

ЗАГАДКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА «ПЛАЗМА-Ф»

Хотя еще первобытные люди понимали, что Солнце — источник всего сущего на Земле, но и до сих пор многие невидимые нити, которые связывают нашу звезду и Землю, не только до конца не поняты, но даже и не исследованы полностью. Поэтому изучение разнообразия солнечно-земных связей имеет большое практическое и научное значение.

Прагматический интерес вызывает прежде всего та сторона их взаимодействия, которая объединяется общим названием «космическая погода». Она заключается в постоянном влиянии приходящих от Солнца возмущений на околоземное пространство: генерацию магнитных и ионосферных бурь, в свою очередь, вызывающих сбои в современных технических системах, нарушения



радиосвязи (особенно в полярных районах), повреждения автоматики линий электропередачи и трубопроводов и даже здоровье человека.

Научный же интерес связан с возможностью изучения в космосе бесстолкновительной горячей плазмы, которую очень сложно воссоздать в лабораторных условиях, в частности, чтобы оценить особенности распространения в ней радиоволн, развитие разнообразных плазменных неустойчивостей и т.п.

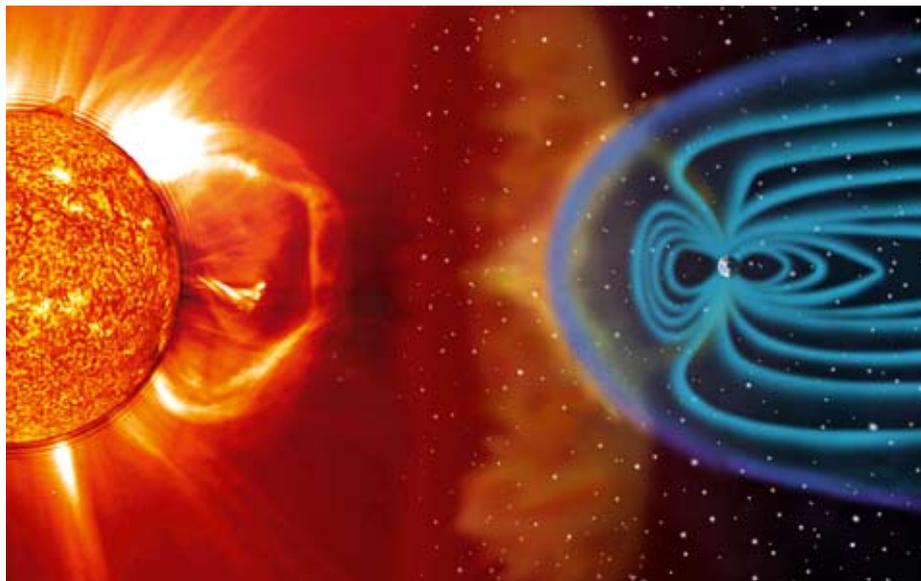
Для продолжения и развития этих исследований на запущенном 18 июля 2011 года российском астрофизическом спутнике «Спектр-Р» был поставлен эксперимент «Плазма-Ф».

«СПЕКТР-Р»

Основная цель спутника «Спектр-Р» — детальное изучение радиоизлучения дальних космических объектов — черных дыр, сверхгалактик, облаков темной материи и т.д. — с помощью интерферометра с очень большой базой. Однако параллельно с основным экспериментом, на этом КА нашлось место и для приборного комплекса «Плазма-Ф», в задачу которого входят непосредственные измерения в межпланетном пространстве двух важных компонент солнечного излучения — потоков плазмы солнечного ветра и потоков энергичных частиц от Солнца.

Орбита высокоапогейного спутника «Спектр-Р» предоставляет прекрасные возможности для этого эксперимента. Как известно, межпланетная среда, взаимодействуя с магнитным полем Земли, создает огромную полость — магнитосферу Земли, ограниченную в направлении к Земле магнитопаузой (расстояние до нее в подсолнечном секторе составляет около 60 тыс. км), в направлении к Солнцу — околоземной ударной волной (расстояние до которой от Земли составляет около 100 тыс. км). Внутри магнитосферы межпланетная среда почти не проникает, поэтому для ее изучения надо выйти за околоземную ударную волну.

Благодаря своему высокому апогею (360 тыс. км), долгому периоду обращения (8,5 суток) и сравнительно невысокому перигею (5-10 тыс. км) спутник «Спектр-Р» около 6-8 суток пребывает в невозмущенной межпланетной среде, а затем быст-



Прибор МЭП был разработан и изготовлен нашими традиционными партнерами в Институте экспериментальной физики Словацкой академии наук под руководством профессора Карела Куделы и при участии Университета Фракии (Греция). Эта группа имеет более чем 40-летний опыт разработки и проведения подобных экспериментов. ИКИ РАН участвовал в разработке прибора, обеспечивал поддержку проведения эксперимента в части стыковки с КА, проведения испытаний, а сейчас осуществляет управление им в полете.

ро «просвистывает» сквозь почти все области магнитосферы, регистрируя их состояние.

РЕГИСТРАЦИЯ ПОТОКОВ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Одной из важных составляющих космической межпланетной и магнитосферной плазмы является так называемая «энергичная» компонента — ионы (в основном протоны) и электроны с энергиями существенно выше средней («тепловой») энергии основной массы плазмы. К числу таких частиц относятся, например, солнечные космические лучи или частицы радиационных поясов Земли. Кроме собственно изучения свойств околоземного пространства, исследования процессов ускорения и образования энергичной плазмы исключительно важны для астрофизики. Схожие процессы (только с более высокими энергиями) ответственны за ускорение плазмы в астрофизических объектах, о свойствах которых мы можем судить только по свойствам достигающего Земли вторичного излучения.

В советских и российских космических проектах накоплен большой опыт подобных наблюдений. Спутник «Спектр-Р» стал удобной платформой для реализации специализированного эксперимента такого рода для изучения тонкой структуры ускорительных процессов.

В приборе МЭП установлено четыре детектора — по два для измерений потоков электронов и ионов соответственно. Пары ионного и элект-

ронного детекторов ориентированы одна в сторону, близкую к Солнцу, вторая — «назад», от Солнца, насколько позволяет конструкция аппарата. При этом не допускается попадание прямого солнечного света или бликов от поверхности КА на чувствительные детекторы.

Электронный детектор включает в себя коллиматор, фольгу, отсекающую поток ионов, имеющих низкую проникающую способность, и кремниевый чувствительный элемент, позволяющий измерять энергию электронов по их полному энерговыделению в диапазоне энергий 40-400 килоэлектронвольт. Детектор ионов включает в себя коллиматор, кольцевой магнит, отсекающий электроны с энергиями до 1 МэВ и кремниевый чувствительный элемент, позволяющий измерять энергию ионов в диапазоне 40-1000 килоэлектронвольт. Детекторы имеют относительно большой геометрический фактор $0,77 \text{ стер} \cdot \text{см}^2$, что обеспечивает высокую чувствительность к малым потокам измеряемых частиц. Электронный блок прибора включает в себя узлы, осуществляющие формирование импульсного сигнала с детекторов и формирование интерфейсов с системами КА (телеметрия, питание, команды).

Как правило, ранее подобные измерения проводились с накоплением сигнала за время порядка одной минуты. В данном же эксперименте реализована схема измерений со временем регистрации не хуже 1 секунды и до 32 отсчетов в секунду. Такое высокое разрешение по времени позволяет получить уникальные результаты.

Например, на рис. 1 приведен пример измерений в солнечном ветре буквально в первые часы после первого включения. Наблюдается транзитное возрастание потока ионов в диапазоне энергий до 200 КэВ. На переднем фронте возрастания отчетливо наблюдается периодическая структура с характерным временем порядка 20-30 секунд, что близко к периоду циклотронного вращения протона в магнитном поле солнечного ветра. Подобное наблюдение говорит о непосредственной близости спутника к месту ускорения протонов, так как в противном случае успевало бы пройти «размешивание» по фазе вращения.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСА «ПЛАЗМА-Ф»

- почти непрерывный мониторинг параметров межпланетной среды для развития методики и проведения оперативного краткосрочного предсказания «космической погоды»;
- исследование турбулентности параметров межпланетной среды в еще мало изученной области частот 0,01-30 Гц на основе измерений с очень высоким временным разрешением;
- исследование процессов ускорения энергичных частиц.

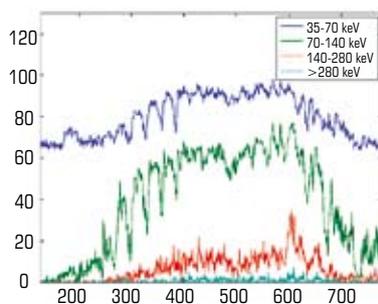


Рис. 1

Таким образом, в этом случае мы видим действие единичного акта ускорения вблизи аппарата, что представляет значительный интерес для дальнейшего детального изучения.

Другим интересным примером показаний прибора МЭП является появление потоков энергичных частиц при прохождении спутника через ударную волну и магнитопаузу.

На каждом витке своей вытянутой орбиты спутник должен выходить из магнитосферы и входить в нее, пересекая и магнитопаузу, и ударную волну. На рис. 2 представлены наблюдения потоков энергичных частиц при таком пересечении 12 августа 2011 года.

На этом рисунке видно резкое возрастание потоков энергичных ионов и электронов перед ударной волной (около 17 часов) и особенно вблизи магнитопаузы (около 18 часов) во всех диапазонах энергий.

Такие наблюдения позволят лучше понять механизмы проникновения энергичных частиц через границы магнитосферы.

ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА ИОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Солнечный ветер (СВ) — главный источник крупномасштабных возмуще-

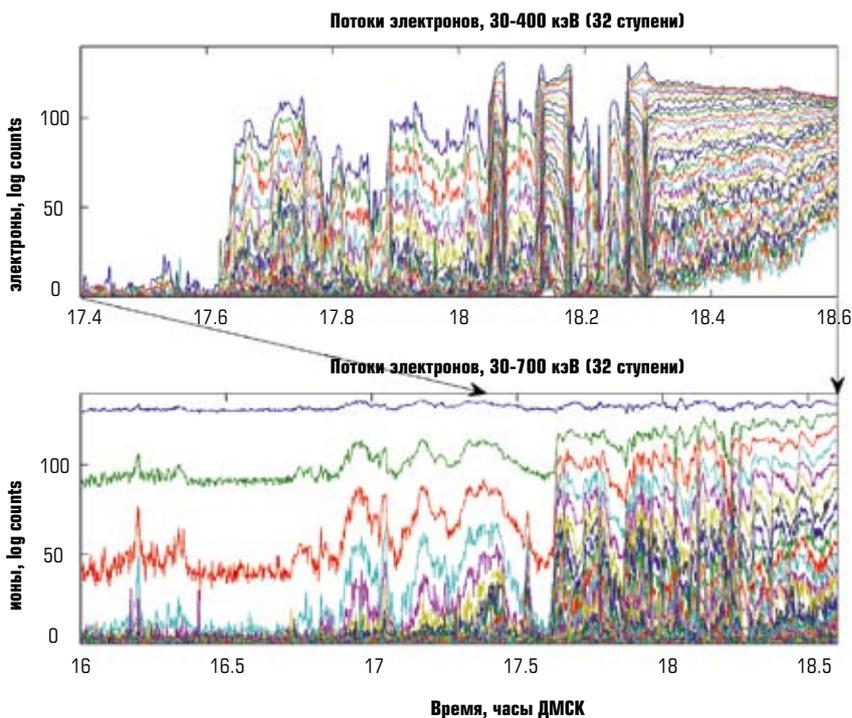
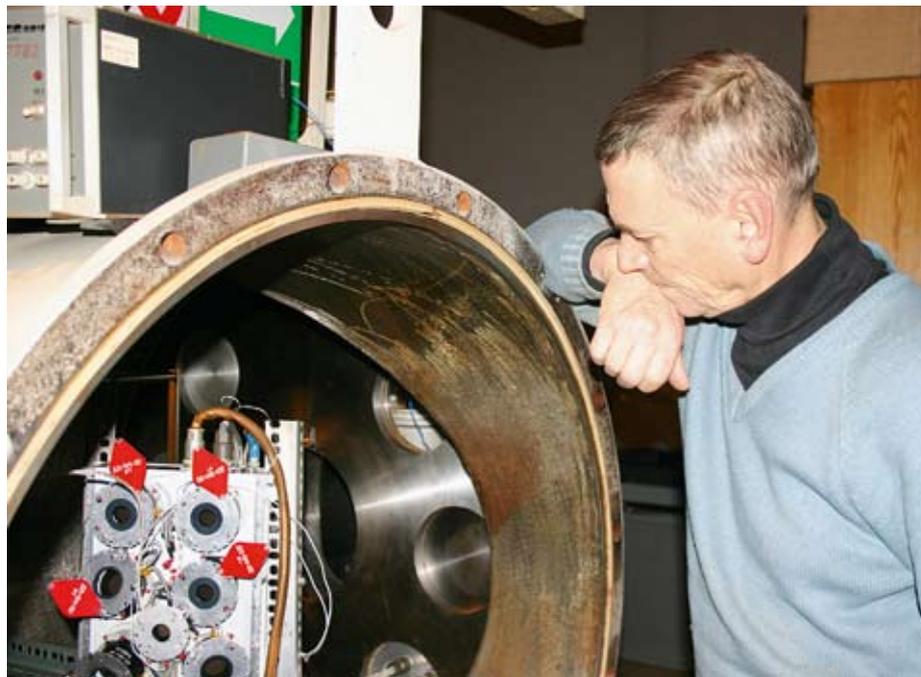


Рис. 2

ний магнитосферы Земли, поэтому постоянные наблюдения за ним — важная практическая задача. С другой стороны, изучение его тонкой структуры и в особенности ее быстрых пространственных и временных вариаций поможет понять физику формирования солнечного ветра вблизи Солнца и его динамику при движении от короны Солнца до магнитосферы Земли.

Для решения указанных задач и был разработан прибор БМСВ. Датчиками этого прибора являются шесть токовых устройств — цилиндров Фарадея, работающих совместно. Сравнение показаний трех разноориентированных датчиков используется для определения величины и двух углов направления интегрального (по энергии) потока ионов СВ. С помощью трех других датчиков измеряются интегральные энергетические спектры ионов СВ, определяются их переносная скорость, ионная температура и концентрация.

Так как для постоянной ориентации на Солнце прибор БМСВ размещается на панели солнечной батареи КА, его интерфейсы с системами КА (питание, команды, телеметрия) осуществляются через прибор ССНИ-2. Для определения положения Солнца относительно прибора он снабжен собственным датчиком солнечной



ориентации, разработанным и изготовленным в Институте физики атмосферы Академии наук Чешской Республики.

Основной целью разработки прибора БМСВ было достижение высокого временного разрешения — для измерения основных параметров СВ оно достигает 1,5 с, а для вектора потока ионов (величины и двух углов) даже 30 мс.



Испытания приборного комплекса в ИКИ

Прибор БМСВ был разработан в традиционной кооперации коллективов математико-физического факультета Карлова Университета (Прага, Чешская Республика) и ИКИ РАН. Датчики прибора изготавливались и калибровались под руководством ИКИ РАН в ОКБ «ААЛАН» (Бишкек, Киргизия), а прибор в целом и его электроника — в Карловом Университете с некоторым участием специалистов ИКИ. Институт космических исследований обеспечивал поддержку проведения эксперимента в части стыковки с КА, проведения разнообразных испытаний прибора (включая его физическую калибровку в вакуумной камере), и осуществляет управление им в полете.

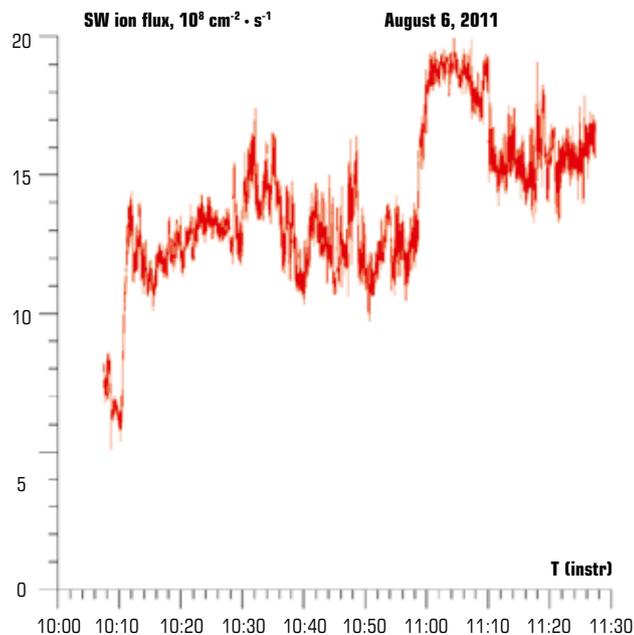


Рис. 3

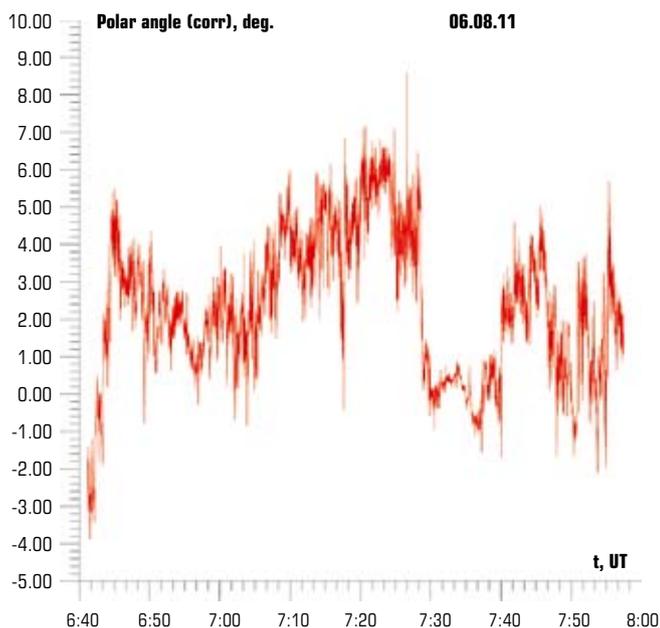


Рис. 4

Рассмотрим примеры измерений прибора БМСВ, полученных на первом этапе его работы. На рис. 3 показан временной ход величины потока ионов СВ на интервале в 1,5 часа. Благодаря высокому разрешению видна очень большая изменчивость потока, как на малых, так и на больших амплитудах, как на малых, так и на больших временах. При резких вариациях потока мы видим его изменения на 10–30% за столь малое время, как 0,2–0,5 сек.

На рис. 4 представлена впервые полученная с такой подробностью динамика поведения угла наклона вектора потока ионов к направлению на Солнце. Здесь видно сравнительно плавное изменение угла наклона на интервале в 1,5 часа, а также очень резкие и достаточно большие (на 2–3 градуса) изменения угла наклона за столь малые времена, как 0,2–0,5 сек. Такие данные получены впервые. Ни в

одном эксперименте ранее такое разрешение в измерениях углов наклона вектора потока достигнуто не было.

Надо подчеркнуть, что наши измерения с рекордно высоким разрешением позволяют выдвинуть новую парадигму. Солнечный ветер, по крайней мере на отдельных интервалах, не является однородным, а состоит из множества отдельных струй или слоев, отличающихся и по интенсивности и по углам наклона к радиальному направлению. Можно провести такую аналогию: если поливать сад из резинового шланга, то вода течет плотной однородной струей. Однако если на шланг надеть некий «рассекатель» (как на лейке), то струя разобьется на множество отдельных струек, наклоненных друг к другу.

По-видимому, это имеет место и в потоке солнечного ветра. Правда, остается еще невыясненным важнейший вопрос: где же находится этот «рассекатель» — в верхней короне Солнца, где формируется солнечный ветер, или его роль играют различные неустойчивости плазмы, развивающиеся при ее движении в межпланетной среде?

РАБОТА СИСТЕМЫ ССНИ-2

Наличие такой системы в составе аппаратуры эксперимента необходимо, поскольку существует очевидное противоречие между проведением непрерывных измерений и только эпизодическими моментами сеансов связи со сбросом информации на Землю.

Разработка этой системы в значительной своей части базировалась на положительных результатах прототипа — системы сбора научной информации (ССНИ), успешно работавшей на спутниках «Интербол-1» и «Интербол-2» (1995–2000 гг.), однако с существенным ее расширением.

Логика работы ССНИ-2 включает в себя проведение непрерывной регистрации (записи) в свою долговременную память научной информации от всех научных приборов. Эта информация может выдаваться в телеметрическую систему КА, либо в сеансах передачи ее на Землю непосредственно (т.е. в реальном времени), либо в сеансах воспроизведения информации, ранее записанной в память ССНИ-2. При этом запись данных в ССНИ-2 происходит и тогда, когда система работает в режиме воспроизведения (при этом, естественно, используются разные запоминающие устройства).

Так как заранее нельзя предсказать все возможные обстоятельства и периодичность сеансов воспроизведения, ССНИ-2 обладает большой гибкостью, позволяя выбирать (в том числе и многократно) для воспроизведения любой интервал получения данных из своей памяти. При этом совокупная память запоминающих устройств ССНИ-2 настолько велика, что позволяет без стирания накапливать информацию от научных приборов в течение целого года работы эксперимента «Плазма-Ф».

Еще одна очень важная особенность работы ССНИ-2 — возможность сжатия данных. Так как длительность сеансов связи КА с наземными пунктами всегда сильно ограничена, то надо было предусмотреть возможность сброса в режиме воспроизведения ССНИ-2 не полной записанной в ее памяти информации, а только ее сокращенной (сжатой) части.

Такое сжатие информации в несколько раз (наиболее часто — в 8 раз) может проводиться как в самом научном приборе (например в приборе БМСВ), так и в ССНИ-2 для других приборов. При дефиците времени может производиться сброс только сжатых данных, а полная информация остается в памяти ССНИ-2.

Такая возможность позволяет организовать следующую процедуру:

- регулярно производятся сбросы сжатой информации;
- эту информацию просматривают экспериментаторы, которые выделяют интервалы, содержащие наиболее интересные события;
- для этих интервалов производится сброс полной информации.

Эта процедура была с успехом осуществлена для углубленного анализа вариаций плазмы СВ и потока энергичных частиц в момент пересечения ударной волны и магнитопаузы при входе в магнитосферу.

НАЗЕМНЫЙ СЕГМЕНТ

Естественным дополнением бортового космического эксперимента является его наземный сегмент. Поэтому эффективная реализация последнего является одной из ключевых составляющих, обеспечивающих успешную реализацию проекта в целом.

Задачи наземного сегмента сводятся к обработке телеметрической информации и формированию последовательностей телекоманд управления на основе анализа полученных результатов. Однако для выполнения этих задач необходимо выполнить целый ряд дополнительных процедур, включая расчет баллистических и навигационных параметров, моделирование результатов отработки телекоманд с учетом различных технических ограничений и т.п.

Наземный сегмент включает в себя несколько элементов: наземные пункты космической связи, баллистические центры, Центр управления полетом, центры обработки научной информации и т.д. Современные технические средства позволяют достаточно просто организовать взаимодействие между различными узлами наземного сегмента по каналам связи, обеспечивающим достаточную пропускную способность и информационную безопасность пе-

редаваемых данных при невысоких затратах.

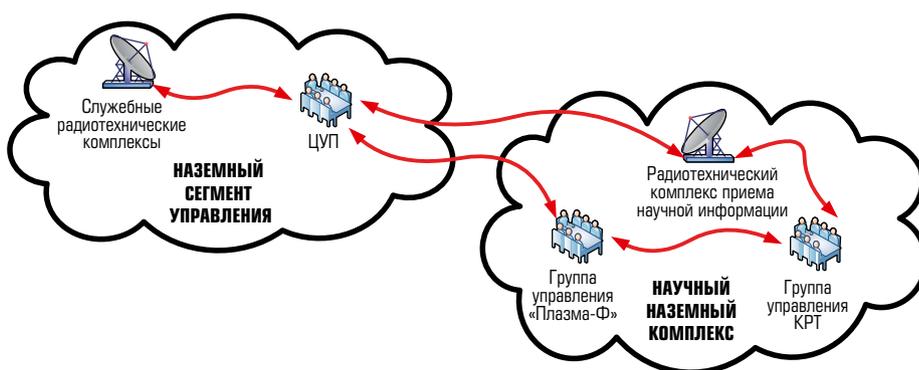
Вданном проекте была использована принципиально новая концепция информационного обмена с двумя центрами компетенции: центром управления полетом КА и центром управления комплексом научной аппаратуры. При этом задачи, выполняемые различными узлами системы, взаимно дополняют друг друга, обеспечивая единую информационную инфраструктуру наземного сегмента.

Научный наземный комплекс проекта состоит из двух частей: сегмента, предназначенного для информационного обеспечения работы радиотелескопа (созданного головной организацией по основной научной задаче проекта — АКЦ ФИАН) и сегмента эксперимента «Плазма-Ф» (созданного в ИКИ РАН).

В итоге созданная система управления и получения данных обеспечивает экспериментаторам ИКИ РАН уникальную возможность получать в реальном времени прямо на своих рабочих местах информацию всех приборов эксперимента, идущую именно в этот момент с борта спутника, и подавать команды на прибор с весьма малыми задержками.

СОСТАВ КОМПЛЕКСА «ПЛАЗМА-Ф»

- монитор потоков энергичных частиц МЭП, который производит измерения в двух направлениях потоков и энергетического спектра электронов в диапазоне 40–400 кэВ и ионов в диапазоне 40 кэВ–1,0 МэВ;
- быстрый монитор солнечного ветра БМСВ, который производит измерения энергетических спектров ионов, позволяющие определить переносную скорость, концентрацию и температуру протонов, а также измеряет вектор интегрального потока протонов (величину и направление) с рекордно высоким временным разрешением;
- система сбора научной информации ССНИ-2, обеспечивающая запись всех измеренных данных, их долговременное хранение, обработку на борту и выдачу научной информации в телеметрическую систему спутника.



Еще лет десять тому назад о таком режиме работы можно было только мечтать!

Г. Н. Застенкер, Л. М. Зелёный, В. Н. Назаров, А. А. Петрукович, Л. С. Чесалин (ИКИ РАН), К. Кудела, Я. Балаж (ИЭФ АН, Словакия), З. Немечек, Я. Шафранкова (Карлов Университет, Чешская республика)

Авторы выражают свою искреннюю благодарность коллективам НПО им. С. А. Лавочкина, ИКИ РАН и АКЦ ФИАН, огромный труд которых сделал возможным постановку и проведение описанных выше экспериментов на борту спутника «Спектр-Р», а также Ольге Закутней (ИКИ РАН) за помощь в подготовке статьи.