.

Key words: spacecraft, fundamental research, solar activity, scientific hardware, power supply system, solar flares, gamma radiation, radiation spectrum, high-energy X-rays.

References

1. KORONAS-PHOTON space system. Reference materials. – Moscow : FGUE NPP VNIEM, 2008. – 102 p.

2. Solar system: KORONAS-PHOTON spacecraft. [Electronic resource]. – Available at: <http://stp.cosmos.ru/index.php id>.

3. Solar eclipses in space, KORONAS-PHOTON observatories. [Electronic resource]. – Available at: <http://galspace.spb.ru/nature.file/24079.html>.

Sergei Nikolaevich Volkov, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), First Deputy Director General, tel.: +7 (495) 366-42-56.

Aleksandr Viktorovich Gorbunov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Deputy Director General, tel.: +7 (495) 623-41-81, e-mail: gor@hq.vniiem.ru.

(JC «VNIEM Corporation»).

Rashit Salikhovich Salikhov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Deputy Director General

(JSC NIEM).

Vladimir Pavlovich Khodnenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Chief Researcher,

tel.: +7 (495) 624-94-98, e-mail: vniiem@orc.ru.

(JC «VNIEM Corporation»).