

**Учреждение Российской академии наук
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н.ЛЕБЕДЕВА РАН**

На правах рукописи
УДК 523.9:520.624

ПЕРЦОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**Бортовые аппаратно-программные комплексы для
долговременных космических экспериментов по
исследованию коротковолнового излучения Солнца.**

Специальность 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2008 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН

Научный руководитель:

Доктор ф.-м. наук,

А.М. Урнов

Научный консультант:

Доктор ф.-м. наук,

И.А. Житник

Официальные оппоненты:

Доктор ф.-м. наук, профессор

В.Г. Курт (АКЦ ФИАН)

Кандидат ф.-м. наук

А.С. Гляненко (МИФИ)

Ведущая организация: Институт космических исследований РАН.

Защита состоится 22 декабря 2008 на заседании диссертационного совета Д 002.023.02 в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН (Москва, 119991, Ленинский проспект 53, гл. здание)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н.Лебедева РАН по вышеуказанному адресу.

Автореферат разослан «_____» ноября 2008.

Ученый секретарь диссертационного совета,

Доктор физико-математических наук

Я.Н. Истомин

Общая характеристика работы:

Актуальность работы. Диссертация посвящена разработке и созданию бортового аппаратного и программного обеспечения космических долговременных экспериментов по исследованию коротковолнового излучения Солнца методом изображающей спектроскопии. Рентгеновское и ВУФ излучение Солнца формируется в солнечной короне и содержит разнообразную информацию о плазменных структурах, связанных с конфигурациями магнитных полей, и их динамике. Актуальность работы связана с актуальностью проблем физики солнечной атмосферы и солнечно-земных связей. До настоящего времени остаются нерешенными ряд фундаментальных проблем физики Солнца, такие как: механизм нагрева солнечной короны и ускорение солнечного ветра, природа выделения и трансформации энергии в солнечных вспышках и других эруптивных процессах. Солнечная корона представляет большой интерес как объект физического исследования благодаря сложной структуре (активные области, корональные дыры, яркие точки и др.) и явлениям активности (вспышки, выбросы корональных масс, взрывные протуберанцы и т.п.). Развитие этих явлений, связанное с нестационарными процессами перехода магнитной энергии в другие ее виды, является также характерными для многих астрофизических объектов. Природа этих явлений остается, в значительной степени непознанной. Помимо этого Солнце является уникальным источником информации о спектрах и характеристиках процессов возбуждения многозарядных ионов.

Ответы на вопросы фундаментального характера, в частности, о природе явлений солнечной активности дают ключ к решению прикладных задач солнечно-земных связей. К таким задачам относятся: прогнозирование земных явлений и состояние т.н. «космической погоды», непосредственно связанное с солнечной активностью, обеспечение безопасности космических полетов и надежности космических аппаратов и многие другие.

Внеатмосферные исследования рентгеновского излучения Солнца были впервые проведены в конце 40х годов в США. В СССР подобные эксперименты с использованием космических аппаратов были начаты в конце 50-х годов прошлого века в лаборатории спектроскопии Физического института им. П.Н.Лебедева Академии Наук СССР по инициативе профессора С.Л.Мандельштама. К середине 70-х г.г. было подготовлено и проведено более 25 космических экспериментов, в том числе на 15 высотных геофизических ракетах и 7 специализированных солнечных спутниках серий “Космос” и “Ин-

теркосмос”. Исследования в СССР развивались в значительной мере параллельно с работами, проводимыми в США, а затем и в Англии, взаимно дополняя и развивая друг друга. Успешное развитие исследований рентгеновского излучения Солнца в первые 15 лет космической эры стало возможным в нашей стране благодаря высокому уровню экспериментальной и теоретической спектроскопии, достигнутой в ФИАНе. На основе результатов исследований рентгеновского излучения Солнца на первом этапе, изучения принципиальных возможностей оптических схем для наиболее информативной для диагностики плазмы область длин волн $8 - 335 \text{ \AA}$ и разработки новой элементной базы рентгеновской оптики были сформулированы методы решения научных задач в космических экспериментах на солнечных космических станциях. Одним из таких методов - метод рентгеновской изображающей спектроскопии полного Солнца заключается в одновременном получении изображений и спектров Солнца с высоким угловым и спектральным разрешением в узких участках спектра и монохроматических линиях рентгеновского и ВУФ диапазона, характеризующих различные температурные слои солнечной плазмы. Этот метод был использован при разработке аппаратуры для последующих экспериментов на межпланетной станции «Фобос-1» (1988 г.), на солнечных станциях КОРОНАС-И (1994г.) и КОРОНАС-Ф (2001 – 2005 г.г.). Наиболее значительный вклад в изучение верхней атмосферы Солнца был сделан в эксперименте СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф. Целью эксперимента являлось исследование пространственно-временной структуры явлений солнечной активности с помощью комплекса рентгеновских инструментов. Для эксперимента СПИРИТ в ФИАНе был разработан не имеющий мирового аналога комплекс аппаратуры, который позволял получать одновременно спектральные (в 10 каналах) и монохроматические (в 160 спектральных линиях) рентгеновские изображения всего Солнца с высоким спектральным, пространственным и временным разрешением. Проведение таких наблюдений потребовало применение новых наукоемких технологий как в области разработки электронно-оптических устройств нового типа, так и в области создания автономных комплексов управления и обработки информации.

Целью диссертации является разработка, испытание и создание бортовых аппаратно-программных комплексов управления (АПКУ) длительными внеатмосферными экспериментами по исследованию коротковолнового излучения Солнца и их использованию для получения временных рядов спектральных изо-

бражений солнечной атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением.

Объектом исследования космических экспериментов является плазма солнечной короны.

Предметом исследования является рентгеновское и ВУФ излучение Солнца.

Задачи диссертации. Для достижения основной цели – создания аппаратно-программного комплекса управления (АПКУ) солнечными космическими экспериментами, в диссертации были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка и создание координатно-чувствительных приемников рентгеновского излучения высокого пространственного и временного разрешения, предназначенных для длительного автономного использования на космических аппаратах.
2. Разработка принципов организации и планирования наблюдений и методов управления комплексом приборов на борту космических аппаратов: «Фобос-1», «Коронас-И» и «Коронас-Ф».
3. Разработка и создание системы управления оптическими и электронными узлами всего комплекса бортовой аппаратуры, предназначенной для:
 - Накопления и первичной обработки научной информации.
 - Управления узлами бортовых научных приборов.
 - Обработки, анализа, сжатия и упаковки научной информации.
 - Поиска физических событий.
 - Реализации адаптивных режимов работы.
 - Сбора служебной информации.
 - Обеспечения работы в нештатных ситуациях.
4. Лабораторное тестирование и калибровка бортовой аппаратуры.

Диссертация содержит описание АПКУ для бортовой аппаратуры на КА «Фобос-1», Коронас-И, Коронас-Ф и результаты ее использования в экспериментах ТЕРЕК, ТЕРЕК-К/РЕС-К и СПИРИТ.

Научная новизна работы состоит в постановке и решении задач создания нового типа АПКУ долговременных солнечных космических экспериментов. Новыми также являются следующие результаты, полученные в работе:

1. Создан ряд координатно-чувствительных рентгеновских приемников нового типа с динамическим диапазоном до 10^4 с высоким пространственным (до 5 секунд дуги) и временным (5 сек) разрешением.

2. Впервые разработаны принципы организации и планирования долговременным космическим экспериментом по наблюдению рентгеновского излучения Солнца.
3. Созданы новые методы бортового управления комплексом приборов и потоками научной информации.
4. Впервые реализованы многочисленные, в том числе адаптивные, режимы работы космической аппаратуры.
5. Созданы и реализованы новые бортовые алгоритмы сжатия, обработки и упаковки информации в условиях информационных сбоев.

Научная и практическая ценность работы определяется актуальностью тематики в области как фундаментальных, так и прикладных исследований. Применение разработанных комплексов, позволило реализовать метод изображающей спектроскопии в долговременных экспериментах на космических аппаратах: «Фобос-1» (1988 г.), КОРОНАС-И (1994 г.) и КОРОНАС-Ф (2001 – 2005 г.г.). В результате проведения экспериментов ТЕРЕК, ТЕРЕК-К/РЕС-К и СПИРИТ, был накоплен уникальный банк научных данных: рентгеновских и ВУФ монохроматических и спектральных изображений всего Солнца и солнечной короны до 3х солнечных радиусов общим объемом более 10 ГБ информации (около 300 тыс. отдельных изображений). Эта база данных может быть использована в многих российских и иностранных научно-исследовательских центрах, таких как: ИКИ, ИЗМИРАН, ГАИШ, ННИЯФ МГУ, ГАО и др. Полученные данные позволили обнаружить новый класс явлений солнечной активности и провести детальное определение параметров динамики явлений в горячей плазме солнечной короны. В частности, впервые наблюдались и были исследованы крупномасштабные долговременные события в солнечной короне («*науки*»), впервые исследована пространственная структура импульсных вспышечных событий. По результатам наблюдений впервые были получены распределения электронной температуры и плотности в активных областях и вспышках. Впервые получены новые данные о спектрах многозарядных ионах корональной плазмы.

Разработанные в диссертации принципы построения, технические решения и методы, являются основой и применены для создания нового поколения космической аппаратуры (эксперимент ТЕСИС на КА КОРОНАС-ФОТОН). Широкополосные приемники изображения, созданные на принципах разработанных автором, широко используются в качестве лабораторных приемников рентгеновского изображения и в нейтронной томографии.

Апробация работы. Результаты работы, составившие основу диссертации, опубликованы в 19 рецензируемых журналах и были представлены на отечественных и зарубежных конференциях:

VII Всесоюзной конференция ВУФ-86, Латвия 1986г, VIII Всесоюзной конференция ВУФ-89, Иркутск 1989 г.; симпозиум "Прикладная оптика-94", Санкт-Петербург 1994 г., совещание "Рентгеновская оптика – 2002, Н. Новгород 2002 г; конференция «Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности», Н.Новгород 2003 г; конференция посвященная 90-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР В.Е.Степанова, Иркутск 2003 г, ИСЗФ СО РАН; Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2004 «Горизонты Вселенной», МГУ, ГАИШ, 2004 г.; конференция “КОРОНАС-Ф: три года наблюдений активности Солнца 2001-2004 гг.”, ИЗМИРАН, Троицк Московской обл. 2005 г; 10th European Solar Physics Meeting, Praha, Czech Republic, 2002, 34th COSPAR Scientific Assembly, Houston, USA, 2002; 35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, France, 2004; Международная конференция "Физика Солнца", Крым, п. Научный, КРАО, 2006 г. и других.

Результаты были также апробированы на семинарах в следующих научных центрах:

Физическом институте РАН, Институте космических исследований РАН, ГАО (Пулково), Парижской обсерватории (Франция) и других.

Основные результаты, представленные в 19 работах, приведены в конце автореферата в хронологическом порядке.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработаны и созданы двухкоординатные детекторы формата до 1024x1152 элементов с однофотонной чувствительностью в диапазоне $\lambda < 10$ нм. для регистрации изображений в автономных долговременных космических экспериментах. С помощью таких детекторов получены изображения солнечной атмосферы размером до 3х радиусов Солнца с пространственным разрешением до 5 секунд дуги.
2. Разработаны методы бортового управления комплексами космических приборов в экспериментах ТЕРЕК, ТЕРЕК-К/РЕС-К и СПИРИТ на КА «Фобос-1», Коронас-И и Коронас-Ф, позволили получить изображения всего Солнца одновременно в 4х различных спектральных каналах коротковолнового излучения с временным разрешением до 4 сек.

3. Созданный аппаратно-программный комплекс управления (АПКУ), обеспечил получение за 4,5 года непрерывной безаварийной работы до 10 ГБ научной информации о строении и динамике солнечной атмосферы.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трех глав и заключения. Общий объем 86 страниц, включая 22 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 97 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации, общую постановку проблемы, формулировку цели и предмета исследования, новизны полученных результатов и их научной и практической ценности и основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу эволюции координатно-чувствительных приемников рентгеновского и ВУФ излучения Солнца, использовавшихся ранее и применяемые в настоящее время в космических экспериментах: фотопленки, ПЗС матрицы с преобразованием рентгеновского излучения, ПЗС матрицы с усилителем яркости, ПЗС матрица непосредственной регистрации прямой и обратной засветки. Приведены сравнительные характеристики типов приемников, показаны их достоинства и недостатки.

В разделе 1.2 приведено описание приемников мягкого рентгеновского излучения, разработанного автором для эксперимента ТЕРЕК проекта «Фобос-1». ПЗС рентгеновские детекторы проекта «Фобос-1» являлись первыми приемниками мягкого рентгеновского излучения, основанными на малокадровых ПЗС матрицах формата 256x144 элемента, работавшие в условиях длительного космического эксперимента.

В разделе 1.3 дано описание, технические характеристики, результаты калибровочных испытаний координатно-чувствительных приемников рентгеновского излучения форматом 1024x1152 элементов, разработанных автором для комплекса ТЕРЕК-К/РЕС-К проекта КОРОНАС-И. Приведены примеры изображений Солнца в мягком рентгеновском диапазоне спектра, дана оценка чувствительности, амплитудного и пространственного разрешения на примере реальных изображений Солнца в различных рентгеновских диапазонах спектра.

В разделе 1.4 приведено описание, технические характеристики, результаты калибровочных испытаний координатно-чувствительных приемников рентгеновского излучения форматом 1024x1152 элементов открытого типа (канал

MgXII) и приемников, использующих усилители яркости на основе «открытой» МКП в качестве конвертера изображения, разработанных автором для комплекса СПИРИТ проекта КОРОНАС-Ф. Приемники рентгеновского излучения проекта КОРОНАС-Ф представляют собой полностью функционально законченный узел, выполненный на цифровом сигнальном процессоре (DSP). Управление приемником изображения и прием информации с него производится при помощи обмена сообщениями и командами высокого уровня, что дает возможность создать сложную масштабируемую систему, с возможностью реализации разнообразных режимов работы. Кроме того, такая идеология построения приемников изображения позволила получить высокую чувствительность при высокой помехозащищенности. Приведены примеры изображений Солнца в мягком рентгеновском диапазоне спектра в различных спектральных каналах. Дана оценка чувствительности, амплитудного и пространственного разрешения на примере реальных изображений Солнца в различных рентгеновских диапазонах спектра. Продемонстрирована возможность работы приемников при работе в режимах с большим временным разрешением.

В **Главе 2** рассматриваются принципы и методы построения и управления долговременными комплексными экспериментами по наблюдению солнечной атмосферы в рентгеновском диапазоне спектра на борту космических аппаратов (АПКУ). Показана эволюция АПКУ от эксперимента ТЕРЕК на автоматической межпланетной станции «Фобос-1» (1988 г.) до эксперимента СПИРИТ на искусственном спутнике Земли КОРОНАС-Ф (2001 г.), в проектировании, изготовлении и эксплуатации которых автор диссертации принимал непосредственное участие.

Основными задачами при проектировании АПКУ являлось:

- а. Обеспечение работоспособности всех узлов и подсистем комплекса научной аппаратуры в жестких условиях космического полета при разнообразных режимах работы.
- б. Вследствие ограниченной пропускной способности системы телеметрии необходимо реализовать режимы сжатия и обработки научной информации, которые обеспечивают получение только «качественной» с научной точки зрения информации.
- в. Из-за крайне малого объема информации, которую можно передать на прибор во время космического полета, необходима разработка и реализация эффективной системы управления долговременным экспериментом. Вследствие

низкой оперативности необходимо предусмотреть возможность полностью автономной работы на период продолжительностью до нескольких суток.

В разделе 2.1 описывается комплекс и методика управления экспериментом ТЕРЕК на АМС «Фобос-1». Станция «Фобос-1» создавалась в период (1983-1988 гг.), когда применение микропроцессорной техники в космических экспериментах для бортового управления и обработки информации находилось на начальном уровне. Кроме того, в долговременном космическом эксперименте впервые в качестве приемника рентгеновского излучения использовалась ПЗС матрица. На космическом аппарате «Фобос-1» использовалась весьма малоинформативная по современным меркам система управления и сбора телеметрических параметров. Объем переданный за сутки на Землю телеметрической информации составлял 200-300 КБ, при этом суточная квота управляющих команд не превосходил 50 байт. Исходя из вышесказанного, аппаратно-программный комплекс управления экспериментом ТЕРЕК проекта «Фобос-1» (АПКУ ТЕРЕК) представлял собой жесткий автомат, управление которым было возможно только путем непосредственного изменения малого числа входных параметров (экспозиция, коэффициент усиления электронно-оптических преобразователей).

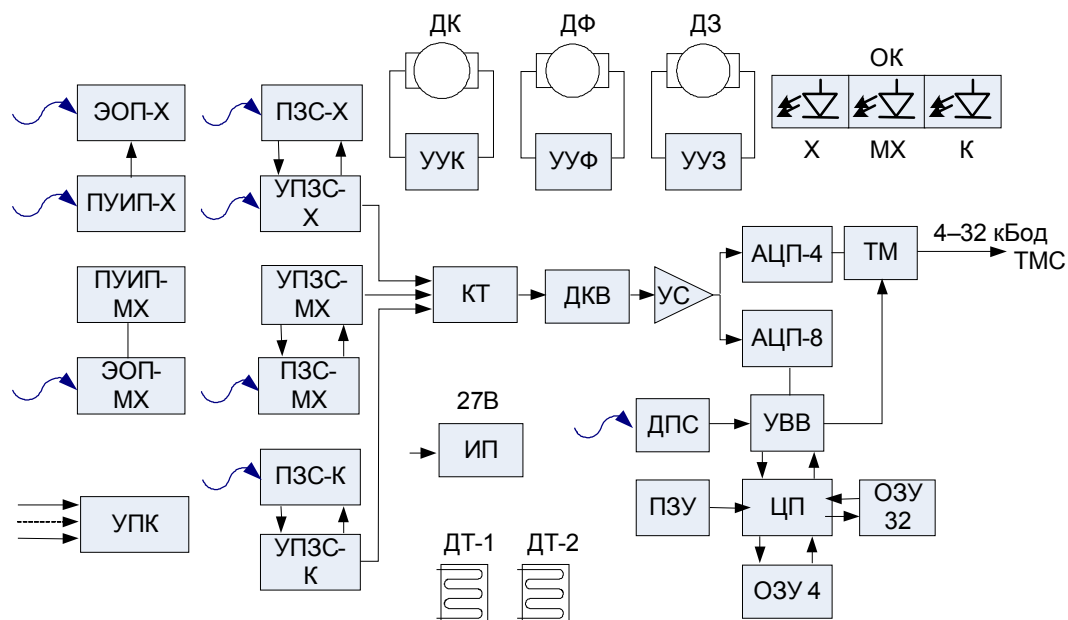


Рис 1. Блок-схема АПКУ ТЕРЕК.

Микропроцессорный блок обработки мог быть подключен по специальной команде и непосредственно в управлении не участвовал. Отдельной задачей стало создание наземной компьютерной системы визуализации, обработки и хранения полученной информации.

В разделе 2.2 приведено описание принципов функционирования аппаратно-программных комплексов управления экспериментами ТЕРЕК-К (рентгеновский телескоп) и РЕС-К (рентгеновский спектрогелиометр) на искусственном спутнике Земли КОРОНАС-И (АПКУ-КИ) (годы разработки: 1988-1994) созданных автором диссертации. АПКУ-КИ представляет собой полноценный интеллектуальный микропроцессорный комплекс управления с возможностью первичной обработки информации. Описываемый аппаратно-программный комплекс является примером построения космической аппаратуры, где центральным и основным элементом электронной схемы прибора является микропроцессор, допускающий применения в условиях космического полета. В АПКУ-КИ в качестве центрального процессора использовался один из немногих доступный на тот момент, 8-ми разрядный КМОП микропроцессор (CPU) типа 1821BM85 с быстродействием 0,5 MIPS (миллионов команд в секунду). Микропроцессорный блок размещался внутри гермоотсека КА и управлял всеми периферийными модулями телескопа ТЕРЕК-К и спектрометра РЕС-К как отвечающих за связь с бортовыми системами КА, так и внутренними – приемниками изображений, механическими приводами. Из-за низкого быстродействия CPU было невозможно реализовать алгоритмы сжатия информации, поэтому обработка полезной информации заключалась в упаковке информации в массивы совместимые по формату с бортовыми системами сбора информации (ССНИ), с возможностью объединения информации (биннинг) в области 2x2 или 4x4 ячейки. В АПКУ-КИ было применено независимое «холодное» резервирование блоков, отвечающих за «жизнеспособность» всего АПКУ-КИ: центрального процессорного блока, низковольтного источника питания, интерфейса обмена информацией с бортовой телеметрической системой. Для проведения всего объема работ по разработке, отладке и тестированию АПКУ в комплексе с большим объемом автономного программного обеспечения автором был разработан и отлажен комплекс аппаратно-программных средств.

В разделе 2.3 рассматривается комплекс управления экспериментом СПИРИТ, функционировавший на борту космического аппарата КОРОНАС-Ф в 2001-2005 гг (АПКУ-КИ). Комплекс СПИРИТ состоял из двух приборов: рентгеновского телескопа СРТ-К и рентгеновского спектрогелиометра РЕС-К, АПКУ которых были идеологически идентичны и отличались только количеством и типом использованных детекторов изображений и количеством механических узлов.

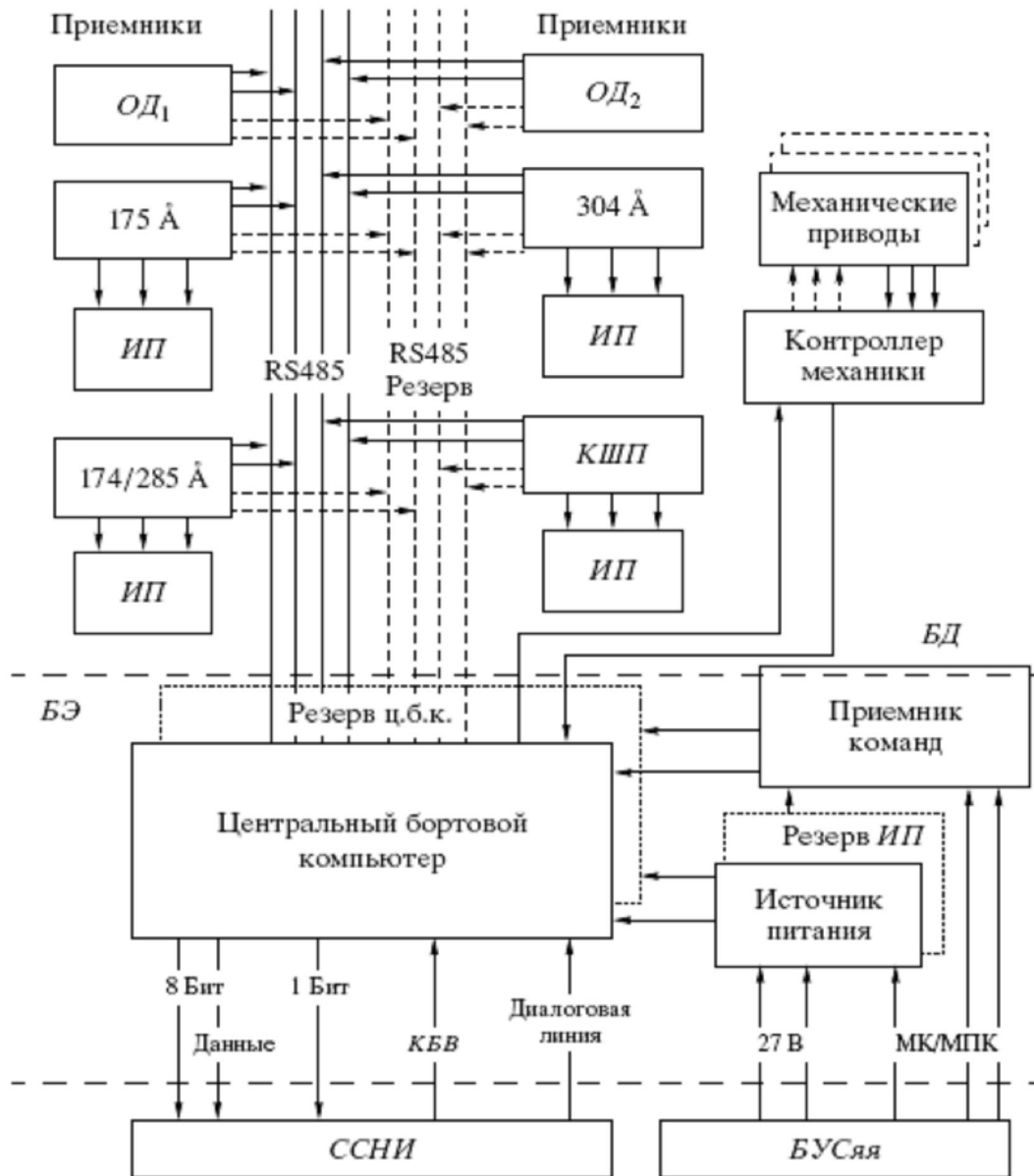


Рис 2. Блок-схема АПКУ-КИ

Основой АПКУ являлся 16-ти разрядный цифровой сигнальный процессор (DSP) семейства ADSP21XX фирмы Analog Devices (ADSP2181 с быстродейст-

вием 33MIPS). DSP этого семейства (ADSP2105 с быстродействием 16MIPS) также использовался в приемниках изображения всех каналов комплекса СПИРИТ, что дало возможность унифицировать аппаратно-программные средства разработки, отладки и контроля работоспособности АПКУ и детекторов изображения. Управление приемниками изображения и считывание производилось по последовательным каналам связи, причем приемники были разделены на две независимые группы:

СРТ-К		РЕС-К	
Группа 1	Группа 2	Группа 1	Группа 2
304	170	XUV-1	XUV-2
171,195,284,304	КШП	MgXII-1	MgXII-2
ОД1	ОД2	FeXXV	

Таблица 1 Распределение приемников по группам.

Быстродействие центрального процессора, выбранная методика работы АПКУ-КФ, схемотехнические решения дали возможность реализовать режим одновременной и независимой работы любых двух приемников изображений из разных групп. Это также дало возможность организовать независимый режим работы всех интерфейсных узлов (приемники команд, интерфейсы передачи информации на ССНИ, интерфейс приемника реального времени (КБВ), интерфейсы управления механическими узлами) на фоне выполнения основной задачи по накоплению, обработки и сжатию полезной информации. Объем буферной памяти АПКУ-КФ по сравнению с АПКУ-КИ возрос до 32 МБ, что наряду с многократным возросшим быстродействием центрального процессора позволило реализовать алгоритмы сжатия информации в реальном времени. Длительность считывания одного полного (1024x1152 элементов) кадра информации составляло 2,5 сек, время упаковки в формат, необходимый для передачи в ССНИ без сжатия, не превосходило 1,5 сек, время упаковки со сжатием информации составляло около 4 сек., что мало по сравнению с характерными временами экспозиции (10 сек.) и не отнимало полезного времени наблюдения.

Управление АПКУ-КФ производится по двум независимым каналам связи: при помощи релейных команд (программные команды «ПК» и многоадресные программные команды «МПК») поступающих на АПКУ из служебных систем

КА и при помощи т.н. «диалоговых файлов» поступающих на АПКУ из системы сбора научной информации ССНИ. Была разработана следующая логика управления комплексом: команды ПК использовались только для включения/выключения приборов, на команды МПК основывалась вся логика управления работой комплекса СПИРИТ, «диалоговые файлы» при разработке и начальной эксплуатации рассматривались как дополнительный канал управления. При этом «диалоговые файлы» полностью дублировали возможности управления по командам МПК, кроме того, допускали дополнительные возможности – частичное перепрограммирование бортового процессора, постановка алгоритмов обработки информации, «быстрое» изменение программ работы приборов (циклограмм). Суточная квота по каналу ПК/МПК составляла около 200 байт, по каналу «диалоговых файлов» достигала 15 КБ. Стоит отметить, что управление приборами при помощи ПК/МПК производилось одновременно с управлением и по каналам управления всего спутника КОРОНАС-Ф, в то время как управление при помощи «диалоговых файлов» производилось непосредственно головной организацией - разработчиком бортовой научной аппаратуры - ИЗМИРАН. Это, в первую очередь, оказало влияние на оперативность управления комплексом СПИРИТ: характерный период управление в случае МК/МПК составлял 7 дней, оперативность подачи «диалоговых файлов» могла достигать 4 часов. Исходя из вышесказанного, автором была разработана методика, аппаратное и программное обеспечение, позволившие наиболее полно реализовать возможности по оперативному управлению комплексом СПИРИТ:

- А. Была разработана и реализована эффективная система команд высокого уровня, допускавшая конструирование сложных циклограмм неограниченной продолжительностью с привязкой к реальному времени или к отдельным событиям (вспышка, внешние сигналы и т.п.).
- В. Разработан комплекс наземного и встроенного программного обеспечения АПКУ, позволивший оперативно конструировать циклограммы, разрабатывать, отлаживать и обновлять летное ПО.
- С. Разработаны и реализованы бортовые алгоритмы сжатия, обработки и накопления информации. Разработаны и реализованы алгоритмы поиска событий (вспышек, активных областей и т.п.)

Глава 3 посвящена описанию основных результатов экспериментов ТЕРЕК, ТЕРЕК/РЕС и СПИРИТ и результаты их использования для решения задач физики солнечной атмосферы.

Раздел 3.1 является вводным. В нем дается общее описание массивов наблюдательных данных и их характеристики. С августа 2001 по декабрь 2005 г. аппаратурой СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф было проведено более 23 тыс. сеансов наблюдений, получено 85 Гб телеметрической информации, содержащей более миллиона спектрогелиограмм Солнца в отдельных монохроматических линиях. Телескоп СРТ-К с многослойной оптикой нормального падения и детекторами на основе ПЗС-матриц представляет собой третье поколение солнечных телескопов, разработанных в ФИАНе на протяжении последних 20 лет. Прототипами этого телескопа были телескопы ТЕРЕК на космическом аппарате "Фобос-1" (1988 г.), и ТЕРЕК-К на спутнике КОРОНАС-И (1994 г.). По сравнению с телескопом ТЕРЕК на спутнике КОРОНАС-И телескоп СРТ-К комплекса СПИРИТ имел увеличенную в 2,6 раза апертуру, значительно более высокие чувствительность, угловое и временное разрешение. Спектрогелиограф РЕС, не имеющий аналога в мировой практике, позволил впервые реализовать *монохроматическую изображающую спектроскопию всего Солнца* в рентгеновской и крайней ВУФ области длин волн. За время работы прибора РЕС со дня запуска спутника 31 июля 2001г. зарегистрировано около 300 тысяч спектрогелиограмм с высоким временным разрешением. Эти спектрогелиограммы привели к созданию уникального банка данных, составивших основу для исследования характеристик как известных структурных образований в солнечной атмосфере (активные области, корональные дыры), так и новых, впервые наблюдаемых в монохроматических рентгеновских изображениях. Прибором РЕС в канале магния был обнаружен целый класс явлений в корональной плазме, отличающихся временем жизни (от минут до суток и более), размером (до 0.5 радиуса Солнца) и динамикой.

В **разделе 3.2** приведены примеры результатов наблюдений, полученные благодаря применению аппаратно-программных комплексов и детекторов изображения, разработанных автором диссертации и иллюстрирующие их возможности и характерные особенности. Первые долговременные наблюдения выполненные на АМС «Фобос-1» с помощью телескопа ТЕРЕК показали большую

перспективность телескопов с многослойной оптикой для будущего развития солнечной рентгеновской астрономии. Использование разработанных автором нового типа детекторов рентгеновского излучения на основе ПЗС матриц позволили получить спектральное изображение всего Солнца в четырех спектральных каналах и с их помощью наблюдать структуру солнечной атмосферы.

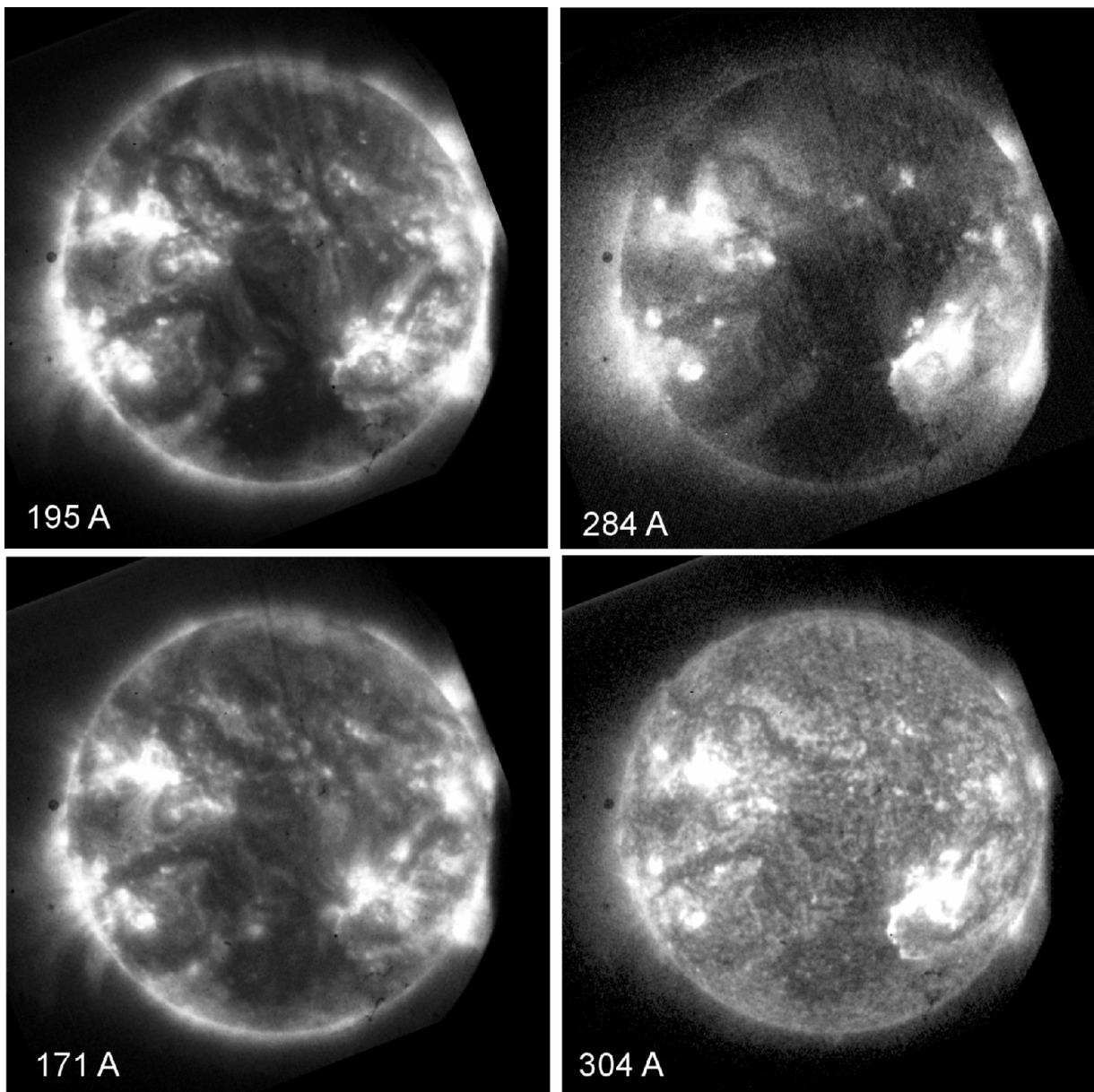


Рис. 3 Изображения солнечной атмосферы в каналах, полученные одновременно в четырех спектральных диапазонах.

Дальнейшее развитие АПКУ и кардинальное улучшение характеристик детекторов в эксперименте ТЕРЕК/РЕС на КА Коронас-И позволили существенно увеличить пространственное и временное разрешение телескопа (ТЕРЕК-К), а так-

же впервые получить «спектрально чистые» (неперекрывающиеся) монохроматические изображения в линиях крайнего вакуумного ультрафиолета с прибора типа –РЕС-К. см. рис 4.

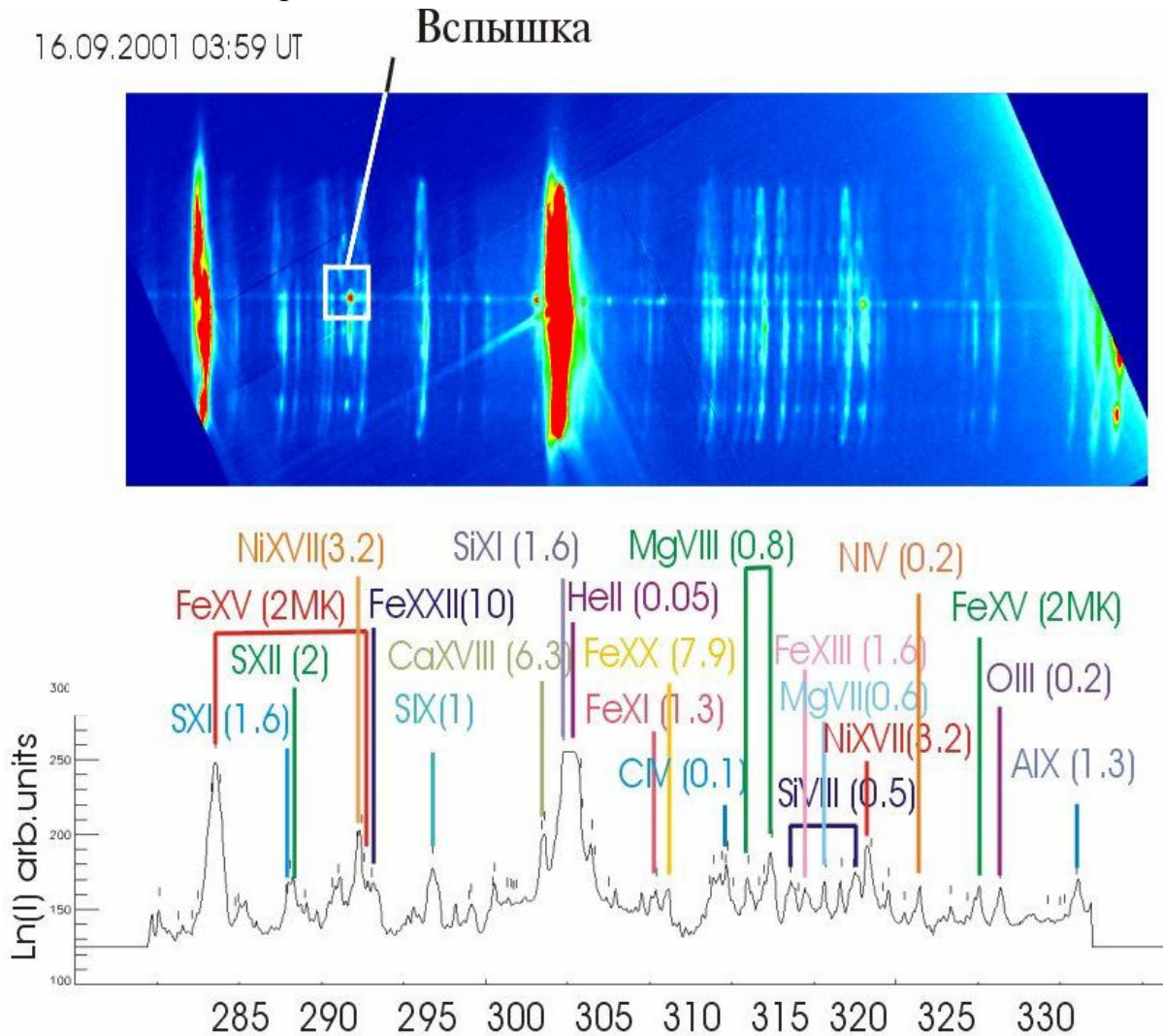


Рис 4.

Принципиально новый этап в развитии метода изображающей спектроскопии был достигнут в эксперименте СПИРИТ на КА Коронас-Ф. В результате принципиальных усовершенствований как приемников, так и систем бортового программного управления, описанной в гл. 2 было достигнуто высокое временное (7 сек), пространственное (до 5'') разрешение. Благодаря возможности АПКУ производить модификацию программного обеспечения во время полета, удалось организовать долговременный эксперимент по поиску вспышечных событий.

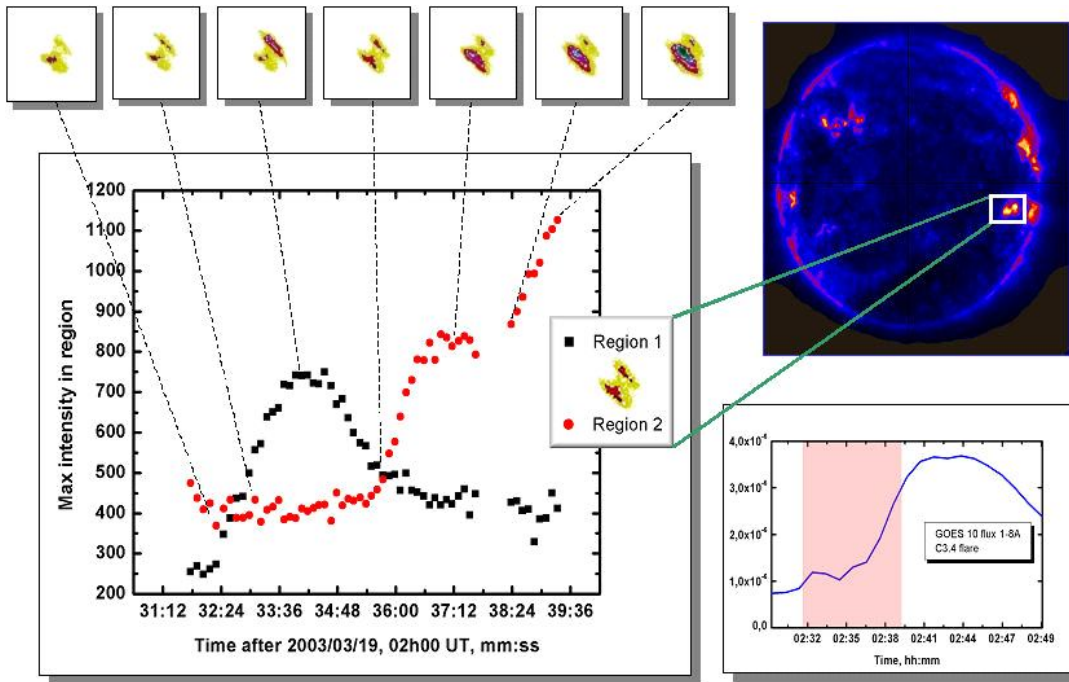


Рис 5.

На рис. 5 приведен пример такого события в диапазоне MgXII. АПКУ позволил реализовать возможность получения серий непрерывной регистрации монохроматических изображений в рентгеновской линии 8.42 \AA (MgXII), а также изображений в 6 каналах крайнего ВУФ диапазона, зарегистрированных одновременно с помощью телескопа/коронोगрафа СРТ-К.

В разделе 3.3 дается краткий обзор основных результатов использования данных наблюдений для решения задач физики солнечной атмосферы. Спектры с высоким разрешением порядка 0.04 \AA , полученные впервые для солнечных вспышек в исследуемых ВУФ диапазонах, позволили установить распределение вещества (тепловой дифференциальной меры эмиссии, ДМЭ) с температурой для наиболее горячих областей солнечной короны с температурой более 4 MK . Также впервые полученные монохроматические изображения солнечной короны в ВУФ линиях до 3 солнечных радиусов, в частности «спектрально чистые» изображения в линиях He II и Si XI, дали возможность определить механизмы их возбуждения в короне на различных расстояниях от лимба Солнца. С помощью рентгеновских монохроматических изображений в резонансной линии Mg XII с высоким пространственным разрешением порядка 8 сек. дуги, в сочетании с ВУФ спектрами, а также данными о временных профилях и изображениях мягкого рентгеновского излучения (со спутников GOES, YОНКОH и RHESSI) была получена принципиально новая информация о структуре, динамике и физических характеристиках (распределении электронной плотности, температуры и

давления) в горячих плазменных образованиях с температурой от 4 до 20 и более МК. Многотемпературный анализ, выполненный по результатам таких комплексных одновременных наблюдений в разных спектральных интервалах, показал, что температура, традиционно определяемая методом фильтров, может превышать в 2-3 раза, а мера эмиссии (МЭ) на порядок и более занижать соответственно среднюю температуру и значение полной МЭ вспышечных областей. Важным результатом исследования временных профилей потоков излучения прибором РЕС и монитором GOES является обнаружение во всех вспышечных событиях «переходной» плазмы с промежуточной температурой 4 – 10 МК, дающей значительный до 70% и более, вклад в энергобюджет вспышечных процессов. Наиболее существенным образом такая плазма влияет на динамику долговременных градиентных событий (ДГС), например, т.н. «пауков», впервые обнаруженных и исследованных с помощью серий монохроматических изображений в канале MgXII. Анализ морфологических особенностей и диагностика температурных и плотностных пространственных распределений показали принципиальное отличие таких вспышечных явлений от обнаруженных ранее в эксперименте Yohkoh, что свидетельствует о различных механизмах их образования и развития. Таким образом, наличие новых данных, полученных каналами спектрогелиометра РЕС, приводит к необходимости пересмотра интерпретации ряда результатов количественного моделирования процессов образования и развития вспышечных явлений. Важно также отметить высокую наблюдаемую корреляцию ДГС (пауков) с корональными выбросами масс (КВМ), изучение которых имеет важное прикладное значение для исследований солнечно-земных связей и космической погоды. На основе данных наблюдений было показано, что важную роль во вспышечном нагреве плазмы в короне могут играть магнито-гидродинамические неадиабатические ударные волны, образующиеся над вершинами петель сильного магнитного поля при взаимодействии с ними сверхзвуковых потоков плазмы из области магнитного пересоединения. Впервые одновременно в корональном диапазоне 175 Å и линии переходного слоя 304 Å проведены систематические исследования начальной стадии формирования корональных выбросов массы в частности, в областях диммингов. Показана связь крупномасштабных диммингов с глобальной структурой магнитного поля, и выявлены характерные особенности предэруптивных вариаций интенсивности корональных структур с $T \sim 1$ МК, которые могут быть использованы для краткосрочного прогнозирования КВМ.

Основные результаты диссертации:

1. Разработаны основные принципы организации внеатмосферных наблюдений солнечной атмосферы в рентгеновском и ВУФ диапазоне спектра, в проектах «Фобос-1», КОРОНАС-И и КОРОНАС-Ф. Разработаны методы бортового управления приборными комплексами на КА «Фобос-1», КОРОНАС-И и КОРОНАС-Ф.
2. Создан ряд координатно-чувствительных приемников рентгеновского и ВУФ излучения форматом от 256x144 до 1024x1152 элемента, чувствительностью до 1 фотона (для $\lambda=8,42 \text{ \AA}$), динамическим диапазоном 10^4 , диапазоном экспозиции 0,01-650 сек.
3. Разработаны и испытаны следующие аппаратные блоки:
 - Блок управления детекторами.
 - Блок сбора информации, полученной в ходе эксперимента.
 - Блок обработки, сжатия и архивирования информации.
4. Разработаны и реализованы следующие аппаратные модули:
 - Модуль сжатия информации.
 - Модуль упаковки информации.
5. Обеспечены сроки бесперебойного автономного функционирования комплекса в течении всего периода активного существования КА (до 4,5 лет для проекта КОРОНАС-Ф).
6. Реализованы уникальные режимы регистрации спектральных изображений:
 - Сеансы непрерывных наблюдений с продолжительностью до 50 часов с временным разрешением 5 мин.
 - Сеансы непрерывных наблюдений с продолжительностью до 3 часов с временным разрешением 1 мин.
 - Сеансы по наблюдению вспышечных явлений с адаптивным временным разрешением до 5 сек.
 - Наблюдение дальней солнечной короны (до 3R) с одновременным наблюдением солнечного диска в диапазонах 174 \AA и 304 \AA .
7. Обеспечено получение больших массивов научных данных (до 100 кадров в проекте «Фобос-1», 3000 кадров а проекте КОРОНАС-И и более 300000 кадров в проекте КОРОНАС-Ф), позволивших зарегистрировать 14 уникально мощных вспышек класса X7.

Список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

1. Житник И.А., Игнатьев А.П., Корнеев В.В., Крутов В.В., Ломкова В.М., Митрофанов А.В., Опарин С.Н., Перцов А.А., Слемзин В.А., Тиндо И.П., Токарчук Д.И., Фотин, Гапонов С.В. , Лускин Б.М., Салашенко Н.Н., Исаджанян Р.В., Крмоян, Кищенко В.М., Телегин А.Б., Вальничек Б., Гудец Р., Рыбански Л., Хренка Л., Бернас М., Клима М., Копецки Я.. «Рентгеновский телескоп ТЕРЕК для исследования Солнца по проекту «ФОБОС», Труды ФИАН, т.195, с.19-46, 1989
2. Собельман И.И., Житник И.А., Вальничек Б., Рыбански М., Бернас М., Гапонов С.В., Гудец Р., Игнатьев А.П., Исаджанян Р.В., Кищенко В.М., Клима М., Копецки Я., Корнеев В.В., Краснопольский О.Б., Крмоян М.Н., Крутов В.В., Ломкова В.М., Митрофанов А.В., Опарин С.Н., Пересты Р., Перцов А.А., Салашенко Н.Н., Слемзин В.А., Телегин А.Б., Тимофеев В.О., Тиндо И.П., Урнов А.М., Фотин Ю.Н., Ходжаянц Ю.М. «Изображение Солнца, полученные рентгеновским телескопом ТЕРЕК на КА «ФОБОС-1», Письма в Астрономический Журнал, т.16, № 4, с.323-329, 1990
3. Sobelman I., Zhitnik I., Ignatiev A., Korneev V., Krutov V., Lomkova V., Mitrofanov A., Pertsov A., Slemzin V., Tindo I., Fotin Yu., Urnov A., Valnicek B., Hudec R., Peresty R. and Rybansky M. «Diagnostic of the inner corona by XUV - imaging of the Sun», Adv. Space Res., v.11, No 1, p.99-107, 1991
4. Житник И.А., Игнатьев А.П., Корнеев В.В., Крутов В.В., Митрофанов А.В., Опарин С.Н., Перцов А.А., Слемзин В.А., Собельман И.И., Тиндо И.П., Урнов А.М., Вальничек Б., Гудец Р., Пересты Р. «Рентгеновские изображения Солнца, полученные телескопом ТЕРЕК на КА Фобос-1», Труды Физического института им.П.Н.Лебедева РАН, т.215, с.72-111, 1992
5. Собельман И.И., Житник И.А., Игнатьев А.П., Корнеев В.В., Клепиков В.Ю., Крутов В.В., Кузин С.В., Митрофанов А.В., Опарин С.Н., Перцов А.А., Салашенко Н.Н., Слемзин В.А. , Степанов А.И., Тиндо И.П., Аветисян Э.А., Ломкова В.М., Суханов В.Ф., Фотин Ю.Н. «Рентгеновская спектроскопия Солнца в диапазоне 0.84-30.4 Нм в экспериментах ТЕРЕК-К и РЕС-К на спутнике КОРОНАС-И», Письма в Астрономический Журнал, т.22, № 8, с.604-619, 1996

6. Тиндо И.П., Житник И.А., Дорофеев Ю.В., Корнеев В.В., Кузин С.В. и Перцов А.А. <Приемник рентгеновских изображений>. Патент № 208280 на изобретение, РОСПАТЕНТ, 20 июня (1997)
7. Житник И.А., Кузин С.В., Ораевский В.Н., Перцов А.А., Собельман И.И., Урнов А.М., < Спектральный анализ солнечных изображений в области 180-210 А с помощью спектрогелиографа РЕС-К на орбитальной станции КОРОНАС-И>, Письма в Астрономический Журнал, т.24, № 12, с.943-950, 1998
8. Zhitnik I., Ignatiev A., Korneev V., Krutov V., Kuzin S., Mitrofanov A., Oparin S., Pertsov A., Slemzin V., Tindo I., Parhomov V., Salashchenko N., Timofeev V. <Instruments for imaging XUV spectroscopy of the Sun on board the CORONAS-I satellite >, SPIE , v.3406, p.1-20, 1998
9. I.A.Zhitnik, O.I.Bugaenko, A.P.Ignat'ev, V.V.Krutov, .V.Kuzin,A.V.Mitrofanov, S.N.Oparin, A.A.Pertsov, A.Slemzin, A.I.Stepanov and A.M.Urnov. Dynamic 10 MK plasma structures observed in monochromatic full Sun images by the SPIRIT spectroheliograph on the CORONAS-F mission. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **338**, 67-71, 2003.
10. Житник И.А., Боярчук К.А., Бугаенко О.И., Иванов-Холодный Г.С., Игнатьев А.П., Крутов В.В., Кузин С.В., Митрофанов А.В., Опарин С.Н., Перцов А.А., Слемзин В.А., Степанов А.И. Эффекты поглощения солнечного XUV - излучения верхней атмосферой Земли на высотах 100 - 500 км в рентгеновских изображениях Солнца, полученных на спутниках "Коронас-И" (телескоп ТЕРЕК) и "Коронас-Ф" (рентгеновский комплекс СПИРИТ). Астрономический вестник, т 37, №4, с. 1–6, 2003.
11. I.Zhitnik, S.Kuzin, A.Afanas'ev, O.Bugaenko, A.Ignat'ev, V.Krutov, A.Mitrofanov, S.Oparin, A.Pertsov, V.Slemzin, N.Sukhodrev, A.Urnov. XUV observations of solar corona in the SPIRIT experiment on board the CORONAS-F satellite. Adv. Space Res., v. 32, №4, p.473-477, 2003.
12. I.Zhitnik, S.Kuzin, O.Bugaenko, A.Ignat'ev, V.Krutov, D.Lisin, A.Mitrofanov, S.Oparin, A.Pertsov, V.Slemzin, A.Urnov. Results of XUV full Sun imaging spectroscopy for eruptive and transient events by the SPIRIT spectroheliograph on the CORONAS-F mission. Adv. Space Res., v. 32, № 12, p. 2573-2577, 2003.
13. Богомолов А.В., Кудела К., Кузнецов С.Н., Логачев Ю.И., Морозов О.В., Мягкова И.Н., Свертилов С.И., Юшков Б.Ю., Игнатьев А.П., Опарин С.Н.,

- Перцов А.А.. Характеристики интенсивного рентгеновского и гамма-излучения солнечной вспышки 20 мая 2002 г. по данным наблюдений на космической станции «Коронас-Ф». Письма в Астрономический Журнал. 2003 г. ,N3 стр. 234-240.
- 14.Акимов Л.А., Белецкий С.А., Белкина И.Л., Бугаенко О.И., Великодский Ю.И., Житник И.А., Игнатъев А.П., Корохин В.В., Кузин С.В., Марченко Г.П., Перцов А.А. Квазипериодичность всплесков рентгеновского излучения активных областей Солнца в линии MgXII по данным СПИРИТ/КОРОНАС-Ф. Часть 1. Астрономический журнал. 2005.т. 49 №7, 579 .
- 15.Житник И.А., Кузин С.В., Собельман И.И., Бугаенко О.И., Игнатъев А.П., Митрофанов А.В., Опарин С.Н., Перцов А.А., Слемзин В.А., Суходрев Н.К., Урнов А.М.. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА СПИРИТ НА ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ КОРОНАС-Ф. Астрономический Вестник, 2005, т.39, №6, с. 495-506.
- 16.Grechnev V.V., Uralov A.M., Zandanov V.G., Rudenko G.V., Borovik V.N., Grigorieva I.Y., Slemzin V.A., Bogachev S.A., Kuzin S.V., Zhitnik I.A., Pertsov A.A., Shibasaki K., Livshits M.A. , "Plasma Parameters in a Post-Eruptive Arcade Observed with CORONAS-F/SPIRIT, Yohkoh/SXT, SOHO/EIT, and in Microwaves", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.58, No.1, pp. 55-68, 2006.
- 17.Kuzin, S.; Chertok, I.; Grechnev, V.; Slemzin, V.; Bugaenko, O.; Zhitnik, I.; Ignat'Ev, A.; Pertsov, A. CME-associated dimmings on the Sun observed with the EUV SPIRIT telescope on the CORONAS-F spacecraft. Advances in Space Research, 2006, V. 38, Issue 3, p. 451-455.
18. Акимов Л.А., Белкина И.Л., Кузин С.В., Перцов А.А., Житник И.А. Квазисинхронность всплесков излучения в структурах солнечной короны в линии MgXII 0.84 нм по данным эксперимента КОРОНАС-Ф/СПИРИТ. Письма в Астрономический Журнал, 2008, т. 34, №11, с. 1–13
- 19.Перцов А.А, Игнатъев А.П., Житник И.А., Кузин С.В. Бортовой комплекс управления экспериментом СПИРИТ. ПТЭ №5, с. 67-70, 2008.