

© Л. С. Чесалин, Г. Н. Застенкер, Е. В. Круковская,  
Е. В. Лакутина, В. Н. Луценко, Н. Н. Шевырев

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.

**БОРТОВОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ РОССИЙСКО-УКРАИНСКОГО  
ПРОЕКТА «ИНТЕРБОЛ-ПРОГНОЗ»  
(ВЫСОКОАПОГЕЙНЫЙ СПУТНИК «ИНТЕРБОЛ-3»)**

Розглядаються основні вимоги до бортових інформаційних систем, принципово відмінні від вимог до систем керування; наводяться варіанти рішень для підготовки випробувальних комплексів наукової апаратури космічного апарату, приділяється увага можливостям перепрограмування обробного комплексу; обговорюється варіант організації обміну даними на борту супутника із використанням добре відпрацьованих мережевих рішень; розглядаються засоби забезпечення гнучкості системи у процесі льотного експерименту.

Российско-Украинский проект «Интербол-Прогноз» предусматривает вывод на орбиту системы космических аппаратов для изучения физических параметров окружающей среды. Ключевым пунктом проекта является совместное рассмотрение результатов измерений характеристик межпланетной среды («верхний этаж» космической системы) и околоземного космического пространства («нижний этаж»).

Измерение различных параметров (магнитного поля, плазмы солнечного ветра, энергичных частиц в межпланетной среде, электрического и магнитного полей, волн и частиц в верхней магнитосфере Земли) выполняется различными научными приборами. Широкий набор приборов позволяет получить комплексную картину состояния околоземного пространства и, в частности, определить свойства солнечного ветра, ответственного за многие процессы в магнитосфере Земли. Предположительный состав объектов космического эксперимента, их траектории, устанавливаемые комплекты физических приборов и измеряемые параметры космического окружения Земли описаны в работе [3].

Эффективность исследований околоземного пространства и адекватность оценки его влияния на Землю в значительной степени определяются количеством собранных и обработанных экспериментальных данных. Этим вопросам посвящена данная статья.

В ходе выполнения международного космического проекта «Интербол» [1], была получена уникальная информация в объеме, превышающем общий объем данных от всех ранее выполненных российских космических экспериментов в области солнечно-земной физики. Существенным звеном

комплекса информационного обслуживания этих проектов являлась система сбора научной информации ССНИ, подготовленная специалистами ИКИ [5, 6]. Именно она обеспечила получение большей части данных и возможность гибкого управления ими на всех этапах летного эксперимента, что в значительной степени определило успех проекта.

Система ССНИ представляла собой высоконадежную вычислительную систему с накопителями информации на жестких магнитных дисках и твердотельной памяти. При разработке и изготовлении системы ССНИ авторами были сформулированы и применены требования к надежности информационных систем поддержки научного эксперимента, (принципиально отличающиеся от требований к управляющим бортовым системам) и сформулировано понятие живучести системы сбора научных данных. Основное отличие в требованиях связано с тем фактом, что для управляющих систем отдельная ошибка в принципе может вести к катастрофическим последствиям, а подобная ошибка в системе сбора данных практически не должна сказаться на результатах эксперимента. Соответственно построение системы сбора по тем же принципам, что и системы управления, приведет к неоправданному усложнению системы и повышению ее стоимости или к значительному снижению функциональных возможностей системы.

Именно поэтому многие классические для систем управления решения нерациональны для информационных систем. Например, троирование устройств с голосованием в этом случае неэффективно. Действительно, вместо троирования одного и того же

действия (например, трехкратного запоминания данных) лучше выполнить две дополнительные задачи (запомнить втрое больше данных, снабдив их контрольными суммами). Таким образом, при отказе или сбое может быть потеряна только часть результатов (скажем, не получен один набор данных из трех), тогда как при троировании даже при отсутствии ошибок объем сохраняемых данных втрое меньше за счет повторений.

При проведении научного эксперимента наиболее существенной становится именно живучесть системы сбора данных, то есть возможность ее стабильного функционирования, пусть даже с частичным ухудшением характеристик, в процессе полета.

Другим существенным требованием к научной информационной системе является гибкость программного обеспечения системы, позволяющая вносить изменения в режимы ее функционирования во время полета. Использование возможности перепрограммирования системы ССНИ в процессе полета позволило изменить логику обслуживания ряда научных приборов и обеспечить получение данных, которые в противном случае были бы просто утеряны вследствие нештатной работы этих приборов.

Надежность системы ССНИ обеспечивалась оригинальными схемными и программными решениями, определяющими высокую живучесть системы при весьма ограниченных затратах на ее компоненты. В оборудование было заложено несколько уровней резервирования, переключаемых по командам с Земли, а предусмотренная возможность внесения изменений в программное обеспечение во время работы объекта предоставила дополнительные средства обеспечения надежности и позволила, в частности, минимизировать ущерб от одиночных случайных сбоев, возникавших вследствие прошивания ОЗУ высокоэнергичными заряженными частицами.

В системе ССНИ были применены промышленные решения вычислительной техники. Выбранная архитектура позволила обеспечить высокую интегральную надежность системы при использовании относительно дешевых компонентов средней надежности, не предназначенных специально для космических применений, что значительно снизило ее общую стоимость. Космический эксперимент «Интербол» показал высокую эффективность принятых решений и позволил выполнить уже в ходе полета ряд дополнительных действий, не предусмотренных заранее. В ходе летных экспериментов на Хвостовом зонде система ССНИ отработала более 45 000 ч, от научных приборов было получено более 500 гигабит данных. На Авроральном зонде система отработала более 20000 ч, было собрано более 100 гигабит данных.

Однако для проекта «Интербол-Прогноз» использование комплекса ССНИ, аналогичного тому, который применялся на предыдущих спутниках программы «Интербол», оказывается недостаточным (несмотря на гибкость предоставляемых им услуг и значительный объем собираемой информации). Проблема возникает, прежде всего, из-за значительно большей удаленности космического аппарата «Интербол-3» от Земли (около 1.5 млн км вместо 200 тыс. км в проекте «Интербол») и практической невозможности передать все собираемые научными приборами данные (из-за ограничений, на скорость передачи и время передачи информации).

Как следствие, оказывается принципиально необходимым изменение подхода к информационной схеме эксперимента. Действительно, современные приборы выдают в 5—10 раз большие потоки информации, а большее удаление объекта от Земли позволяет рассчитывать только на скорости передачи в четыре раза меньшие, чем раньше. В данной работе предлагается решение проблемы путем создания базы данных и организации программируемой обработки собранной информации непосредственно на борту объекта с последующей передачей результатов на Землю [4, 5, 7].

Таким образом, при непрерывном наблюдении данные могут быть обработаны, и определенные результаты обработки переданы для интерпретации экспериментаторам, хотя весь объем «сырых» данных по-прежнему не будет доступен на Земле.

При этом возможна итеративная обработка данных по мере необходимости. Например, при обнаружении по усредненным результатам представляющего особый интерес временного участка можно запросить более подробную его обработку или передачу всей «сырой» информации за этот период времени.

Следует подчеркнуть, что предлагаемая информационная система отнюдь не является автоматической системой обработки космических данных, но должна обеспечить экспериментатору новый уровень взаимодействия с экспериментом. Предлагаемая организация «летающего» центра хранения и обработки данных позволит логически (виртуально) приблизить интеллект экспериментатора к удаленной экспериментальной площадке путем организации обработки данных на месте их получения по гибким программам.

Предлагаемая система логически разбивается на три иерархических уровня. Раздельная, независимая подготовка каждого из уровней позволяет сократить сроки и общую стоимость разработки. В связи с быстрым развитием вычислительных систем особое внимание уделяется модульности и совместности различных элементов системы (как на

аппаратном, так и на программном уровне). Предлагаемый вариант построения позволит безболезненно заменить отдельные элементы системы в ходе заключительной стадии подготовки миссии и тем самым обеспечить применение последних достижений вычислительной техники и, в частности, включение максимальной архивной памяти без снижения высокой надежности бортовой системы.

Верхний уровень представляется относительно мощным компьютерным блоком (на 2003 г. — не ниже класса Пентиум 300 МГц; если разработка закончится спустя значительное время, процессор следует заменить более мощным аналогом) и устройствами хранения архива данных. Указанный компьютерный блок предназначен для выполнения интеллектуальной обработки данных и составляет ядро данного предложения, в значительной степени определяющее его ценность и новизну. Принимаются все меры для повышения мощности этого блока, и следовательно, функциональных возможностей обработки. Однако, несмотря на важную идеологическую роль, этот блок работает на правах отдельного прибора, не отвечает за жизнеспособность космического аппарата и, вероятно, не резервируется. Возможно, его функции в случае необходимости сможет частично взять на себя один из приборных процессоров.

На верхнем уровне находятся также основные устройства хранения архивных данных. Как уже говорилось, в них предполагается хранение значительной части данных, полученных всеми приборами в максимально информативных режимах за все время работы (порядка 30 % всех возможных данных миссии). Эти данные обеспечивают успех миссии, потеря значительной части их весьма неприятна. Однако даже при полном отказе архива и интеллектуального процессора мы вернемся к возможностям системы ССНИ вполне успешного проекта «Интербол».

Резервирование обеспечивается применением нескольких накопителей разного типа, обслуживаемых специально разрабатываемой архивной файловой системой слежения за приоритетностью информации. Особенно ответственные данные (например, копии рабочих программ отдельных приборов) хранятся в нескольких копиях на разных накопителях. Подчеркнем, что забота об организации архива полностью лежит на его управляющей системе, от пользователя требуется только указание приоритета хранения соответствующей части информации.

На среднем уровне находится высоко надежная система сбора научной информации, имеющая несколько степеней обеспечения живучести и вклю-

чающая память на один-два сеанса сброса научной информации. При необходимости этой системе можно также поручить задачи управления научными приборами объекта. Эта система близка по характеру использования к служебным системам объекта. Прототипом системы среднего уровня может служить система ССНИ предыдущего проекта «Интербол». Конечно, для применения в проекте «Интербол-Прогноз» потребуются определенные изменения и доработки в соответствии с техническими требованиями на объект и переходом на современную элементную базу.

Наиболее «населенным» оказывается нижний уровень системы сбора информации, к которому предлагается отнести микропроцессоры, входящие практически в любой современный прибор. Требования, предъявляемые к этим процессорам, достаточно сильно зависят от потребностей соответствующих приборов. Однако наличие ряда общих задач, выполняемых этими процессорами, позволяет нам предложить потребителям некоторый набор микропроцессорных плат и программных модулей, предназначенных для решения типовых задач управления физическим прибором и сбора поступающих от него данных.

Все процессоры, обеспечивающие информационную поддержку космического эксперимента, должны активно взаимодействовать между собой. Разработка для отдельного проекта специальных интерфейсов безусловно нецелесообразна, так как при создании уникального интерфейса почти всегда возникают ошибки. Мы предлагаем применять в данном проекте хорошо отработанный и использованный (в том числе и на борту космических объектов) сетевой интерфейс Ethernet. Недостатком интерфейса Ethernet можно считать высокое электрическое потребление используемых блоков, но авторы на сегодняшний день не видят конкурентных решений (за исключением применения мало потребляющих приемников и передатчиков сигнала). Тем не менее, вопрос нуждается в дополнительной проработке. В частности, подлежит изучению возможность применения оптоволоконной связи между элементами информационного комплекса на борту аппарата, безусловно перспективной в плане электромагнитной совместимости приборов комплекса, но ранее не применявшейся в подобных целях. Мы рассматриваем также вариант применения (прежде всего для контакта с контрольно-испытательной аппаратурой) инфракрасной связи.

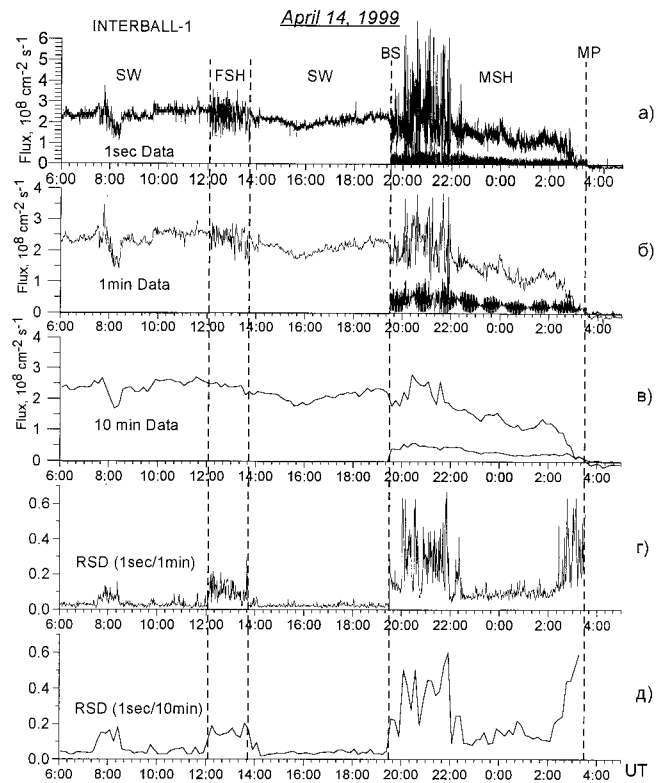
В отличие от прежних наших разработок, где программное обеспечение процессора разрабатывалось специально под задачу с исключительным использованием языка Ассемблера, в данном проекте предлагается применить один из вариантов

операционной системы Unix, которая обеспечивает поддержку стандартных модулей оборудования. Существенным преимуществом системы Unix является наличие исходного текста, который необходим для поддержания работы системы в полете и для анализа нештатных ситуаций. Выбор операционной системы допускает применение языка C++ в качестве основного средства программирования, не закрывая возможности включения модулей, написанных на языке Ассемблера.

Следует еще раз подчеркнуть значение гибкости бортовой системы для научных проектов, когда исследования проходят на грани возможного, а задачи могут изменяться в ходе эксперимента. Однако перепрограммирование является весьма ответственной операцией. Например, сбой во время сеанса связи, в котором производится перепрограммирование, может привести к серьезным повреждениям программного обеспечения системы, поэтому обязательно следует предусмотреть возможность восстановления программы после любых изменений. Отметим еще раз, что решение о перепрограммировании и вообще о любом изменении состояния бортовой системы должно приниматься на Земле, а не выработываться тем или иным автоматом, который в непредвиденной ситуации может выполнить необратимые действия.

При естественной и очевидной простоте организация архива данных и их научная обработка на борту требует решения ряда технических и организационных проблем, связанных с обеспечением надежного функционирования системы, и даже изменения психологии части экспериментаторов (от подхода коллекционера, собирающего всю информацию для последующей неспешной обработки «когда-нибудь», к творческой позиции собственно испытателя). От экспериментатора требуется актуальная оценка полученной на Земле информации и принятие ответственного решения о судьбе данных на борту. В предлагаемой схеме, в отличие от традиционной, большую роль играет линия передачи информации с Земли на борт. По этой линии передаются указания и программы бортовой системе обработки данных, объем которых превышает объем управляющих команд в традиционной схеме.

Для разработки методики построения бортовой системы авторами подготовлен макетный вариант информационной системы на базе промышленных компьютеров. Макет включает достаточно мощный компьютер на базе микропроцессора Geode для представления верхнего уровня обработки, несколько дисков и твердотельных блоков памяти в качестве архива данных, компьютер на базе Intel 486 с диском для имитации ССНИ и несколько микро-



Измерения потока ионов при прохождении спутником «Интербол-1» последовательно нескольких областей межпланетной среды и магнитосферы

процессоров для представления приборов. С помощью этого макета проведена модельная обработка данных, полученных в ходе проекта «Интербол».

Для проверки предложенной схемы прохождения информации были обработаны данные прибора ВДП, измерявшего полный поток ионов солнечного ветра [2, 9] и прибора ДОК, измерявшего потоки энергичных частиц [8].

Для прибора ВДП обработка сводилась к получению обзорных, усредненных характеристик плазменных потоков и статистических показателей их изменчивости. На рисунке представлены измерения потока ионов при прохождении спутником «Интербол-1» последовательно нескольких областей межпланетной среды и магнитосферы — солнечного ветра (SW), форшока (FSH), снова солнечного ветра (SW), ударной волны (BS), магнитослоя (MSH) с двумя уровнями колебаний и магнитопаузы (MP). Панель *a* — измерения с разрешением 1 с от двух различно расположенных датчиков (объем данных — 5.0 Мбайт); панели *b* и *в* — усреднение тех же данных за 1 мин. и за 10 мин. (объем 120 и

12.5 Кбайт соответственно). Панели  $\varepsilon$  и  $\delta$  — относительные среднеквадратичные отклонения (RSD) на одноминутном и десятиминутном интервалах.

Для изучения динамики солнечного ветра и магнитосферы наибольшее значение имеет определение моментов времени и пространственного расположения переходов между различными структурными областями, выполняемое наиболее точно по измерениям с наибольшим разрешением (в нашем примере — по ежесекундным измерениям).

Однако, как показало моделирование, резкие изменения уровня RSD позволяют индцировать прохождение интересных событий или границ и тем самым определить, какие части записанной информации наиболее интересны для передачи в полном виде. При этом прохождение ударной волны индцируется не только по возрастанию вариаций (RSD), но и, прежде всего, по появлению отсчетов в дополнительном (боковом) датчике — см. сигнал малой амплитуды после 19.30, что отчетливо видно и на усредненных (и по 1 мин, и по 10 мин) данных. Пересечение магнитопаузы хорошо видно на усредненных данных по спаду потока до нуля (или даже слегка отрицательной величины) и по возрастанию уровня вариаций (RSD) вблизи нее. Возрастание уровня вариаций (например, в области форшока в 12.00 — 14.00) хорошо индцируется по величине RSD (как 1 мин, так и 10 мин), особенно наглядно это видно по 10-мин данным — на самих отсчетах (панель  $\varepsilon$ ) из-за большого усреднения форшок совсем незаметен, тогда как по RSD (панель  $\delta$ ) он выделяется очень четко; то же можно сказать и о резких скачках потока (например, около 10:00) и о большом снижении уровня вариаций в магнитослое (около 22:00).

Таким образом, моделирование работы прибора ВДП показывает возможность существенного (в 30—50 раз) уменьшения объема постоянно передаваемой информации при сохранении (в определенных пределах, разумеется) возможности обнаружения участков пересечения реально наблюдаемых границ или значительных структурных изменений солнечного ветра. Программа для подготовки системы обработки данных подобного прибора может быть разработана на основе имеющегося опыта в основном до запуска космического аппарата.

Конечно, надо иметь в виду, что какие-то явления могут быть пропущены при предложенных критериях, но это является неизбежной платой за сильное уменьшение объема передаваемой информации.

Прибор ДОК позволил его авторам в ходе космического эксперимента «Интербол» помимо регулярных измерений обнаружить и ряд новых эффектов в магнитосфере. Естественно, программа для обнару-

жения подобных, неожиданных явлений в предлагаемой схеме обработки должна готовиться в реальном масштабе времени по мере оценки получаемых данных. Мы разработали соответствующую программу обнаружения событий и имитировали занесение ее в макетный комплекс командами с Земли. Объем передаваемой информации и для этого исследования уменьшается примерно в десять раз.

Проведенные модельные расчеты подтвердили эффективность предложенной схемы создания бортового архива и бортовой программируемой обработки данных для космического эксперимента «Интербол-Прогноз» (спутника «Интербол-3»), в котором вся собранная с высоким разрешением научная информация не может быть полностью передана на Землю из-за принципиального ограничения пропускной способности радиолинии (и, соответственно, будет потеряна). Предлагаемая организация информационного обеспечения эксперимента позволит с высокой уверенностью выделить по гибким критериям и сохранить наиболее значимую ее часть в соответствии с возможностями радиолинии в предполагаемом объеме порядка 10 %.

1. Галеев А. А., Гальперин Ю. И., Зеленый Л. М., Проект ИНТЕРБОЛ по исследованиям в области солнечно-земной физики // Космич. исслед.—1996.—34, № 4.—С. 339—362.
2. Застенкер Г. Н., Федоров А. О., Шарко Ю. В. и др. Особенности использования интегральных цилиндров Фарадея на спутнике «Интербол-1» // Космич. исслед.—2000.—38, № 1.—С. 23—30.
3. Зеленый Л. М., Тамкович Г. М., Петрукович А. А. и др. Российско-украинский проект «Интербол-Прогноз» для многоуровневого исследования системы солнечно-земных связей. «Верхний этаж» // Третья Укр. конф. по перспективному космическому исследованию; Качивели, Крым, 15-19 сентября 2003 г.: Тез. докл. — Киев, 2003.—С. 31.
4. Чесалин Л. С., Лакутина Е. В., Круковская Е. В. Особенности построения интеллектуальной бортовой системы обработки научных данных физического эксперимента // «Современные и перспективные разработки и технологии в космическом приборостроении»: Тез. докл. Выездной семинар; г. Таруса, 25-27 марта 2003 г. — Таруса, 2003.—С. 27.
5. Чесалин Л., Рязанова Е., Лакутина Е. Локализация сбоя бортового процессора в магнитосфере и их автоматическое исправление на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 (авроральный зонд) // Космич. исслед.—1999.—37, № 6.—С. 567—572.
6. Chesalin L. Scientific Information Collection System SSNI. INTERBALL. Mission and Payload // CNES-IKI RAS, 1995.—P. 71—75.
7. Chesalin L., Fedorov A., Lutsenko V., Zastenker G. On-Board Scientific Data Treatment Model // EGS-AGU-EUG Joint Assembly. Nice, France, 6—11 Apr. 2003. — Nice, 2003.—P. 458.
8. Lutsenko V. N., Kudela K. Almost monoenergetic ions near the Earth's magnetosphere boundaries // Geoph. Res. Lett.—1999.—26, N 3.—P. 413—416.
9. Safrankova J., Zastenker G., et al. Small scale observations of magnetopause motion: Preliminary results of the INTERBALL project // Ann. Geophys.—1997.—15, N 5.—P. 562—569.

**ONBOARD INFORMATION SERVICE OF THE SCIENTIFIC PROGRAM IN THE RUSSIAN-UKRAINIAN PROJECT INTERBALL-PROGNOZ (HIGH-APOGEE SPACECRAFT INTERBALL-3)**

L. S. Chesalin, G. N. Zastenker, Ye. V. Krukovskaia, Ye. V. Lakutina, V. N. Lutsenko, N. N. Shevryev

The basic requirements to onboard information systems, which are essentially different from the requirements to control systems, are

considered. The architecture of an intellectual onboard information system is proposed. The variants of the decisions for preparation of test complexes of the scientific equipment of a space vehicle are resulted; the attention to possibilities of reprogramming of a processing complex is given. The variant of organization of the data exchange onboard the flight system with application of the well-fulfilled network decisions is discussed. The means of maintenance of flexibility of the system in process of the flight experiment are considered.

© С. В. Абламейко<sup>1</sup>, А. А. Кравцов<sup>1</sup>,  
В. А. Меньшиков<sup>2</sup>, С. В. Пушкарский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Об'єднаний інститут проблем інформатики НАН Білорусії, Мінськ, Білорусія

<sup>2</sup>Науково-дослідний інститут космічних систем ГНПЦ ім. М. В. Хрунічева, Юбілейне, Московської обл., Росія

**КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ,  
ПРОВОДИМЫЕ В РАМКАХ БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИХ ПРОГРАММ  
«КОСМОС-БР» И «КОСМОС-СГ»**

Розглядаються напрямки досліджень і розробки, що проводяться в рамках двох білорусько-російських космічних програм. По програмі «Космос-БР» подано основні отримані результати, показано практичне апробування ряду розробок. Освітлено окремі перспективні проекти нової програми «Космос-СГ».

**ВВЕДЕНИЕ**

На современном этапе известной мировой тенденцией, отмеченной в развитии большинства развитых стран, является быстрое расширение сектора высокотехнологичных услуг, в первую очередь информационных и космических технологий.

Для Беларуси и России применение космических средств имеет особое значение. Специфика их географического положения, размещение ресурсов и социально-экономических объектов таково, что многие серьезные социально-экономические программы могут быть гораздо эффективнее решены при использовании космических средств и технологий, в том числе при решении задач рационального использования природных ресурсов, развития навигации и телекоммуникаций, проведения экологического мониторинга земной поверхности, эффективного использования транспорта и повышения качества гидрометеорологических прогнозов.

Высокие требования к характеристикам применяемой космической аппаратуры, уровню надежности и работоспособности космических объектов в жестких условиях космической среды стимулируют создание высокоэффективных технологий. Космические технологии являются базой для производства высокотехнологичной продукции, конкурентоспо-

собной на мировом рынке, и мощным рычагом развития научно-технического прогресса.

В связи с актуальностью космической тематики, а также в целях восстановления и дальнейшего развития научных, научно-технических и экономических связей в области разработки космических средств и технологий Российским авиационно-космическим агентством и Национальной академией наук Беларуси в 1998 г. была подготовлена совместная научно-техническая программа — «Космос-БР».

**ПРОГРАММА «РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И ОТОБРАЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ» (ШИФР «КОСМОС-БР»)**

Программа «Космос-БР» была утверждена Исполнительным комитетом Союза Беларуси и России (постановлением № 11 от 9 декабря 1998 г.) и запланирована к финансированию из союзного бюджета.

Срок реализации Программы с 1999 по 2002 г.

Государственными заказчиками были определены Российское авиационно-космическое агентство (от Российской Федерации) и Национальная академия