

КОСМИЧЕСКАЯ МИССИЯ «РАДИОАСТРОН». ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

«RADIOASTRON» SPACE MISSION. THE FIRST RESULTS

В.Ю. Авдеев²
V.Yu. Avdeev²

А.С. Андрианов²
A.S. Andreyanov²

Я. Балаж⁴
Ya. Balash⁴

М.С. Бургин²
M.S. Burgin²

П.А. Войцик²
P.A. Voytsik²

О.Б. Дронова²
O.B. Dronova²

Г.С. Заславский⁷
G.S. Zaslavskiy⁷

А.Н. Зиновьев²
A.N. Zinoviev²

А.Б. Киселев³
A.B. Kiselev³

А.А. Коноваленко¹³
A.A. Konovalenko¹³

В.И. Кудак¹⁰
V.I. Kudak¹⁰

А.М. Кутькин²
A.M. Kutkin²

Л.Н. Литвиненко¹³
L.N. Litvinenko¹³

С.В. Логвиненко²
S.V. Logvinenko²

З. Немечек⁵
Z. Nemecek⁵

И.Н. Пащенко²
I.N. Pashchenko²

И.А. Рахимов⁶
I.A. Rakhimov⁶

В.А. Серебренников¹
V.A. Serebrennikov¹

К.В. Соколовский²
K.V. Sokolovskiy²

С.Д. Федорчук²
S.D. Fedorchuk²

А.В. Чибисов²
A.V. Chibisov²

А.Е. Ширшаков¹
A.E. Shirshakov¹

А.В. Алакоз²
A.V. Alakoz²

М.И. Артюхов¹
M.I. Artyukhov¹

К.Г. Белоусов²
K.G. Belousov²

Д.С. Варда⁸
D.S. Varda⁸

И.А. Гирин²
I.A. Girin²

А.А. Дьяков⁶
A.A. Dyakov⁶

Г.Н. Застенкер³
G.N. Zastenker³

А.В. Ипатов⁶
A.V. Ipatov⁶

Ю.А. Ковалев²
Yu.A. Kovalev²

Г.Д. Копелянский²
G.D. Kopolyanskiy²

К. Кудела⁴
K. Kudela⁴

М.Г. Ларионов²
M.G. Larionov²

И.Д. Литовченко²
I.D. Livovchenko²

И.А. Лузанов¹²
I.A. Luzanov¹²

Н.Я. Николаев²
N.Ya. Nikolaev²

А.А. Петрукович³
A.A. Petrukovich³

А.М. Резниченко¹³
A.M. Reznichenko¹³

А.И. Смирнов²
A.I. Smirnov²

В.А. Степаньянц⁷
V.A. Stepanyants⁷

В.В. Хартов¹
V.V. Khartov¹

А.А. Чуприков²
A.A. Chuprikov²

Л.А. Шнырева²
L.A. Shnyreva²

Ю.А. Александров²
Yu.A. Aleksandrov²

Н.Г. Бабакин²
N.G. Babakin²

А.В. Бирюков²
A.V. Biryukov²

В.И. Васильков²
V.I. Vasilkov²

Р.Д. Дагжесаманский²
R.D. Dagkesamanskiy²

В.И. Ерошин¹²
V.I. Eroshin¹²

М.В. Захваткин⁸
M.V. Zakhvatkin⁸

Б.З. Каневский²
B.Z. Kanevskiy²

Ю.Ю. Ковалев²
Yu.Yu. Kovalev²

Ю.А. Корнеев²
Yu.A. Korneev²

А.Ю. Кукушкин³
A.Yu. Kukushkin³

М.М. Лисаков²
M.M. Lisakov²

С.Ф. Лихачев²
S.F. Likhachev²

Т.А. Мизякина²
T.A. Miziakina²

Б.С. Новиков^{2,3}
B.S. Novikov^{2,3}

Ю.Н. Пономарев²
Yu.N. Ponomarev²

В.М. Рожков¹²
V.M. Rozhkov¹²

Т.И. Смирнова²
T.I. Smirnova²

Ж-М. Торре¹¹
J-M. Torre¹¹

Г.С. Царевский²
G.S. Tsarevskiy²

Я. Шафранкова⁵
Ya. Shafrankova⁵

В.В. Шпилевский⁶
V.V. Shpilevskiy⁶

В.В. Андреянов²
V.V. Andreyanov²

В.Е. Бабышкин¹
V.E. Babushkin¹

А.Е. Бубнов³
A.E. Vubnov³

И.С. Виноградов²
I.S. Vinogradov²

Е.Г. Дегтяренко¹²
E.G. Degtyarenko¹²

В.И. Журавлев²
V.I. Zhuravlev²

Л.М. Зеленый³
L.M. Zeleny³

Н.С. Кардашев²
N.S. Kardashev²

А.В. Коваленко²
A.V. Kovalenko²

В.И. Костенко²
V.I. Kostenko²

В.Ф. Кулишенко¹³
V.F. Kulishenko¹³

Е.А. Литвиненко⁹
E.A. Litvinenko⁹

Л.Н. Лихачева²
L.N. Likhacheva²

В.Н. Назаров³
V.N. Nazarov³

И.Д. Новиков²
I.D. Novikov²

М.В. Попов²
M.V. Popov²

С.В. Сазанков²
S.V. Sazankov²

В.А. Согласнов²
V.A. Soglasnov²

А.Г. Тучин⁷
A.G. Tuchin⁷

Л.С. Чесалин³
L.S. Chesalin³

М.В. Шацкая²
M.V. Shatskaya²

В.Е. Якимов²
V.E. Yakimov²

В статье представлены материалы о выполнении первого этапа программы полета космического аппарата «Спектр-Р» с космическим радиотелескопом, образующим с наземными радиотелескопами многодиапазонный интерферометр для исследования сверхтонкой структуры объектов Вселенной. Впервые радиотелескоп продемонстрировал работоспособность в автономном и интерферометрическом режимах на расстояниях до 300 000 км от Земли. Приводятся данные об организации управления, основных параметрах и первых результатах миссии «Радиоастрон». Описан эксперимент «Плазма-Ф» для изучения потоков межпланетной плазмы и энергичных частиц.

Ключевые слова: космический аппарат с радиотелескопом; управление полетом; радиоинтерферометрические наблюдения со сверх длинной базой.

The article deals with data on the first flight phase of «Spektr-R» spacecraft with radio telescope onboard, which jointly with ground radio telescopes act as the multiband interferometer intended for studying of hyperfine structure of the Universe objects. For the first time radio telescope has demonstrated operability both in stand-alone and interferometer modes at distances up to 300 000 km from the Earth. The data on flight control, main parameters and the first output of «Radioastron» mission are provided. Description of «Plasma-F» experiment is given which is aimed at study of interplanetary plasma and energetic particles.

Key words: spacecraft with radio telescope; flight control; VLB radio interferometer observations.

¹ ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

² Учреждение Российской Академии наук. Физический институт им. П.Н. Лебедева. Астрокосмический центр, Россия, г. Москва.

³ Учреждение Российской Академии наук. Институт космических исследований (ИКИ РАН), Россия, г. Москва.

⁴ Институт экспериментальной физики Словацкой Академии наук, Словакия.

⁵ Карлов Университет, Чешская Республика.

⁶ Учреждение Российской Академии наук. Институт прикладной астрономии (ИПА РАН), Россия, г. Санкт-Петербург.

⁷ Учреждение Российской Академии наук. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша (ИПМ РАН), Россия, г. Москва.

⁸ ЗАО «Астрономический научный центр «Проект-Техника».

⁹ Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулково.

¹⁰ Ужгородский национальный университет, Украина, г. Ужгород.

¹¹ Обсерватория Кот-д'Азур Университета Ниццы София-Антиполис, Франция, Ницца.

¹² ОАО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем», Россия, г. Москва.

¹³ Институт радиоастрономии Национальной Академии наук Украины, Украина, г. Харьков.

¹ Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.

² Institution of the Russian Academy of Sciences. P.N. Lebedev Physical Institute. Astro Space Center, Russia, Moscow.

³ Institution of the Russian Academy of Sciences. Space Research Institute (IKI RAN), Russia, Moscow.

⁴ Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Sciences, Slovakia.

⁵ Charles University, Czech Republic.

⁶ Institution of the Russian Academy of Sciences. Institute of Applied Astronomy (IPA RAN), Russia, Saint-Petersburg.

⁷ Institution of the Russian Academy of Sciences. M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics (IPM RAN), Russia, Moscow.

⁸ JSC «Astronomical Science Center «Project Tekhnika».

⁹ The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo.

¹⁰ Uzhhorod National University, Ukraine, Uzhgorod.

¹¹ Cote d'Azur Observatory of Universitu of Nice – Sophia Antipolis, France, Nice.

¹² JSC «Russian Space Systems», Russia, Moscow.

¹³ Institute of Radio Astronomy of National Academy of Sciences Ukraine, Ukraine, Kharkov.

Введение

Старт космического аппарата «Спектр-Р» проекта «Радиоастрон» состоялся **18 июля 2011 года в 05:31:17,91 (Декретное Московское Время)** с космодрома «Байконур». Аппарат с помощью ракеты-носителя «Зенит 2СБ.80» и разгонного блока «Фрегат-СБ» был выведен на заданную орбиту и штатно реализовал циклограмму первого сеанса. Управление КА «Спектр-Р» в полном объеме осуществляет Центр Управления Полетом (ЦУП) НПО им. С.А. Лавочкина. К настоящему времени в целом завершено выполнение программы летных испытаний служебных бортовых систем КА, подтверждены все основные характеристики наземно-космической системы, выполняется «ранняя научная программа наблюдений». Основные параметры бортового комплекса научной аппаратуры (БКНА) и служебных систем КА, а также результаты предпусковых испытаний описаны ранее в работах В.В. Хартова и Ю.А. Александрова с соавторами (*Хартов В. В.*, 2011; *Александров Ю.А., Андреев В.В., Бабакин Н.Г., Бабышкин В.Е. и др.*, 2011. С. 111-18; С. 19-30). В настоящей публикации подводятся итоги 10-месячного периода работ, знаменующего переход от летных испытаний к научной программе миссии «Радиоастрон». Представлены результаты летных испытаний БКНА в автономном режиме (без привлечения наземных радиотелескопов) и краткая информация о результатах испытаний наземно-космического интерферометра. Подробное описание летных испытаний космического радиотелескопа (КРТ) и наземно-космического интерферометра будет представлено отдельными публикациями в журналах «Астрономический журнал» и «*Astronomy & Astrophysics*». В данной статье также приведено описание эксперимента «Плазма-Ф» на этом КА (изучение потоков плазмы и энергичных частиц).

1. Задачи миссии «Радиоастрон»

Космическая миссия «Радиоастрон» – это уникальный по своим масштабам и сложности проект Роскосмоса, Российской Академии наук и международной научной кооперации по изучению Вселенной, воплотивший принципы РСДБ (радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинными базами), разработанные и реализованные с использованием КА «Спектр-Р». Космический радиотелескоп диаметром 10 метров на борту «Спектра-Р» в ходе научных наблюдений является элементом

наземно-космического интерферометра, вынесенным относительно наземных радиотелескопов на расстояние, ограниченное апогеем орбиты КА, которое составляет в настоящее время около 300 тыс. км. В качестве наземных элементов интерферометра используются крупнейшие радиотелескопы мира: 300-м *Аресибо* и 100-м ГБТ (США), 100-м *Эффельсберг* (Германия), интерферометр *Вестерборк* (Нидерланды), 70-м *Евпатория* (Украина), 64-м *Усуда* (Япония), 70-м *Тидбинбилла* (Австралия), Российская система «Квазар» и др. Выбранная вытянутая орбита КА «Спектр-Р» является сильно эволюционирующей, что позволяет в ходе полета вести наблюдение каждого объекта и различных участков небесной сферы в разных режимах для решения научных задач проекта.

Основными научными задачами проекта с использованием комплекса научной аппаратуры КРТ (Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева – АКЦ ФИАН) являются:

- исследование структуры и физических процессов ядер активных галактик и квазаров;
- определение ограничений на космологические параметры Вселенной;
- изучение процесса образования звезд и планетных систем по космическим мазерам;
- исследование микроквазаров, пульсаров и межзвездной среды.
- Основные задачи в части плазменно-волнового эксперимента «Плазма-Ф» (Институт космических исследований – ИКИ РАН):
- мониторинг основных параметров межпланетной среды;
- исследование высокочастотной турбулентности межпланетной среды и магнитосферы Земли.

КА «Спектр-Р» создан НПО им. С.А. Лавочкина на базе космической платформы «Навигатор», успешно отработанной на КА «Электро-Л», запущенном в начале 2011 г. Также в НПО им. С.А. Лавочкина по заданию АКЦ ФИАН (научный руководитель проекта «Радиоастрон» – академик РАН Н.С. Кардашев) создана уникальная конструкция космического телескопа, составившая основу бортового научного комплекса космического радиотелескопа.

2. Организация управления миссией. Организация работы ГОГУ «Спектр-Р»

Управление космическим комплексом (КК) «Спектр-Р» осуществляет главная оператив-



обсуждение первых научных результатов

ная группа управления (ГОГУ) (руководитель А.Е. Ширшаков, тех. руководитель М.И. Артюхов), созданная на базе НПО им. С.А. Лавочкина, с участием специалистов организаций-разработчиков бортовых систем (БС), наземного сегмента управления (НСУ) и наземного научного комплекса (ННК).

Совещания оперативно-технического руководства ГОГУ проводились еженедельно.

Принцип организации работы ГОГУ является традиционным для НПО им. С.А. Лавочкина. Группу управления (ГУ) (руководитель В.А. Молодцов, зам. руководителя А.З. Воробьев) и группу анализа (ГА) (руководитель М.Е. Чурикова) составляют специалисты отдела логики и управления КА, участвовавшие в проектировании КА и его наземных испытаниях, а также в подготовке и испытаниях средств наземного сегмента управления КА. В составе служб ГА – специалисты ОКБ, курирующие соответствующие бортовые системы, прошедшие все этапы проектирования и испытаний своих БС. Специалисты НПОЛ составляют также группу НСУ (руководитель И.Н. Мельников), баллистическую группу (БНО) (руководитель А.В. Погдин, зам. руководителя Е.Н. Филиппова), груп-

пы аппаратно-программных средств ЦУП-СР (Ю.В. Казакевич, А.В. Ефанов, И.В. Зефирин, Б.В. Мелешкин, М.С. Морозов и др.), группу наземной станции НС-3,7 (руководитель Э.Г. Чистов).

В составе ГОГУ функционируют также: оперативно-научная группа (ОНГ) научного центра планирования АКЦ ФИАН (Б.С. Новиков, М.В. Попов), оперативно-научная группа ИКИ по эксперименту «Плазма» (руководитель Г.Н. Застенкер), оперативно-техническая группа центра обработки научной информации (руководитель А.П. Мельник) и оперативно-техническая группа управления прибором БПИ (руководитель И.В. Чулков).

Обработку результатов измерения параметров орбиты, реконструкцию и прогнозирование орбиты КА обеспечивает оперативно-техническая группа баллистического центра (БЦ) Института прикладной математики (ИПМ) РАН (руководитель А.Г. Тучин).

Реально работа ГОГУ началась задолго до старта КА и была посвящена подготовке аппаратно-программных средств ЦУП-СР, программного обеспечения управления КА, эксплуатационной и организационно-технической документации,

обучению персонала, проведению автономных и комплексных испытаний НСУ, отладке взаимодействия ЦУП-СР со станциями управления и ННК, проведению тренировок ГОГУ. Такой традиционный для НПО им. С.А. Лавочкина подход к формированию ГОГУ, организации подготовки персонала и аппаратно-программных средств обеспечил готовность и надежное управление КА «Спектр-Р» с первых дней полета.

2.1. Организация управления космическим комплексом «Спектр-Р»

Особенность организации работы наземно-космического радиоинтерферометра «Радиоастрон» заключается в необходимости синхронного взаимодействия космического радиотелескопа, наземных радиотелескопов, наземных станций слежения, командно-измерительных станций управления КА (КИС), центра управления полетом КА, центра планирования научных экспериментов, баллистического центра, центров обработки научной информации, включая средства связи и коммуникаций.

На текущем этапе полета КА «Спектр-Р» основной задачей является выполнение программы научных наблюдений, реализуемых в ходе проведения специальных сеансов. Сеанс наблюдения (длительность от 1 до 20 часов) представляет собой последовательность операций, обеспечивающих регистрацию излучения наблюдаемого источника, преобразование полученных сигналов в цифровой вид, передачу полученной информации на наземную станцию слежения и сбора научной информации (НСС). Передача научных данных на выбранную НСС осуществлялась через высокоинформативный радиоканал (ВИРК) КРТ в Ку-диапазоне радиоволн (2 см) и управляемую от бортового комплекса управления (БКУ) бортовую остронаправленную антенну (ОНА) диаметром 1,5 м. КА «Спектр-Р» позволяет обеспечить работу последовательно с несколькими НСС. В настоящее время работает одна станция на базе радиотелескопа диаметром 22 метра (РТ-22) Пушинской радиоастрономической обсерватории.

Одновременно с космическим радиотелескопом этот же исследуемый источник наблюдается сетью наземных радиотелескопов. Существует более 20 радиотелескопов, оборудование которых совместимо с КРТ КА «Спектр-Р» и которые могут участвовать в таких согласованных наблюдениях. Участие соответствующих обсерваторий определяется выполняемой научной задачей.

В управлении КА используются командно-

измерительные наземные станции: «Кобальт-Р» в Медвежьих Озерах (Московская область) на базе антенного комплекса ТНА-1500 (МОКБ «МЭИ») и «Клен-Д» (г. Уссурийск) на базе антенного комплекса П-2500.

Средняя продолжительность сеанса управления около 4 часов. Использование сеансного режима управления КА ограниченной длительности обусловлено высокой стоимостью обслуживания наземных антенных комплексов. Преимущественно используется КИС в Медвежьих Озерах.

По решению ГОГУ передатчик бортового радиокомплекса не отключается по окончании сеанса для облегчения вхождения в связь в очередном сеансе (исключение составляют интервалы времени, когда работают приемники КРТ в ходе научных наблюдений). Кроме того, это позволяет контролировать телеметрическую информацию (ТМИ) КА на расстояниях до 120 тыс. км (при прохождении перицентра), используя наземную станцию НС-3,7 НПО им. С.А. Лавочкина.

Типовая программа сеанса управления состоит из операций:

- контроль ТМИ в режиме непосредственной передачи (текущей ТМИ);
- закладка в БКУ полетного задания системы управления движения (ПЗ СУД), ПЗ КНА, ПЗ системы управления (СУ) ОНА, ПЗ телеметрической системы (ТМС), командно-программной информации (КПИ) баллистико-навигационного обеспечения (примерно один раз в пять суток), а также отдельных кодовых команд прямого и отложенного во времени действия;
- контроль ТМИ воспроизведения запоминающего устройства и системы контроля электризации;
- контроль орбиты КА;
- разгрузка КУДМ;
- воспроизведение научной ТМИ системы сбора научной информации (ССНИ) комплекса «Плазма-Ф»;
- закладка КПИ управления научной аппаратурой комплекса «Плазма-Ф»;
- контроль орбиты КА.

В ходе сеанса управления на борту КА в виде группы полетных заданий закладывается рабочая программа, обеспечивающая выполнение в автономном режиме следующих задач типового цикла работ с КА «Спектр-Р».

Проведение сеансов наблюдения источников, состоящих из отдельных операций:

- последовательные развороты КА в ориентацию, обеспечивающую наведение КРТ на исследуемый источник и ОНА на НСС «Пушино»;

- включение требуемых режимов работы аппаратуры КРТ на время наблюдений;
- обратные развороты КА в исходную ориентацию;

проведение юстировки КРТ:

- операции, аналогичные сеансу наблюдения, но с реализацией циклограммы последовательных переориентаций КА относительно направления на тестовый источник без наведения ОНА на НСС «Пушино» (информация КРТ записывается на запоминающее устройство (ЗУ) и воспроизводится в очередном сеансе управления). В случае если, по прогнозу температурного режима, требуемая ориентация КА приведет к ухудшению температурного режима балки ВИРК, привода ОНА, передатчика (ПРД) ВИРК, предусматривается перевод ОНА на это время в положение, соответствующее положению Солнца в осях КА;

проведение лазерной локации КА:

- операция – переориентация КА на 1 час в положение, обеспечивающее направление оси «-X» КА на Землю;

обеспечение ориентации КА, требуемой для прибора МЭП из состава комплекса «Плазма-Ф», при которой Солнце находится под углом 100° к оси «+X» длительностью до 6 часов с переводом ОНА в заданное положение;

циклические астрокоррекции положения КА.

Последовательность операций наблюдения источников, юстировок и лазерной локации определяется «Научной месячной программой работы», формируемой ОНГ КРТ (АКЦ ФИАН) с учетом научных задач, текущих баллистических параметров орбиты, текущих ограничений на задействование наземных радиотелескопов и ограничений по длительности режимов наблюдений в определенных ориентациях КА, характеризующихся положением Солнца в осях аппарата и положением ОНА. В ЦУП-СР «Научная месячная программа работы» проходит проверку на реализуемость с точки зрения учета всех ограничений в группе БНО полета и в группе систем обеспечения теплового режима (СОТР). В группе СОТР накоплен большой статистический материал, позволяющий с требуемой точностью прогнозировать изменение температурного поля в критических элементах конструкции КА в зависимости от положения Солнца и ОНА. Ведется работа над автоматизацией необходимых расчетов для повышения оперативности и надежности прогноза, а также для обеспечения возможности оценки прогноза специалистами АКЦ на этапе формирования «Научной месячной программы работы». В работе группы СОТР используется также специально разработанная

трехмерная модель КА, обеспечивающая визуализацию освещенности элементов конструкции КА при различных положениях Солнца и ОНА.

На основе «Научной месячной программы работы» ГУ разрабатывает «Программу работы КА «Спектр-Р» на месяц. В соответствии с заявкой подгруппы ОНГ (руководитель А.А. Петрукович) по предпочтительным участкам специальной ориентации КА для обеспечения оптимальных условий работы прибора МЭП в программу включаются дополнительные операции переориентации КА. «Программа работы КА «Спектр-Р» утверждается ОТР ГОГУ и является основным документом, обеспечивающим координацию оперативной работы всех элементов КА «Спектр-Р». Программа содержит план проведения сеансов на очередной месяц, план всех основных операций с КА, план работы станций управления, станций слежения, наземных радиотелескопов, станций лазерной локации.

Задействование станций управления осуществляет группа НСУ, НСС и наземных радиотелескопов – ОНГ КРТ, станций лазерной локации – группа баллистического и навигационного обеспечения БНО ИПМ.

За сутки до проведения очередного сеанса ГУ в соответствии с месячной «Программой работы КА «Спектр-Р» и на основе типовых программ разрабатывает «Программу сеанса управления». Данные по навигации КА и ОНА рассчитываются группой БНО ЦУП-СР. Формирование полетных заданий управления научной аппаратурой комплекса КРТ и комплекса «Плазма-Ф» производится автоматически на основе КПИ, подготовленной ОНГ КРТ и ОНГ «Плазма-Ф» соответственно. Программа сеанса формируется в виде управляющего файла, содержащего КПИ управления КА и команды управления КИС. Проверка корректности составленной программы осуществляется с использованием информационно-логического стенда бортового комплекса управления, построенного на основе модели БКУ, полностью соответствующей в своей программной части реальному БКУ КА «Спектр-Р». Моделирование осуществляется последовательными интервалами времени: от начала тестируемого сеанса до начала следующего планируемого сеанса – 1-2 суток полета.

Реализация программы сеанса связи проходит в автоматическом режиме с получением от КА и от КИС подтверждающей контрольной информации. В ходе сеанса поступающая с КИС телеметрия КА обрабатывается на средствах ЦУП-СР, анализируется специалистами ГА, передается в центры обработки научной информации АКЦ и ИКИ. Результаты измерений параметров орбиты

КА поступают из КИС в ЦУП-СР и далее в ИПМ.

По мере выполнения задач программы летных испытаний БС КА число привлекаемых к оперативной работе специалистов ГА уменьшалось. К настоящему времени только специалисты группы комплексного анализа, службы БКУ и службы СОТР постоянно участвуют в оперативном контроле ТМИ КА. В анализе ТМИ используется программа автоматизированного контроля важных параметров КА на соответствие допускам и на соответствие спрогнозированным значениям, полученным при моделировании сеанса на стенде БКУ. Службы БС имеют возможность контролировать ТМИ вне ЦУПа на своих производственных рабочих местах. Специалисты ОНГ КРТ и «Плазма-Ф», получая служебную ТМИ из ЦУПа в реальном времени, контролируют функционирование КНА, находясь в АКЦ и ИКИ соответственно. При необходимости, в случае замечаний к работе КНА в ходе сеанса управления ОНГ выдают в ГУ заявки на оперативную выдачу дополнительной КПИ в адрес КНА.

Ещё до начала проведения всего цикла испытаний с КА была создана, испытана и полностью подготовлена к работе наземная станция слежения на базе радиотелескопа РТ-22 в Пушино.

В ходе сеансов научных наблюдений также осуществляется контроль состояния КА. Для этого из НСС, принимающей поток научной информации, в ЦУП-СР передается выделенная из заголовков научных кадров служебная ТМИ, которая обрабатывается и используется так же, как ТМИ БАКИС.

Описанная выше организация управления КА «Спектр-Р» и коллектив ГОГУ обеспечили оперативное и надежное управление миссией на первом, наиболее напряженном, этапе полета КА.

3. Выполнение программы полета КА «Спектр-Р». Хроника основных событий

Процесс выведения КА «Спектр-Р» ракетой-носителем «Зенит» и разгонным блоком «Фрегат-СБ» контролировался в ЦУП НПО им. С.А. Лавочкина по ТМИ РБ «Фрегат» и прошел полностью штатно. Время отделения КА «Спектр-Р» от РБ «Фрегат-СБ» было выбрано таким образом, чтобы к моменту готовности к работе бортового радиокомплекса (БАКИС), запитанного по контакту отделения, борт оказался в зоне видимости станции в Медвежьих Озерах и станции, расположенной в ФГУП РКС (3,8 м), привлеченной к работе дополнительно к основным средствам ввиду ожидаемых трудностей по

наведению на КА больших антенн на начальном участке орбиты. Сигнал с КА «Спектр-Р» был получен 18.07.2011 в 09:12:32 антенной Российских космических систем (РКС), затем к приему ТМИ подключились станция НС-3,7 и станция в Медвежьих Озерах. ТМИ КА показала готовность БКУ и штатное выполнение циклограммы приземного сеанса, включая раскрытие панелей солнечных батарей, штанги магнитометра, малонаправленных антенн (МНА), расчеховку ОНА и т.д., подготовку командных приборов БКУ и двигательной установки (ДУ), успокоение, поиск и приведение Солнца, завершившиеся построением постоянной солнечной ориентации, переход на стабилизацию с помощью двигателей маховиков. Дополнительно в сеансе по командам с Земли в соответствии с программой были проведены траекторные измерения, воспроизведена информация ЛСЗУ (линейное статическое запоминающее устройство), введен на борт код бортовой шкалы времени (БШВ), проведена настройка алгоритмов управления системой энергоснабжения (СЭС) и системой обеспечения температурного режима, включены термостаты бортовых водородных стандартов частоты (БВСЧ), система контроля электризации и разрядов (СКЭ-Р); балка ВИРК переведена в рабочее положение.

Начались интенсивные проверки функционирования бортовых систем, регулярные измерения параметров орбиты КА.

На 22.07.11 была запланирована операция раскрытия рефлектора КРТ. Производить раскрытие требовалось при определенной освещенности КА Солнцем, обеспечивающей температуру до -80°C в узле зачеховки лепестков рефлектора (112° от оси «+X» с выходом Солнца на 10° из плоскости XOZ в сторону оси «+Y»). Чтобы перейти в эту ориентацию из текущего режима постоянной солнечной ориентации (Солнце в 165° от оси «+X»), требовалось перевести КА в режим трехосной инерциальной ориентации (ИНО). В течение 19 и 20 июля был проведен ряд технологических операций: закладка на борт баллистического прогноза, коррекция бортовой шкалы времени, разгрузка двигателей-маховиков, проверка управления СОСБ. Параллельно проводились операции по включению рабочего режима термостата БВСЧ. 21.07.11 сначала был получен режим ИНО в постоянной солнечной ориентации (ПСО), затем в режиме ИНО КА был переориентирован в положение 112° , а вскоре по рекомендации службы СОТР – в более благоприятное положение 107° .

Утром 22.07.11 была произведена разблокировка узлов переходной фермы КРТ и расчехов-

ка лепестков КРТ. В 08:44:54 по кодовой команде с Земли привод механизма раскрытия был включен в первом диапазоне работы, и началось движение лепестков. Вблизи конечной фазы раскрытия произошел останов привода по сигналу превышения граничного значения тянущего усилия троса (648 кг·с). Включение привода во втором диапазоне также было остановлено срабатыванием защиты (1450 кг·с). По результатам анализа ситуации было решено изменить ориентацию КА на положение, при котором лепестки рефлектора КРТ были бы освещены Солнцем более равномерно. Предельное допустимое значение угла Солнца от оси «+X» составляет 165°. Было выбрано значение 164°, и аппарат был переориентирован. Несколько попыток прямого движения и реверса не дали результата. Для обеспечения подогрева лепестков были включены их нагреватели. Операция раскрытия была продолжена 23.07.11. Режимы реверса и прямого хода на 2-м диапазоне обеспечили срабатывание датчика положения в конечной фазе раскрытия, который настроен так, чтобы его срабатывание произошло в момент, когда лепесткам остается пройти один миллиметр до упора в дно конической воронки узла. Таким образом, операция раскрытия рефлектора была успешно завершена, после чего была выдана команда на расчеховку механизма стопорения рефлектора, зафиксировавшего положение лепестков КРТ.

В ходе этого сеанса было обнаружено прекращение работы части нагревателей из-за отказа секции 8-го блока управления нагревателями (БУЗ) БКУ. По рекомендации службы СОТР, КА был переведен в ориентацию, соответствующую положению Солнца 107°. В дальнейшем в качестве профилактической меры были разработаны рекомендации по снижению тока нагрузки на БУЗ БКУ путем изменения настроек управления нагревателями.

25.07.11 успешно проведено выведение ОНА из транспортного положения в рабочее путем разворота по одной из осей. В ходе операции зафиксирована зависимость температуры балки и ПРД ВИРК, прибора фазовой синхронизации (ПФС) КРТ, привода ОНА и других элементов КА от положения ОНА и положения Солнца в осях КА, что в дальнейшем учитывалось при планировании работ.

В эти же дни возникли сложности с включением в рабочий режим термостатов БВСЧ из-за нештатного режима работы теплопровода радиатора аппаратуры СОТР БВСЧ. Для запуска теплопровода в итоге был использован тепловой поток от Земли в момент пролета КА на минимальном от нее расстоянии при первом прохож-

дении перицентра орбиты 26.07.11. По заложенной на борт циклограмме на заданное время был включен термоэлектрический модуль холодильника (ТЭМХ) в прямой полярности, а затем включены термостаты БВСЧ. После подтверждения стабильной работы СОТР БВСЧ был включен на полную мощность.

С первых дней в соответствии с программой полета ежедневно в сеансах связи проводились проверки функционирования БС в различных режимах с целью завершения в целом летных испытаний модуля служебных систем в течение трех месяцев полета.

С 25.07.11 начаты пробные включения аппаратуры комплекса «Плазма-Ф» с регистрацией данных на систему сбора научной информации (ССНИ).

03.08.11 был включен передатчик прибора фазовой синхронизации КРТ. Первый прием сигнала ПФС на наземной станции в Пушино состоялся 13.08.11, когда в районе перицентра возникла возможность наведения ОНА на Землю для передачи сигнала при соответствующей ориентации КА. Успешное проведение сеанса подтвердило работоспособность ПФС, алгоритмов наведения ОНА, и самой НСС в Пушино.

18.08.11 было произведено первое включение ПРД ВИРК (2-го комплекта). Работа ПРД была неустойчивой и сопровождалась повышенным тепловыделением. Для обеспечения приемлемого температурного режима ПРД была реализована следующая схема управления: при достижении предельной температуры (50°C) ПРД по командам с Земли переводился в режим записания, а при охлаждении до 7°C снова включался в режим «40 Вт». После установления временных интервалов этого процесса, команды были заложены на борт и далее выдавались по времени автоматически.

21.08.11 в районе перицентра ОНА была наведена на НСС «Пушино» и состоялся первый прием сигнала ПРД ВИРК. Впоследствии ПРД2 ВИРК был переведен в дежурный режим работы «4 Вт», однако замечания к его работе продолжались. В дальнейшем в связи с улучшением баллистических условий наведения ОНА на НСС в Пушино, число таких сеансов увеличивалось. Проводились сеансы юстировки ОНА с целью повышения точности ее наведения. 31.08.11 в связи с замечаниями к работе 1-го комплекта БВСЧ был включен 2-й комплект, который заработал штатно.

Одновременно проводились проверки бортовых систем и настроечные работы с БКУ: отладка выполнения типовых полетных операций, идентификация динамической схемы КА, тести-

рование граней, калибровка ГИВУС, контроль режима САД, отработка циклограммы юстировки ОНА, отработка циклограммы юстировки КРТ, оценка точности стабилизации КА в режиме научных наблюдений. С целью повышения надежности работы БС производилась коррекция бортового программного обеспечения БКУ.

В сентябре 2011 г. в целом было завершено выполнение программы летных испытаний бортовых систем космической платформы «Навигатор», подтвердивших соответствие БС техническим требованиям.

В дальнейшем продолжался набор статистического материала, по рекомендации МОКБ «Марс» проводились операции по сбору дополнительной исследовательской информации по работе БКУ, выполнялись операции по подтверждению характеристик БКУ, СЭС, СОТР, БАКИС и т.д.

В сентябре-октябре проводились пробные включения приемников КРТ в разных диапазонах, сеансы юстировки КРТ по источникам: Кассиопея А, Крабовидная туманность и Луна для измерения диаграммы направленности КРТ и оценки эффективной площади. 10.10.11 взамен 2-го комплекта передатчика ВИРК включен 1-й комплект в режиме «40 Вт», что дало увеличение сигнала на 9 дБ. Проведены первые наблюдения источников с передачей информации по линии ВИРК на НСС «Пушино» – подтверждена работоспособность всего тракта. В ряде сеансов успешно выделялась служебная ТМИ из заголовков научных кадров и передавалась для обработки в ЦУП-СР. В сентябре начато проведение сеансов лазерной локации КА.

В ноябре была подтверждена стабильность характеристик КРТ при различных условиях освещенности Солнцем: была повторена юстировка по Крабовидной туманности после суточного отворота КРТ от исходного положения. Продолжались юстировки ОНА с уточнением матрицы положения ОНА. Был введен режим слежения ОНА с отключением привода в паузах движения с целью увеличения длительности слежения за счет снижения тепловыделения привода.

С середины ноября были начаты интерферометрические наблюдения с привлечением наземных радиотелескопов с целью получения интерферометрического отклика. В декабре проведена первая серия интерферометрических наблюдений одного и того же источника на все более возрастающей наблюдательной базе (максимальная – 300 тыс. км). Была проведена серия юстировок ОНА с наведением ОНА на НСС «Пушино» в разных положениях с одновременным противофазным движением КА, так что передача сиг-

нала на Пушино не прекращалась. Результаты эксперимента подтвердили отсутствие влияния корпуса КА и механических связей на работу ОНА и укрепили сомнения в правильности совмещенности её поляризации и наземной антенн.

В январе 2012 г. прошла серия наблюдений на базе, изменяющейся от 25 до 200 тыс. км. 19.01.12 проведена проверка поляризационных свойств тракта ВИРК КРТ–НСС «Пушино» путем вращения КА вокруг направления на НСС. Эта динамическая операция стала возможной благодаря сложившимся благоприятным баллистическим условиям: угол Солнце–Объект–Земля составлял 5° , поэтому, вращаясь вокруг направления на Землю, КА фактически вращался и вокруг направления на Солнце, что не нарушало ограничений по возможной ориентации КА. В ходе разворота на 720° с постоянной скоростью зафиксировано повторяющееся плавное изменение уровня сигнала на 8-9 дБ, что не находило объяснения и требовало дальнейшего исследования.

14.02.12 по заявке АКЦ была проведена проверка поляризационных свойств КРТ путем наблюдений поляризованного излучения источника Orion KL при вращении КА относительно электрической оси диаграммы направленности КРТ, направленной по оси «+X» КА. Решение о проведении операции было принято после тщательной оценки условий эксперимента всеми службами группы анализа, так как в ходе вращения угол выхода Солнца из связанной плоскости XOZ изменялся в пределах от -24 до 24 град при разрешенном значении $\pm 10^\circ$. Операция прошла без замечаний и подтвердила характеристики КРТ.

Сделанный ИПМ РАН прогноз эволюции орбиты КА показал, что при сохранении модели действующих на КА сил в январе 2013 года солнечная тень составит 5,7 час, а баллистическое существование КА закончится в январе 2014-го. По согласованию с АКЦ и ИКИ было решено провести коррекцию в два этапа: 21.02.12 – прожиг и первый импульс, 01.03.12 – второй импульс, величина которого рассчитывается по результатам ИТНП после реализации первого импульса. Коррекции прошли штатно. Включение ДУ производилось в районе апоцентра орбиты. Величина обоих импульсов составила 1,86 м/с.

19.03.12 на НСС «Пушино» было произведено изменение направления круговой поляризации облучателя антенны РТ-22, что повысило уровень принимаемого сигнала на ~ 8 дБ и сняло вопросы по обеспечению надежного приема сигнала по каналу ВИРК и качеству выделяемой служебной телеметрической информации.

Начиная с января 2012 г. дополнительно к про-

грамме наблюдений и юстировок КРТ по заявке ОНГ «Плазма-Ф» реализовывалась программа перевода КА на интервал времени до 6 часов в ориентацию, оптимальную для работы прибора МЭП (Солнце в плоскости «ХОZ» и в 100° от оси «+X»). Интервалы выбирались на участках орбиты КА, представляющих для данного эксперимента наибольший интерес: прохождение ударной волны, магнитопаузы и т.д. В апреле таких сеансов было одиннадцать.

В течение всего полета, начиная с сентября 2011 г., использовались все возможности в части КА для проведения сеансов лазерной локации с целью уточнения параметров орбиты КА и калибровки штатной радиотехнической системы. Так, в марте 2012 г. был проведен 21 сеанс ориентации КА, необходимой для проведения лазерных измерений в апреле – семь сеансов. Лазерные измерения дальности являются очень точным и информативным источником орбитальной информации, однако возможность их проведения зависит от погодных условий и мощности наземных станций лазерной локации. Большинство станций лазерной локации рассчитаны на работу с низкими аппаратами и не способны зафиксировать отраженный сигнал от аппаратов, находящихся выше геостационарной области. «Спектр-Р» является первым аппаратом с установленными уголковыми отражателями, удаляющийся на расстояния, сопоставимые с лунными. Станций, способных проводить локацию на таких расстояниях, немного, и не все из них приспособлены для локации космических аппаратов. Впервые провести лазерную локацию «Спектра-Р» удалось 15 ноября французской обсерваторией Observatoire de la Cote d'Azur, позже удалось получить измерения при помощи специализированного лазерного оптического локатора контроля космического пространства на Северном Кавказе. Успешно проведенные в течение трех суток подряд 22, 23, 24 января 2012 года сеансы лазерной дальнометрии позволили провести калибровку штатных радиотехнических средств в Уссурийске и Медвежьих Озерах. В целом, однако, результативность этих работ оставалась крайне низкой. Основными причинами являлись плохая погода и неготовность наземных технических средств.

Баллистические условия в мае-августе 2012 года неблагоприятны для проведения сеансов лазерной дальнометрии. Так, в мае запланировано всего четыре сеанса лазерной дальнометрии, в июне – два. Ошибки прогноза параметров движения КА на текущее время в основном не превышают по положению ± 600 м, по полной скорости ± 0.02 м/с, по полному ускорению

$\pm 10^{-8}$ м/с², что соответствует требованиям ТТЗ. С целью дальнейшего уточнения прогноза предусматриваются меры по повышению эффективности использования средств лазерной локации и повышению точности измерений наземных станций управления.

Программа первых десяти месяцев полета КА «Спектр-Р» выполнена полностью.

4. Результаты испытаний служебных бортовых систем

В сентябре 2011 года в целом завершено выполнение программы летных испытаний бортовых систем космической платформы «Навигатор», подтвердивших соответствие БС техническим требованиям.

В дальнейшем одновременно с выполнением научных экспериментов продолжался набор статистического материала. Проводились операции по сбору дополнительной информации о работе БКУ, по подтверждению характеристик БКУ, СЭС, СОТР, БАКИС и т.д.

Обеспечено выполнение всех задач прошедших этапов полета и выполнение программы летных испытаний бортовых систем. Успешно проведена уникальная операция раскрытия лепестков рефлектора КРТ. Характеристики БС в целом подтверждены. Неподтвержденными на текущий момент остались некоторые режимы, реализация которых предусматривается в нештатных ситуациях с КА (закрутка КА при потере ориентации, повторное включение БКУ и т.д.), и преднамеренное создание которых запрещено эксплуатационной документацией.

По ряду параметров БС, в частности по БКУ (разработчик – МОКБ «Марс»), характеристики существенно выше требований ТЗ. Так, точность стабилизации КА в сеансе научных наблюдений по углу – не хуже $0,9$ угл. сек (по ТЗ – $2,5$ угл. сек), по скорости – $4 \cdot 10^{-5}$ гр/с (по ТЗ – $5 \cdot 10^{-4}$ гр/с). Максимальная интегральная погрешность определения и поддержания ориентации КА не превышает по модулю 9 угл. сек (по ТЗ – 18 угл. сек). Максимальная погрешность наведения ОНА существенно ниже требования ТТЗ и не превышает 15 угл. мин. Перечисленные параметры подтверждены результатами обработки научных данных, полученных в ходе астрономических юстировочных и калибровочных сеансов с использованием КРТ.

Система электроснабжения обеспечивает штатное питание БС на всех участках орбиты, включая теневые участки. Мощность солнечных батарей составляет ~ 2608 Вт, ток фотоэлектрической батареи ~ 48 А, что гарантированно пок-

таблица 1 – Параметры орбиты КА «Спектр-Р»

| дата | радиус апоцентра, тыс. км | радиус перицентра, тыс. км | период обращ-я, сутки | наклонение, град | аргумент перигея, (град) | долгота восходящего узла, град |
|------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|--------------------------------|
| 18.07.2011 | 339,9 | 6,95 | 8,32 | 51,6 | 302 | 342,2 |
| 26.05.2012 | 294,9 | 68,2 | 8,91 | 80 | 326,3 | 298,7 |

рывает потребности служебных систем и научного комплекса КА «Спектр-Р».

Двигательная установка обеспечила штатное функционирование в ходе построения солнечной ориентации в первом сеансе, проведение регулярных разгрузок двигателей-маховиков, выполнение коррекции орбиты КА. За время полета истрачено 10,3 кг топлива при начальной заправке 287,03 кг. На проведение коррекции потрачено 6 кг топлива. На разгрузку комплекса управляющих двигателей-маховиков не чаще одного раза в сутки расходуется около 10 гр топлива.

Сформированная в ходе коррекции орбита КА в соответствии с требованиями научного эксперимента продолжает оставаться сильно эволюционирующей (таблица 1).

Орбита обеспечивает:

- баллистическое существование КА не менее чем до середины 2018 г. (минимальная высота КА над поверхностью Земли не меньше 640 км);
- отсутствие до начала 2017 г. непрерывных интервалов солнечной тени длительностью более 2,2 часа;
- сохранение эволюции орбиты КА для обеспечения эффективных научных исследований.

Бортовые системы первой российской космической прецизионной платформы в негерметичном исполнении «Навигатор» функциони-

руют штатно. Подтвержден высокий уровень разработки, испытаний на земле и управления в полете бортовыми системами космической платформы «Навигатор», что позволило успешно выполнить в трех месячный срок программу летных испытаний служебных бортовых систем КА «Спектр-Р» и обеспечить условия реализации научной программы работы.

5. Результаты лётных испытаний космического радиотелескопа. Измерение параметров КРТ по космическим радиоисточникам, включая определение эффективной площади и диаграммы направленности

Для определения чувствительности радиоастрономического комплекса осуществлялся прием радиоизлучения от ярких космических источников с известными уровнями спектральной плотности потока. В качестве таких радиоисточников использовались: Кассиопея А и Крабовидная туманность (остатки вспышек сверхновых звезд в нашей Галактике), Луна, Юпитер и внегалактические источники, далекие яркие галактики, Лебедь А, 3С84, 3С273,

таблица 2 – Основные параметры КРТ, основанные на измеренных величинах эффективной площади и шумовой температуры

| диапазон | Р (92 см) | L (18 см) | С (6 см) | К (1,35 см) |
|---|-----------|-----------|----------|-------------|
| центральная частота, ГГц | 0,327 | 1,665 | 4,830 | 22,220 |
| ширина регистрируемой полосы, МГц | 16 | 32 | 32 | 32 |
| шумовая температура, К | 200 | 45 | 130 | 77 |
| эффективность антенны | 0,38 | 0,52 | 0,45 | 0,1 |
| угловое разрешение, мкс | 540 | 106 | 37 | 8 |
| эквивалентный поток шумов системы, Ян | 19000 | 3400 | 10500 | 30000 |
| чувствительность интерферометра – 1σ, мЯн | 46 | 5 | 5 | 20 |

3C274 (Дева А) и 3C279. Интегральная плотность потока радиоизлучения указанных выше радиоисточников известна по наземным измерениям, опубликованным в работах (Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A., 1977; Ott M., Witzel A., Quirrenbach A., Krichbaum T.P. et al., 1994). Мы использовали данные патрулирования переменности некоторых из них на телескопе РАТАН-600 Специальной Астрофизической Обсерватории РАН и на телескопе *Эффельсберг*. Описание программ см. в (Ott M., Witzel A., Quirrenbach A., Krichbaum T.P. et al., 1994; Kovalev Y.Y., Nizhelsky N.A., Kovalev Yu.A., Berlin A.B. et al., 1999). Анализ измерений подтверждает расчетный уровень чувствительности в диапазонах 92 см и 18 см. В диапазонах 6 см и 1,35 см обнаружено понижение чувствительности по отношению к расчетной. Измеренные значения шумов системы (в градусах К и в единицах спектральной плотности потока Ян) и эффективности антенны КРТ (коэффициент использования площади), а также некоторые параметры интерферометра приведены в таблице 2.

Комментарий к таблице 2. Ширина регистрируемой полосы сигнала приведена для одиночного поляризационного канала; наблюдения и регистрация научных данных проводятся для двух каналов ортогональных поляризаций одновременно. В последней строке таблицы приведена чувствительность наземно-космического интерферометра при работе со 100-м наземным радиотелескопом при времени интегрирования 5 минут.

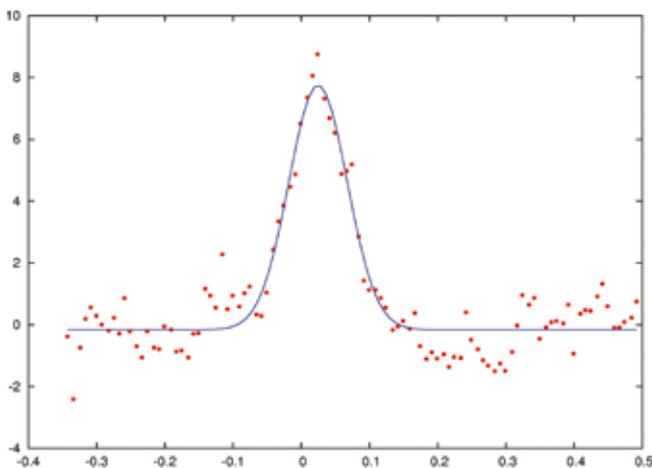


рисунок 1. Пример результата сканирования радиогалактики 3C84 на волне 1,35 см (вращение около оси «Z»). Сплошная линия представляет собой аппроксимацию измеренных точек гауссианой. Ось абсцисс оцифрована в градусах, ось ординат – амплитуда сигнала в относительных единицах

Измерения диаграммы направленности антенны КРТ проводились одновременно с определением чувствительности приемной системы путем программного сканирования в направлении радиоисточников, упомянутых выше, и с записью радиометрических выходов всех каналов приемников на бортовое запоминающее устройство с тактовой частотой 1 Гц. При этом использовано несколько режимов сканирования по траекториям «крест» и «решетка» с размахами сканов от одного до двадцати градусов, причем для длинных сканов применялась угловая скорость вращения 0,01 гр/с, для коротких – 0,005 гр/с. Все режимы сканирования проходили штатно, не было обнаружено отклонений от заданной траектории в пределах 30 угловых секунд (по максимальной ошибке).

В приведенном примере на рисунке 1 измеренная полуширина диаграммы направленности КРТ составляет 360 угловых секунд, плотность потока радиоизлучения на эпоху наблюдения ~24 Ян, постоянная времени интегрирования 1 сек, полная полоса приема по радиометрическому выходу 200 МГц.

Ширина и форма диаграммы направленности КРТ оказались близкими к расчетным в диапазонах 92, 18 и 6 см. Измеренные полуширины составили 370, 72 и 25 угловых минуты соответственно (с погрешностью 5%). В диапазоне 1,35 см форма диаграммы направленности оказалась различной при сканировании по осям «Y» и «Z». При вращении около оси «Z» полуширина главного лепестка близка к расчетной и составляет 360 угловых секунд – значение среднее по измерениям (расчетное значение 340), а при вращении около оси «Y» полуширина главного лепестка оказалась шире – 780 угловых секунд. Последнее значение и измеренная величина эффективности антенны на волне 1,35 см могут свидетельствовать о систематической деформации профиля антенны КРТ в допустимых пределах.

В сеансах юстировки были определены поправки к положению электрической оси диаграммы направленности в приборной системе координат, привязанной к оптическим датчикам. Эти поправки оказались небольшими и составили $-2,5 \pm 1,2$ угловых минут для поворота около оси «Z» и $0,0 \pm 1,5$ угловых минут для поворота около оси «Y». Эти значения сохранялись в течение всего полугодичного контрольного периода. Поправка величиной $-2,5 \pm 1,2$ угловых минут для оси «Z» учитывается при наведении КРТ, начиная с декабря 2011 г. Наведение КРТ на исследуемые объекты и стабилизация в заданном направлении всегда производились с точностью ± 2

секунды (среднеквадратическое значение), что на порядок превышает технические требования.

По результатам испытаний приемников выявлено, что в диапазоне 6 см невозможно использование двух поляризационных каналов, скорее всего из-за их взаимного возбуждения. В процессе проведения интерферометрических наблюдений в этом диапазоне оказалось, что из двух поляризационных каналов высокая чувствительность и заданная форма полосы автоспектра регистрируемого сигнала реализуются только в канале с правой круговой поляризацией.

Бортовой приемник диапазона К имеет восемь частотных каналов от 18,392 до 25,112 ГГц; измерения чувствительности выполнены во всех каналах. Этот приемник может использоваться в специальном режиме многочастотного синтеза; такой режим значительно повышает потенциальные возможности построения радиозображений с помощью наземно-космического интерферометра.

5.1. Контроль функционирования по наблюдениям специальных радиисточников

Космический 10-м КРТ 29 и 30 октября был направлен на источник мазерного радиоизлучения в линиях молекулы гидроксила ОН на частоте 1665 МГц и в линии водяного пара H₂O (22232 МГц). Частоты этих радиолиний попадают в диапазоны научного приемного комплекса «Радиоастрон» 18 см и 1,35 см соответственно. Выбранный источник мазерного радиоизлучения W3(OH) находится на расстоянии 2 кило-

парсека в нашей Галактике в области звездообразования, содержащей массивную протозвезду, окруженную газово-пылевым облаком.

Радиоизлучение источника, принятое 10-м космическим радиотелескопом, было оцифровано бортовым форматором и передано высокоинформативным бортовым радиокомплексом через ортонаправленную антенну на НСС в Пушино, где принятый сигнал был декодирован и записан на штатную систему регистрации научных данных. Зарегистрированные данные были переданы по широкополосному каналу в Центр обработки научной информации (ЦОНИ) АКЦ ФИАН. Оперативный анализ данных подтвердил наличие радиолиний на ожидаемом положении в спектре и с ожидаемой амплитудой как в диапазоне 18 см, так и в диапазоне 1,35 см. Пример спектра источника W3(OH) показан на рисунке 2.

На рисунке 3 приводится спектр, содержащий радиолинии молекулы водяного пара H₂O, полученный 10-м антенной КРТ в диапазоне 1,35 см от источника Orion KL, расположенного в области звездообразования в созвездии Ориона.

Также в режиме одиночного телескопа было зарегистрировано радиоизлучение яркого пульсара B0329+54 в диапазоне 92 см. В результате обработки данных получен средний профиль импульса этого пульсара. Другой пульсар B0531+21, расположенный в Крабовидной туманности, излучает гигантские радиоимпульсы, во много тысяч раз превышающие по энергии регулярное импульсы пульсара – см., например, (Попов М.В., Согласнов В.А., Кондратьев В.И., Костюк С.В. и др., 2006). Эти гигантские импульсы были зарегистрированы 15 ноября 2011 года одновременно

Радиоастрон, источник W3(OH), диапазон L, 15 декабря 2011 г.

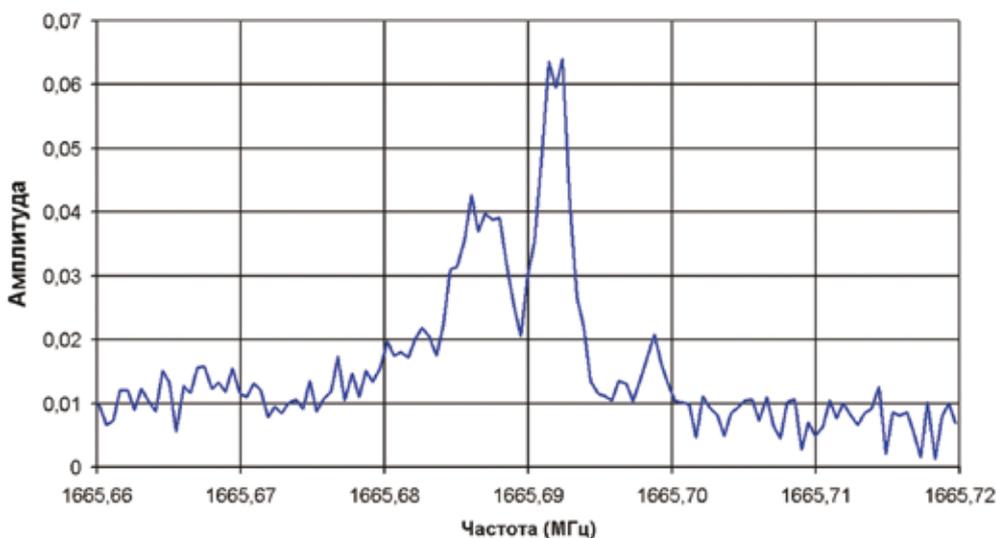


рисунок 2. Радиолинии молекулы гидроксила ОН, детектированные КРТ на частоте 1665 МГц от галактического источника W3(OH) в канале с левой круговой поляризацией

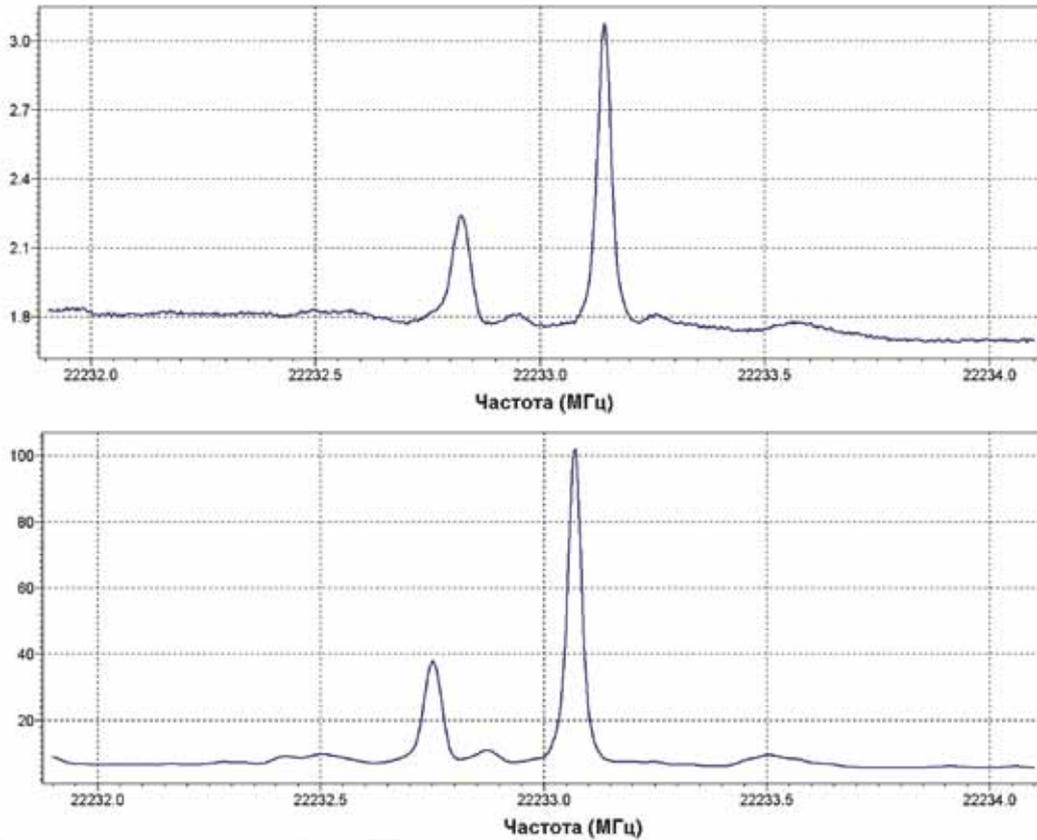


рисунок 3. Спектр радиоисточника Orion KL, излучающего мощные мазерные радиолнии молекулы водяного пара. Верху: спектр, полученный КРТ; внизу: спектр с наземного радиотелескопа. Смещение линий связано с движением КА «Спектр-Р»

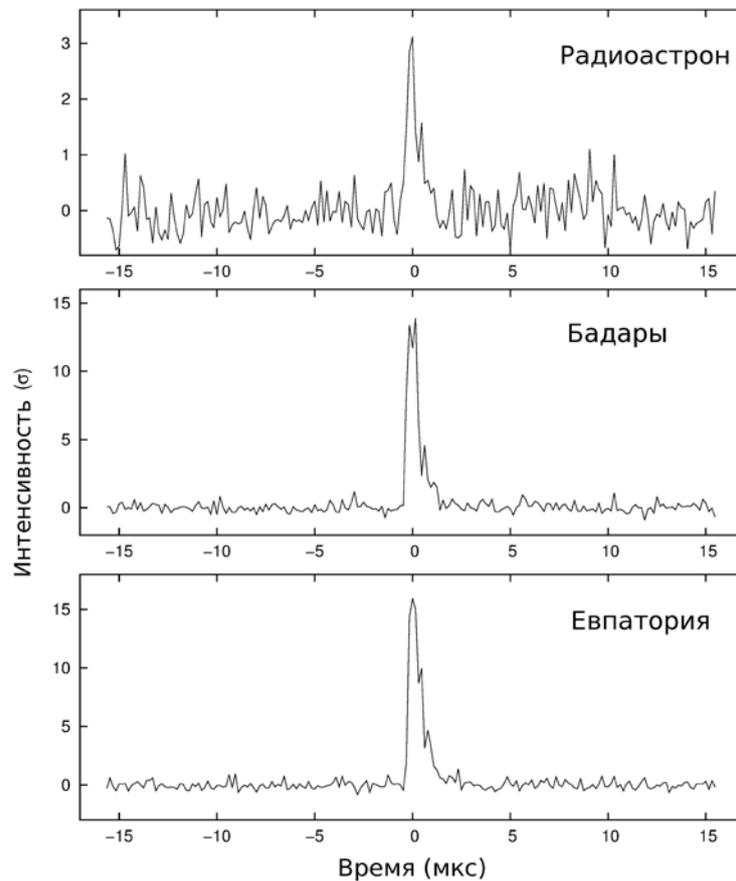


рисунок 4. Пример гигантского импульса от пульсара в Крабовидной туманности, измеренного на КРТ «Радиоастрон», Российском 32-м «Бадары» и Украинском 70-м «Евпатория» в диапазоне 18 см

на космическом телескопе и на наземных радиотелескопах. Их можно использовать для синхронизации бортовых и наземных часов и для уточнения орбиты КА. На рисунке 4 показан пример такого гигантского радиоимпульса.

5.2. Проверка функционирования в режиме наземно-космического интерферометра (первые лепестки)

Функционирование наземно-космического радиоинтерферометра проверяется и подтверждается получением интерферометрического отклика (лепестков) от сигнала, принятого на борту КА радиоастрономическими приемниками и на наземных радиотелескопах, путем вычисления корреляции этих сигналов в Центре обработки научной информации, АКЦ ФИАН. Наземно-космический интерферометр «Радиоастрон» может функционировать в двух режимах синхронизации: от бортового водородного стандарта частоты (режим «Н-мазер») и от наземного водородного стандарта частоты НСС в Пушино (режим «когерент»). Последний вариант осуществляется путем использования двухсторонней когерентной петли радиосвязи на частотах

7,2 ГГц (НСС – КА) и 8,4 ГГц (КА – НСС). Режим «Н-мазер» успешно подтвердил свою работоспособность и считается основным режимом, но испытания интерферометра в режиме «когерент» также были выполнены.

Поиск лепестков необходимо было провести от различных типов космических радиоисточников и во всех частотных диапазонах КРТ (92; 18; 6 и 1,35 см). При этом по характеру радиосигнала различаются три типа ярких и компактных объектов: источники непрерывного спектра (активные галактические ядра), источники линейчатого спектра (мазерные источники в линиях OH и H₂O) и источники импульсного радиоизлучения (пульсары). Перспективные радиоисточники для поиска лепестков выбирались из заранее подготовленных и опубликованных списков и каталогов (Kovalev Y. Y., Kellermann K.I., Lister M.L., Homan D.C. et al., 2005; Kovalev Y. Y., Petrov L., Fomalont E.B., Gordon D., 2007).

Участие в поиске лепестков приняли несколько крупнейших в мире радиотелескопов: 100-м радиотелескоп Национальной обсерватории США (Грин Бэнк), 100-м радиотелескоп института радиоастрономии общества Макса Планка (Эффельсберг, Германия), 300-м радиотелескоп

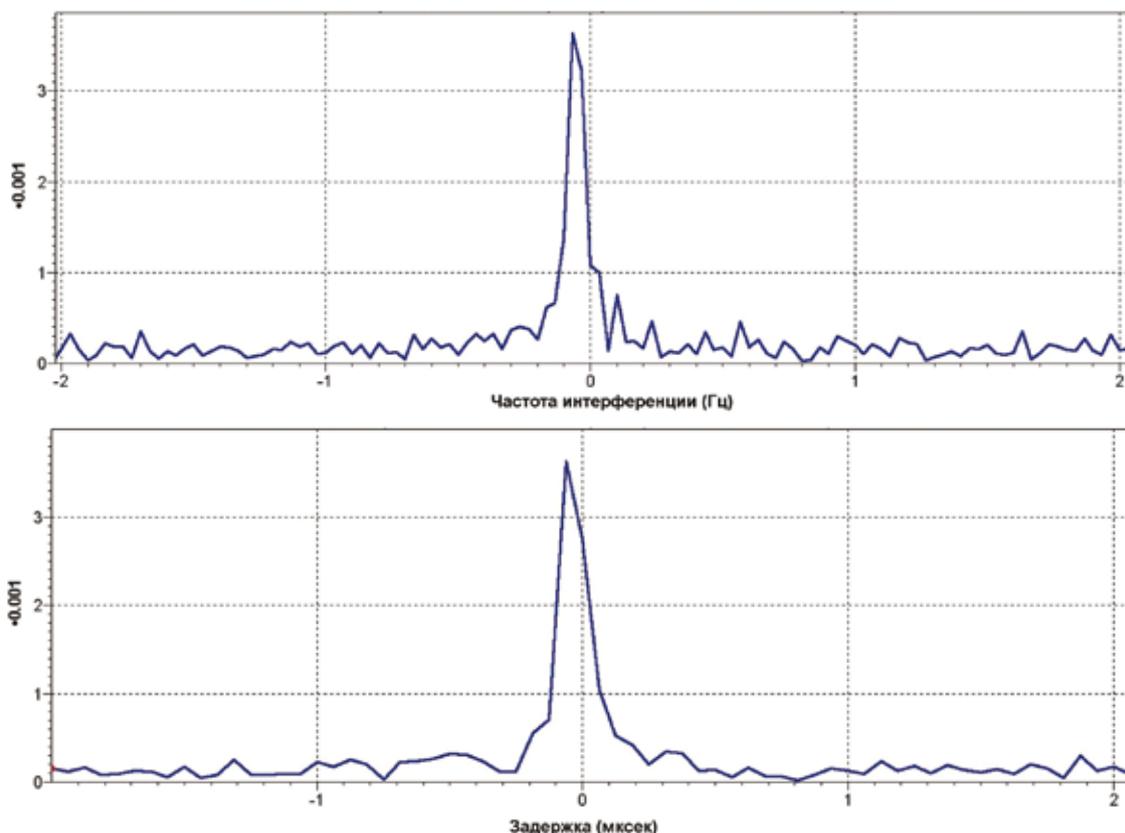


рисунок 5. Сечение интерференционного лепестка по оси временной задержки (внизу) и по частоте интерференции (вверху) от далекой активной компактной галактики BL Lacertae. Корреляция получена на волне 6 см 1 декабря 2011 года между КРТ и 70-м радиотелескопом в Евпатории. Шкала времени выражена в микросекундах, время интегрирования 1 секунда

в Аресибо. В каждом эксперименте по поиску лепестков кроме одного из больших радиотелескопов (Грин Бэнк, Аресибо, Эффельсберг, Евпатория, Усуда, Вестерборк, Тидбинбилла) принимали участие один или несколько вспомогательных радиотелескопов среднего размера для независимого контроля результата на наземных базах. В качестве таких радиотелескопов в программе поиска лепестков участвовали российские радиотелескопы системы «Квазар» Института прикладной астрономии РАН (Бадары, Светлое, Зеленчукская), а также телескопы в Италии (Медичина) и Испании (Ебес).

В первом же интерферометрическом эксперименте, проведенном 15 ноября 2011 г., в наблюдениях квазара 0212+735 на длине волны 18 см был обнаружен интерферометрический отклик (лепестки) на наземно-космических базах. Лепестки были получены между космическим радиотелескопом и всеми наземными РСДБ пунктами: российскими 32-м телескопами (Светлое, Зеленчукская, Бадары), украинским 70-м радиотелескопом в Евпатории (Национальный центр управления и испытаний космических средств и Институт радиоастрономии академии наук, Харьков), немецким 100-м телескопом в Эффельсберге (Институт радиоастрономии общества Макса Планка). Следующим шагом были испытания интерферометра в диапазоне 6 см, которые также оказались успешными уже в первом сеансе. На рисунке 5 показаны сечения лепестка от ядра активной галактики VL Lacertae на волне 6 см с украинским радиотелескопом в Евпатории по результатам наблюдений 1 декабря 2011 года.

Детектирование интерференционного сигнала продемонстрировало общую успешную работу комплексной системы космос–Земля. Всего было проведено 19 тестовых интерферометрических сеансов. На рекордном удалении КА в 300000 км 25 января 2012 года были проведены интерферометрические наблюдения пульсара B0950+08 с участием самого крупного радиотелескопа (диаметр 300-м) в Аресибо (США). Интерференционный отклик был обнаружен с хорошим отношением сигнал/шум для полного сеанса наблюдений длительностью один час. Большинство интерферометрических наблюдений проводилось в режиме «Н-мазер», но также были выполнены успешные сеансы испытаний интерферометра в режиме «когерент».

Обработка и интерпретация результатов, полученных на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон», производится в АКЦ ФИАН совместно с другими участниками проекта. Здесь в первую очередь выполняется кросс-корреляционная обработка потоков данных,

записанных на отдельных радиотелескопах с плотностью записи 128 или 256 Мбит/сек, включая космический сегмент КРТ, с помощью созданной в АКЦ ФИАН системы регистрации RDR-1 и регистратора Mark5 разработки США. Программный FX-коррелятор АКЦ построен на базе вычислительного кластера с производительностью 1 Тфлоп/сек и RAID-системой хранения информации емкостью до 220 Тбайт. Операционная скорость кластера ЦОНИ АКЦ и организованные оптоволоконные линии связи позволяют принимать поток данных от десяти станций (включая КРТ) и, соответственно, обрабатывать потоки до 45 формируемых в эксперименте баз интерферометров.

5.3. Реализация программы научных исследований

Наземно-космический радиоинтерферометр Радиоастрон работает в четырех диапазонах частот, как указано в таблице 2: 0,327 ГГц (92 см), 1,665 ГГц (18см), 4,830 ГГц (6 см) и 22,220 ГГц (1.35 см). Наличие четырех частотных диапазонов позволяет исследовать различные типы радиоисточников: пульсары – в диапазонах 0,327 и 1,665 ГГц, мазерные источники ОН – в диапазоне 1,665 ГГц, мазерные источники в линии водяного пара (H_2O) – в диапазоне 22,220 ГГц, активные ядра галактик и квазары – во всех частотных диапазонах. В режиме интерферометра чувствительность системы двух телескопов пропорциональна квадратному корню произведения эффективной площади этих телескопов, и, таким образом, сочетание 10-м КРТ со 100-м наземным радиотелескопом становится эквивалентным по чувствительности системе двух 30-м телескопов. Режим интерферометра не позволяет получать результат исследования сразу после проведения измерений. Зарегистрированные на различных радиотелескопах научные данные передаются в центр обработки для первичной корреляции (обнаружения интерферометрического отклика). Эта первичная корреляция может быть выполнена только после высокоточной реконструкции орбиты КА в баллистическом центре. Само по себе обнаружение интерферометрического отклика еще не является желаемым окончательным результатом научного исследования. Для достоверного заключения о строении исследуемого объекта необходимы многократные наблюдения с различными конфигурациями телескопов и, прежде всего, при разных положениях КА аппарата на его орбите. Полный набор таких конфигураций может быть реализован как минимум в течение одного календарного года. Стратегия наблюдений состоит в

исследовании определенного набора радиоисточников в течение целого года (а иногда и нескольких лет), после чего всесторонний анализ дает возможность сделать обоснованные заключения о структуре и физических условиях в изучаемых космических объектах.

Ранняя научная программа «Радиоастрон» курируется АКЦ ФИАН (координатор Ю.Ю. Ковалев) и проводится с февраля 2012 года международными коллективами ученых, сформированными в проекте. К настоящему времени (май 2012 года) уже успешно завершены интерферометрические испытания во всех четырех диапазонах частот «Радиоастрон», измерены интерферометрические отклики от пульсаров (B0950+08 и B0531+21) и от нескольких внегалактических радиоисточников (0212+735, 0716+714, 0748+126, 0754+100, 2013+370, OJ287, 3C345, BL Lac и др.). Эти отклики получены для проекций базы наземно-космического интерферометра на картинную плоскость исследуемого источника размерами от долей до примерно двадцати диаметров Земли. Таким образом, в проекте «Радиоастрон» реализовано рекордное угловое разрешение, а достигнутая чувствительность позволяет перейти к выполнению полномасштабной программы научных исследований. Подробные результаты этих измерений будут опубликованы в «Астрономическом журнале» и в журнале «Астрономия и Астрофизика» (Astronomy & Astrophysics).

6. Эксперимент «Плазма-Ф»: постановка задачи и описание эксперимента

Эксперимент «Плазма-Ф» имеет как прагматическую цель – непрерывный мониторинг параметров плазмы и энергичных частиц межпланетной среды как часть «космической погоды», так и исследовательскую – изучение высокочастотной турбулентности этих параметров путем измерений параметров с уникально высоким временным разрешением.

В состав приборов эксперимента входят:

- монитор энергичных частиц (ионов и электронов) – МЭП,
- быстрый монитор солнечного ветра – БМСВ,
- система сбора, записи и обработки научной информации и передачи ее в радиоканал – ССНИ-2.

Эти приборы работают непрерывно и передают свою информацию почти с самого момента выхода спутника Спектр-Р на высокоапогейную рабочую орбиту.

Полная информативность эксперимента со-

ставляет около 70 Мбайт в сутки. При этом эксперимент работает в условиях довольно жесткого ограничения числа и продолжительности сеансов связи с КА. Это привело к необходимости разработки новых принципов работы системы сбора научной информации ССНИ-2:

- постоянная запись всех быстрых измерений в достаточно большую память системы ССНИ-2 (примерно на год работы);
- запись всех данных в двух видах: «сжатом» (примерно в восемь раз) и в «полном» с возможностью отдельного воспроизведения тех или других данных;
- анализ полученных «сжатых» данных и выбор для последующего воспроизведения только наиболее интересных интервалов «полных» кадров.

Эти принципы весьма хорошо оправдали себя в ходе полета КА «Спектр-Р». Активно функционирующий сегмент «Плазма-Ф» НКК проекта «Спектр-Р» (ОНГ ИКИ РАН) регулярно готовит циклограммы команд управления (КПИ) для закладки на борт КА и постоянно участвует в проведении научных сеансов связи с КА. При этом созданная совместно с ЦУП НПОЛ линия связи с ИКИ РАН надежно обеспечивает получение в ИКИ практически в реальном времени научной информации с борта КА в сеансах связи, что дает существенный выигрыш в оперативности и надежности управления экспериментом.

В ИКИ организована экспресс-обработка получаемых в научных сеансах связи данных приборов БМСВ и МЭП, позволяющая сразу после сеанса визуализировать полученные как в режиме непосредственной передачи, так и в режиме воспроизведения данные проведенных измерений.

6.1. Прибор БМСВ

Спектрометр плазмы БМСВ был разработан специально для исследования плазмы солнечного ветра и плазмы магнитослоя с высоким и очень высоким временным разрешением – от 3 с до 30 мс.

Работа прибора БМСВ основана на использовании одновременных измерений токов шести датчиков – цилиндров Фарадея (ЦФ) с различной ориентацией и различной величиной энергии регистрируемого потока ионов плазмы. Этот набор включает в себя три «осевых» датчика, работающих в режиме сканирования управляющего (запирающего ионы) напряжения и три «отвернутых» датчика, регистрирующих проекции на их оси полного потока ионов. При этом оси полей зрения «осевых» датчиков направлены вдоль главной оси прибора БМСВ, а оси «отвернутых»

датчиков отклонены на 20 град симметрично относительно главной оси прибора. «Осевые» датчики предназначены для определения таких параметров плазмы, как переносная скорость, ионная температура и плотность ионов. «Отвернутые» датчики предназначены для определения такого параметра плазмы, как полный поток ионов – его величины и направления.

6.2. Прибор МЭП

Прибор МЭП предназначен для изучения энергичной компоненты космической межпланетной и магнитосферной плазмы. В приборе МЭП установлено четыре детектора – по два для измерений потоков электронов и ионов соответственно. Пары ионного и электронного детекторов ориентированы: одна в сторону, близкую к Солнцу, вторая – «назад», от Солнца, насколько позволяет конструкция аппарата. Электронный детектор включает в себя коллиматор, фольгу, отсекающую поток ионов, имеющих низкую проникающую способность, и кремниевый чувствительный элемент, позволяющий измерять энергию электронов 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 ср·см², что обеспечивает высокую чувствительность к малым потокам измеряемых частиц. Электронный блок прибора включает в себя узлы, осуществляющие формирование импульсного сигнала с детекторов и интерфейсы с системами КА (телеметрия, питание, команды). Описание различных научных результатов, полученных с приборами БМСВ и МЭП, представлено в следующей статье этого выпуска*. Первые результаты эксперимента опубликованы в статье (Застенкер Г.Н., Зеленый Л.М. и др., 2011).

Заключение

Миссия «Радиоастрон» пройдя этап становления и подтверждения своих характеристик, вступила в фазу выполнения глубоких научных исследований. Служебные системы КА «Спектр-Р», научные комплексы КРТ и «Плазма-Ф», наземный научный комплекс и наземный комплекс управления полностью работоспособны и гото-

вы к решению научных задач.

Одновременно первая российская космическая прецизионная платформа в негерметичном исполнении «Навигатор» успешно прошла весь комплекс летных испытаний и может быть рекомендована для использования в других орбитальных проектах.

Список литературы

Александров Ю.А., Андреев В.В., Бабакин Н.Г., Бабьшин В.Е. и др. Радиоастрон (Проект «Спектр-Р») – радиотелескоп много больше Земли. Основные параметры и испытания // Вестник ФГУП НПО им С.А. Лавочкина, 2011. № 3. С. 11-18.

Александров Ю.А., Андреев В.В., Бабакин Н.Г., Бабьшин В.Е. и др. Радиоастрон (Проект «Спектр-Р») – радиотелескоп много больше Земли. Наземный сегмент и основные направления исследований // Вестник ФГУП НПО им С.А. Лавочкина, 2011. № 3. С.19-30.

Застенкер Г.Н., Зеленый Л.М. и др. Загадки солнечного ветра // Российский космос, 2011. № 10. С.26-31.

Попов М.В., Согласнов В.А., Кондратьев В.И., Костюк С.В. и др. Гигантские импульсы – основной компонент радиоизлучения пульсара в Крабовидной туманности // Астрономический журнал, 2006. Т. 83 (1). С. 62-69.

Хартов В. В. Новый этап создания автоматических космических аппаратов для фундаментальных исследований // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, 2011. № 3. С. 3-10.

Angelakis E., Fuhrmann L., Marchili N., Krichbaum T.P., Zensus J.A. Monitoring the radio spectra of selected blazars in the Fermi-GST era. The Effelsberg 100-m telescope covering the cm band // *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 2008. 79. P. 1042-1045.

Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A. The absolute spectrum of CAS A - an accurate flux density scale and a set of secondary calibrators // *Astron. & Astrophys*, 1977. 61 (1). P. 99-106.

Kovalev Y. Y., Kellermann K. I., Lister M. L., Homan D. C. et al. Sub-Millarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. IV. Fine-Scale Structure // *Astron. J*, 2005. 130 (6). P.2473-2505.

Kovalev Y. Y., Petrov L., Fomalont E. B., Gordon D. The Fifth VLBA Calibrator Survey: VCS5 // *Astron. J*, 2007. 133 (4). P. 1236-1242.

Kovalev Y.Y., Nizhelsky N.A., Kovalev Yu.A. Berlin A.B. et al. Survey of instantaneous 1-22 GHz spectra of 550 compact extragalactic objects with declinations from -30^{deg} to +43^{deg} // *Astron. & Astrophys*, 1999. V. 139 (3). P. 545-554.

Ott M., Witzel A., Quirrenbach A., Krichbaum T. P. et al. An updated list of radio flux density calibrators // *Astron. & Astrophys*, 1994. 284 (1). P. 331-339.

Статья поступила в редакцию 30.05.2012 г.

* Застенкер Г.Н. и др. Эксперимент «Плазма-Ф» – первые результаты работы.