

На правах рукописи

*МАЛАХОВ Алексей Владимирович*

**НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС  
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ НАУЧНЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Специальность: 01.04.01 — приборы и методы  
экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Москва  
2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
«Институт космических исследований РАН»

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук  
*Митрофанов Игорь Григорьевич*

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук  
*Цыган Анатолий Иванович*  
Физико-технический институт им. Иоффе РАН

кандидат технических наук  
*Лягушин Владимир Иванович*  
Ракетно-космическая корпорация «Энергия»  
им. С. П. Королёва

**Ведущая организация:**

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт  
автоматики им. Н. Л. Духова»

Защита диссертации состоится **25 июня 2010 года в 17:00**  
на заседании совета Д720.001.06 Объединенного института  
ядерных исследований (ОИЯИ) в Лаборатории ядерных реакций  
(ЛЯР) им. Г. Н. Флерова по адресу: 141980, г. Дубна, ул. Жолио-  
Кюри, 6

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан 25 мая 2010 года

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 720.001.06  
кандидат физико-математических наук



А. Г. Попоко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Исследования космического пространства обеспечиваются двумя взаимно-связанными комплексами аппаратуры — научными приборами на борту космического аппарата и наземным комплексом аппаратуры обеспечения космического эксперимента. Очевидно, что научное исследование небесных тел с борта космического аппарата невозможно без обработки данных научных измерений, которые производятся детекторами прибора, преобразуются его логически-цифровым узлом и передаются по каналу радиосвязи на Землю. В равной степени это исследование невозможно без приема данных телеметрии антеннами центров космической связи, их передачи в центры управления полетом космического аппарата, представления данных в наземный центр космического эксперимента, проведения их первичного экспресс-анализа и оценки качества выполненных измерений, научного анализа и интерпретации. Разработка, создание и использование современных аппаратурных наземных комплексов для исследований небесных тел научными приборами с борта космических аппаратов является самостоятельной областью научных космических исследований, уровень развития которой в значительной степени определяет успех научных космических проектов.

Диссертационная работа посвящена исследованию новых методов разработки и реализации современных наземных комплексов для обеспечения ядерно-физических научных космических экспериментов на борту российских и иностранных космических аппаратов, включенных в Фундаментальную космическую программу

РФ. В связи с тем, что условия разработки и реализации этих экспериментов на основе новых ядерно-физических приборов космического применения выдвигают принципиально новые требования к наземным комплексам, данная работа является актуальной.

### Предмет исследования

Предметом исследования данной работы являются новые методы разработки и реализации наземных сегментов космических экспериментов на основе приборов для проведения научных исследований в области ядерной планетологии, включающих контрольно-испытательную аппаратуру для испытаний и отработок приборов и наземную аппаратуру и программное обеспечение для обработки данных измерений и управления приборами в ходе космического полёта.

Исследования в этом направлении проводятся в Институте космических исследований РАН по теме РАН «Ядерная планетология» (регистрационный № 01.20.03 03438). Эти исследования проводятся коллективом лаборатории космической гамма-спектроскопии, членом которого является автор представленной диссертационной работы. На долю этого коллектива в настоящее время приходится 6 экспериментов по исследованиям небесных тел ядерно-физическими методами. Так, в настоящее время сотрудники лаборатории проводят космические эксперименты ХЕНД (от англ. High Energy Neutron Detector) на борту марсианской автоматической станции НАСА «Марс Одиссей», БТН-Нейтрон (Бортовой телескоп нейтронов) на Российском сегменте Международной космической станции и ЛЕНД (от англ. Lunar Exploration Neutron Detector) на борту лунной автоматической станции НАСА «Лунный разведывательный орбитер» (ЛРО). Они также заняты разработкой и предполетными испытаниями приборов НС-ХЕНД на борту российской автоматической станции «Фобос-Грунт» (срок запуска — 2011 г.), ДАН (Динамическое альbedo нейтронов) на борту автоматического марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория» (МНЛ) (срок запуска — 2011 г.) и МГНС (от англ. Mercury Gamma and Neutron Spectrometer) на борту европейского космического аппарата для исследований Меркурия «БепиКоломбо» (запуск в 2014 г.). Эти эксперименты представляют собой принципиально

новые научно-технические разработки, некоторые из которых, по нашим сведениям, не имеют аналогов среди исследований в ведущих космических центрах во всем мире.

### Цели и задачи исследования

Как уже отмечалось, важнейшим условием успешного проведения экспериментов по ядерно-физическим исследованиям небесных тел с борта космических аппаратов является создание комплекса наземной аппаратуры, который обеспечивает проведение отработок и испытания аппаратуры для этих экспериментов, управление в ходе космического полета и необходимую обработку данных научных измерений. Полный перечень функций наземного сегмента для космического научного эксперимента по ядерной планетологии включает:

- (Ф-1) Обеспечение программы наземных автономных испытаний и отработок научного космического прибора до его постановки на борт космического аппарата.
- (Ф-2) Управление экспериментом в ходе космического полета, экспресс-анализ научных данных и оценка состояния приборов и его систем.
- (Ф-3) Обеспечение физических калибровок научной аппаратуры на стендах ядерно-физических центров и лабораторий.
- (Ф-4) Создание и поддержание базы данных космического эксперимента, поддержка процедур доступа к данным, их редактирования и обновления.
- (Ф-5) Создание и поддержание программных средств для обработки научных данных и создания «научных продуктов» исследования, соответствующих четырем уровням разработки: данные текущих измерений на борту (уровень 0), данные измерений для отобранных интервалов времени, участков поверхности или условий наблюдения (уровень 1), экспериментальные оценки зарегистрированных потоков нейтронов и гамма-лучей (уровень 2) и экспериментальные оценки химического и изотопного состава вещества изучаемых небесных тел (уровень 3).

Целью данной диссертационной работы является разработка новых методов и принципов создания аппаратуры для наземного сегмента космических экспериментов и практическая реализация полученных результатов для указанных выше проектов, включенных в Федеральную космическую программу.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

- (3-1) разработка новых принципов построения контрольно-испытательной аппаратуры для современных научных космических приборов с целью исследований в области ядерной планетологии, и их применение на практике;
- (3-2) реализация и внедрение новых методик экспресс-анализа данных измерений научными приборами для исследований в области ядерной планетологии на этапах их разработки и предполётных испытаний;
- (3-3) разработка новых принципов построения узлов по приёму данных и управлению научными приборами для исследований в области ядерной планетологии, организация взаимодействия между удаленными узлами;
- (3-4) создание узла обработки данных приборов ядерной планетологии, обеспечивающего получение необходимых для миссии научных продуктов, а также их распространение среди научного сообщества.

Автор представленного диссертационного исследования непосредственно участвовал в создании действующего в настоящее время наземного комплекса космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту Российского сегмента Международной космической станции, ЛЕНД на борту аппарата НАСА «Лунный разведывательный орбитер». Он является ведущим разработчиком наземных комплексов для перспективных космических экспериментов НС-ХЕНД на борту российского межпланетного аппарата «Фобос-Грунт», ДАН на борту аппарата НАСА «Марсианская Научная Лаборатория» и МГНС на борту аппарата ЕКА «БепиКоломбо». В настоящее время работы по созданию комплексов наземной аппаратуры для экспериментов ДАН и ХЕНД-НС завершены, это оборудование испытано и передано в эксплуатацию в Институт космических исследований РАН, НПО им. С. А. Лавочкина и Лабораторию реактивного движения в США.

### Научная новизна

Представленное исследование является частью программы работ по сотрудничеству Федерального космического агентства России с НАСА (США) и ЕКА (Европа) в области космических исследований Луны, Марса и других планет, которая реализуется в настоящее время в соответствии с межправительственными соглашениями. Новизна представленного исследования в общем плане состоит в том, что космические проекты России «Фобос-Грунт», США «Лунный разведывательный орбитер» и «Марсианская научная лаборатория» и Европы «БепиКоломбо», в рамках которых было выполнена представленная работа, являются принципиально новыми перспективными научными исследованиями, которые определяют современный уровень развития космической науки в области ядерной планетологии. Эти проекты запланированы к реализации в 2009–2014 гг.

Так, прибор ДАН, устанавливаемый на марсианский ровер, является принципиально новым для космической науки с точки зрения как использования нейтрон-активационного принципа работы, так и управления прибором во время миссии. Во время работы прибора ЛЕНД на орбите Луны впервые были получены данные о нейтронном излучении Луны с высоким пространственным разрешением. Это, несомненно, внесло соответствующие новые требования и к наземному сегменту — как в части методов обработки данных, так и в части управления приборами.

Конкретные элементы новизны представленного исследования состоят в следующем:

1. Исследована и реализована на практике новая концепция контрольно-испытательной аппаратуры, которая объединяет как наиболее востребованную функциональность предыдущих разработок КИА, так и повышенное удобство в использовании, удовлетворение требований радиационной безопасности. Эта концепция позволила, прежде всего, разработать КИА для различных приборов с минимальными трудозатратами, предоставляя при этом достаточно удобный и функциональный интерфейс пользователя.
2. Предложена, разработана и реализована на практике новая методика экспресс-анализа данных научных и служебных

измерений бортовыми приборами для ядерно-физических исследований на этапе их разработки и испытаний, которая основана на анализе получаемых от прибора данных и их математическом преобразовании для получения минимально необходимого набора физических параметров, характеризующих свойства и состояние прибора.

3. На основе выполненных исследований разработаны и созданы наземные сегменты аппаратуры и программного обеспечения для космических экспериментов ЛЕНД и ДАН, которые позволили обеспечить оперативное управление этими приборами в условиях функционального объединения нескольких удаленных узлов и крайне ограниченного времени для экспресс-анализа данных измерений и разработки программы дальнейших измерений.

### Практическая значимость

Во-первых, созданные в рамках данной диссертационной работы комплексы контрольно-испытательной аппаратуры позволили провести испытания ядерно-физических приборов БТН-М1, ЛЕНД, НС ХЕНД и ДАН на этапах их разработки и испытаний в условиях полного соблюдения требований радиационной безопасности.

Во-вторых, разработанные в рамках данной диссертационной работы наземные сегменты космических экспериментов БТН-Нейтрон и ЛЕНД позволяют в настоящее время обеспечивать оперативное управление и обработку данных научных измерений аппаратуры БТН-М1 на борту Российского сегмента МКС и ЛЕНД на борту аппарата НАСА «Лунный разведывательный орбитер».

В-третьих, в проектах ЛЕНД и ДАН управление космическими экспериментами и обработка наблюдательных данных распределены между многими сотрудничающими коллективами как в российских, так и в американских и европейских научных центрах — поэтому наземный комплекс аппаратуры для каждого эксперимента создавался как распределенный многофункциональный комплекс со многими узлами в разных странах. В зависимости от специализации исследователей, в каждом узле создавались свои, наиболее современные средства поддержки ядерно-физического

эксперимента в космосе, включающие как методы экспресс-анализа и первичной обработки данных измерений, так и численного моделирования и научного анализа данных измерений. Эти узлы должны быть интегрированы в единый наземный комплекс, который должен функционировать в режиме реального времени, обеспечивая наземную поддержку космического эксперимента. В некоторых случаях эта поддержка связана с достаточно сложным и ответственным процессом.

Так, например, эксперимент ДАН на борту американского марсохода «Марсианская научная лаборатория», представляет собой первый в истории ядерных исследований пример активного нейтронного каротажа вещества другой планеты с борта самоходного автоматического аппарата. Данные измерений, полученные на марсоходе во время его движения в течение одного марсианского дня («сола»), будут в конце каждого «сола» передаваться на Землю для экспресс-обработки и оценки содержания воды в марсианском грунте вдоль пройденного аппаратом участка трассы. В течение нескольких часов полученные данные будут параллельно обрабатываться в разных центрах-участниках эксперимента ДАН, систематизироваться в одном месте и представляться оперативной группе управления проектом для планировании исследований очередного марсианского «сола».

Очевидно, что надежность, слаженность работы и высокий научный уровень рассматриваемых наземных комплексов являются важным условием научного успеха проектов.

### Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработаны новые образцы контрольно-испытательной аппаратуры (КИА) для современных научных космических приборов БТН-Нейтрон (Российский сегмент МКС), ЛЕНД (аппарат НАСА «Лунный орбитальный разведчик») и ДАН (марсоход НАСА «Марсианская научная лаборатория»), основанных на применении ядерно-физических методов для изучения состава вещества небесных тел и радиационного фона в космическом пространстве. Показано, что использование такой архитектуры с учетом специфики ядерных измерений позволяет выполнить всю программу

наземной отработки космических приборов с учетом требований радиационной безопасности и взаимодействия большого числа участников испытаний в условиях удаленного доступа. На конкретных примерах контрольно-испытательной аппаратуры для приборов ЛЕНД, ДАН и ХЕНД-НС продемонстрировано преимущество аппаратуры с новой архитектурой над известными аналогами.

2. Разработан и создан новый наземный узел обеспечения космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на Российском сегменте МКС, который в настоящее время полностью обеспечивает оперативное управление этой аппаратурой и экспресс-обработку поступающей с борта научной и служебной информации.
3. Исследованы варианты, разработаны структура и принципы функционирования наземного комплекса обеспечения космических экспериментов ЛЕНД на космическом аппарате НАСА «Лунный орбитальный разведчик» и ДАН на космическом аппарате НАСА «Марсианская научная лаборатория», созданы и введены в эксплуатацию российские сегменты этих комплексов. Наземный комплекс прибора ЛЕНД в настоящее время обеспечивает проведение этого эксперимента на борту космического аппарата ЛРО. Наземный комплекс прибора ДАН обеспечивает наземные испытания летных образцов этого прибора на испытательных стендах НАСА и на борту космических аппаратов.
4. Предложены и реализованы современные методики экспресс-анализа данных измерений современных космических приборов ЛЕНД и ДАН на основе применения ядерно-физических методов, которые позволяют на основе полученных бортовых данных за минимальное время вырабатывать программы научных измерений на последующий промежуток времени для получения максимальной научной отдачи.
5. Созданы единая база данных российских космических экспериментов по ядерной планетологии на борту отечественных и зарубежных космических аппаратов, и программные продукты обработки и анализа этих данных, доступные заинтересованным исследователям в режиме удаленного доступа.

### Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, прошли достаточно детальную апробацию. Эти результаты докладывались на совещаниях с привлечением независимых специалистов-экспертов, посвященных защите эскизных проектов бортовой и наземной аппаратуры экспериментов «БТН-Нейтрон» на МКС, ЛЕНД на ЛРО и ДАН на МНЛ. Во всех этих совещаниях автор представленной работы самостоятельно обосновывал концепцию и структуру наземного комплекса, представлял результаты разработки программных и аппаратных средств, демонстрировал качество работы аппаратуры. По итогам этих совещаний были сделаны выводы о высоком качестве разработки наземных комплексов аппаратуры и были приняты решения о создании штатных образцов. Достоверность и высокая надежность полученных результатов также подтверждается большим объемом испытаний созданной наземной аппаратуры, выполненных в ходе работ по проектам, и накопленным успешным опытом эксплуатации этой аппаратуры в ходе практической работы.

Результаты представленного исследования 7 раз докладывались на российских и международных научных конференциях:

- на конференции по научной программе исследований на МКС (ноябрь 2007 г., г. Королёв);
- ряде международных рабочих совещаний по проектам «Марс Одиссей», «Лунный разведывательный орбитер», «Марсианская научная лаборатория» в 2004–2009 гг.;
- конференциях молодых специалистов ИКИ РАН в 2006–2007 гг.

Эти результаты были опубликованы в 5 статьях в реферируемых научных журналах:

- *Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Vostrukhin A. A. et al. The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment for NASA's 2009 Mars Science Laboratory // Astrobiology. June, 2008. V. 8(3). P. 605–612. doi:10.1089/ast.2007.0157.*
- *Mitrofanov I. G., Bartels A., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Vostrukhin A. A. et al. Lunar Exploration Neutron Detector for NASA Lunar Reconnaissance Orbiter // Space Science Review. Dec., 2009. 0038-6308 (Print) 1572–9672 (Online). doi:10.1007/s11214-009-9608-4.*

- *Mitrofanov I. G., Kozyrev A. S., Kononov A., Litvak M. L., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Sanin A. B., Tretyakov V. I., Vostrukhin A. A., Bobrovnikskij Yu. I., Tomilina T. M., Gurvits L., Owens A.* The Mercury Gamma and Neutron Spectrometer (MGNS) on Board the Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission // *Planetary and Space Science*. Jan., 2010. V. 58. Iss. 1–2. P. 116–124. doi:10.1016/j.pss.2009.01.005.
- *Mitrofanov I., Litvak M., Tretyakov V., Mokrousov V., Malakhov A., Vostrukhin A.* Neutron Components of Radiation Environment in the Near-Earth and Near-Mars Space // *Planetary and Space Science*. Dec., 2009. V. 57. Iss. 14–15. P. 1993–1995, doi:10.1016/j.pss.2009.08.005.
- *Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Vostrukhin A. A.* et al. Experiment LEND of NASA Lunar Reconnaissance Orbiter for High Resolution Mapping of Neutron Emission of the Moon // *Astrobiology*. Aug., 2008. V. 8(4). P. 793–804. doi:10.1089/ast.2007.0158.

Так же результаты докладывались на научных конференциях:

- *Малахов А. В., Митрофанов И. Г., Вострухин А. А., Козырев А. С., Литвак М. Л., Мокроусов М. И., Санин А. Б., Третьяков В. И.* Наземный сегмент для обеспечения получения, хранения и обработки данных научного эксперимента «БТН-Нейтрон» на служебном модуле «Звезда» Международной космической станции // 7-я Международная научно-практическая конф. «Пилотируемые полеты в космос». 14–15 нояб. 2007 г., Звездный городок: Сб. тез. Звездный городок: РГНИИЦПК им. Ю. А. Гагарина, 2007.
- *Третьяков В. И., Малахов А. В., Мокроусов М. И., Вострухин А. А.* и др. Перспективные приборы для ядерной планетологии // *Космич. приборостроение: Координатно-временные системы с использованием космич. технологий и приборы для космич. исслед. планет и Земли* / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 298–310.
- *Третьяков В. И., Митрофанов И. Г., Вострухин А. А., Козырев А. С., Литвак М. Л., Мокроусов М. И., Малахов А. В., Санин А. Б., Крылов А. В., Тимошенко Г. Н., Швецов В. Н., Ягушин В. И., Пронин М. А., Тюрин М. В., Лопес-Алегриса М.*

- Космический эксперимент «БТН-Нейтрон» на борту служебного модуля «Звезда» Международной космической станции // 7-я Международная научно-практическая конф. «Пилотируемые полеты в космос». 14–15 нояб. 2007 г., Звездный городок: Сб. тез. Звездный городок: РГНИИЦПК им. Ю. А. Гагарина, 2007.
- *Litvak M. L., Kozyrev A. S., Malakhov A. V., Mitrofanov I. G., Mokrousov M. I., Sanin A. B., Tretyakov V. I., Vostrukhin A. A.* Monitoring of Abundance and Depth Distribution of Water Along the Path of MSL Rover with DAN Instrument // 7<sup>th</sup> Intern. Conf. on Mars. July 9–13, 2007, Pasadena, California. LPI Contribution No. 1353. P. 3101.
- *Litvak M. L., Kozyrev A. S., Malakhov A. V., Mitrofanov I. G., Mokrousov M. I., Sanin A. B., Tretyakov V. I., Vostrukhin A. A.* Dynamic Albedo of Neutrons Instrument Onboard MSL Mission: Selection of Landing Site from HEND/Odyssey Data // 38<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conf. (Lunar and Planetary Science XXXVIII). March, 12–16, 2007, League City, Texas. LPI Contribution No. 1338. P. 1554.
- *Mitrofanov I. G., Sagdeev R. Z., Boynton W. V., Evans L., Harshman K., Kozyrev A. S., Litvak M. L., Malakhov A. V., Milikh G., Shevchenko V. V., Schvetsov V. N., Starr R., Trombka J., Vostrukhin A. A., Mokrousov M. I.* Lunar Exploration Neutron Detector (LEND) for NASA Lunar Reconnaissance Orbiter // American Geophysical Union. Fall Meeting 2006: Abstr. 2006. No. P51D-1234.
- *Sanin A., Boynton W., Malakhov A., Mokrousov M. I., Vostrukhin A. A.* et al. Lunar Exploration Neutron Detector (LEND) for NASA Lunar Reconnaissance Orbiter // 38<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conf. (Lunar and Planetary Science XXXVIII). March, 12–16, 2007, League City, Texas. LPI Contribution No. 1338. P. 1648.

### Структура и объём работы

Диссертационная работа содержит 7 глав, 143 страниц текста, 44 рисунка и 13 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 72 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *главе 1* приводится краткий обзор работы — целей и задач исследования, формулируются основные требования к наземным комплексам.

В *главе 2* представлено краткое описание научных космических экспериментов по ядерной планетологии, которые проводятся в настоящее время или намечены к реализации в ближайшем будущем, в которых автор диссертационной работы принимал непосредственное участие. В главе даны общие физические принципы, используемые при измерениях приборами ядерной планетологии, а также приводятся краткие описания рассматриваемых в диссертационной работе приборов: БТН-М1 для Международной космической станции, ЛЕНД для лунного спутника «НАСА Лунный разведывательный орбитер» (ЛРО), ДАН для марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория» (МНЛ), НС-ХЕНД для посадочного аппарата Роскосмоса Фобос-Грунт.

В *главе 3* диссертационной работы приводится обзор современных средств наземного обеспечения научных космических экспериментов. В разделе 3.1 в общем плане рассматривается структура наземного комплекса аппаратуры для космического эксперимента, сформулированы специфические задачи и функции такой аппаратуры для ядерно-физических экспериментов. Представленная структура наземного комплекса по существу определяет последовательность и содержание глав представленной диссертационной работы: изложение материала начинается с описания новых разработок контрольно-испытательной аппаратуры (глава 4), которая используется при наземных отработках приборов до космического полета, затем описываются созданные с участием автора наземные узлы обеспечения космических экспериментов в условиях космического полета (глава 5), в главе 6 изложены методы экспресс-анализа и обработки полученных в космосе научных данных и служебных измерений, и, наконец, глава 7 посвящена новым разработкам по обеспечению хранения и научного анализа данных ядерно-физических измерений. Раздел 3.2 определяет место, которое занимают современные вычислительные средства в наземном сегменте космических экспериментов. Показано, что использование современных средств автоматизации физических экспериментов для обеспечения испытаний научных космических приборов и их

функционирования на борту космических аппаратов позволяет существенно повысить надежность отработок космической аппаратуры и создать условия для успешного управления экспериментом в полете, существенно расширить объем научных исследований и обеспечить привлечение к проведению космического эксперимента максимально широкого круга ведущих исследователей и специалистов в области планетных и ядерных исследований. В разделе 3.3 уточняются задачи наземного сегмента, специфические для приборов ядерной планетологии.

В *главе 4* представлены результаты разработки новых образцов контрольно-испытательной аппаратуры (КИА) для научных космических экспериментов в области ядерной планетологии. Представлен перечень основных задач и функций КИА и приведена общая блок-схема такого устройства (раздел 4.1). В разделе 4.2 проведен сравнительный анализ четырех вариантов архитектуры контрольно-испытательной аппаратуры для космических приборов. На основе этого анализа предложен новый вариант архитектуры КИА, который позволяет проводить полный цикл испытаний ядерно-физической аппаратуры с применением активных источников нейтронного излучения и гамма-излучения в условиях повышенного радиационного фона, и также обеспечивает проведение программы физических калибровок в условиях высокого радиационного фона. В качестве примера приведено описание КИА нейтронного телескопа ЛЕНД для проекта НАСА «Лунный разведывательный орбитер» (рис. 1). Программное обеспечение для КИА с новой архитектурой рассматривается в разделе 4.3. Показано, что это программное обеспечение в высокой степени соответствует требованиям ядерно-физических экспериментов и вместе с тем позволяет в полном объеме контролировать качество работы космического прибора на всех этапах его наземной экспериментальной отработки. В разделе 4.4 обсуждаются перспективы развития аппаратных и программных средств наземной отработки и испытаний научных космических приборов для современных исследовательских проектов.

В *главе 5* рассматриваются вопросы проектирования, создания и использования современных наземных узлов обеспечения космических экспериментов на борту пилотируемых и автоматических космических аппаратов. В разделе 5.1 в качестве первого примера рассматривается узел управления и обработки данных российского



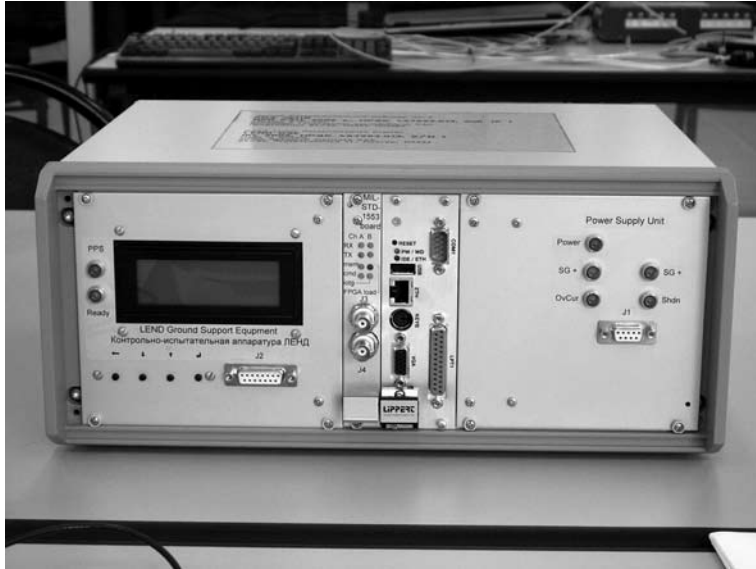


Рис. 1. Внешний вид КИА ЛЕНД

научного эксперимента ЛЕНД на борту автоматической станции НАСА «Лунный Разведывательный Орбитер». Особенностью этого узла является то, что он имеет несколько составляющих, расположенных в ИКИ РАН в России, в Центре космических полетов НАСА им. Годдарда в Гринбелте (США), в Университете штата Мэриленд в Колледж Парке (США) и в Университете штата Аризона в Тусане (США) (рис. 2). В каждом из этих узлов параллельно будут выполняться различные задачи по наземной поддержке эксперимента и по обработке данных измерений. Центральный узел в России должен обеспечить координацию и взаимодействие всех этих узлов и управление бортовой научной аппаратурой в ходе космического эксперимента.

В разделе 5.2 описан второй пример более сложного наземного сегмента космического эксперимента — узел управления и обработки данных российского научного эксперимента ДАН на борту автоматического марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория». Этот эксперимент предусматривает облучение грунта импульсным нейтронным генератором (ИНГ) на борту космического

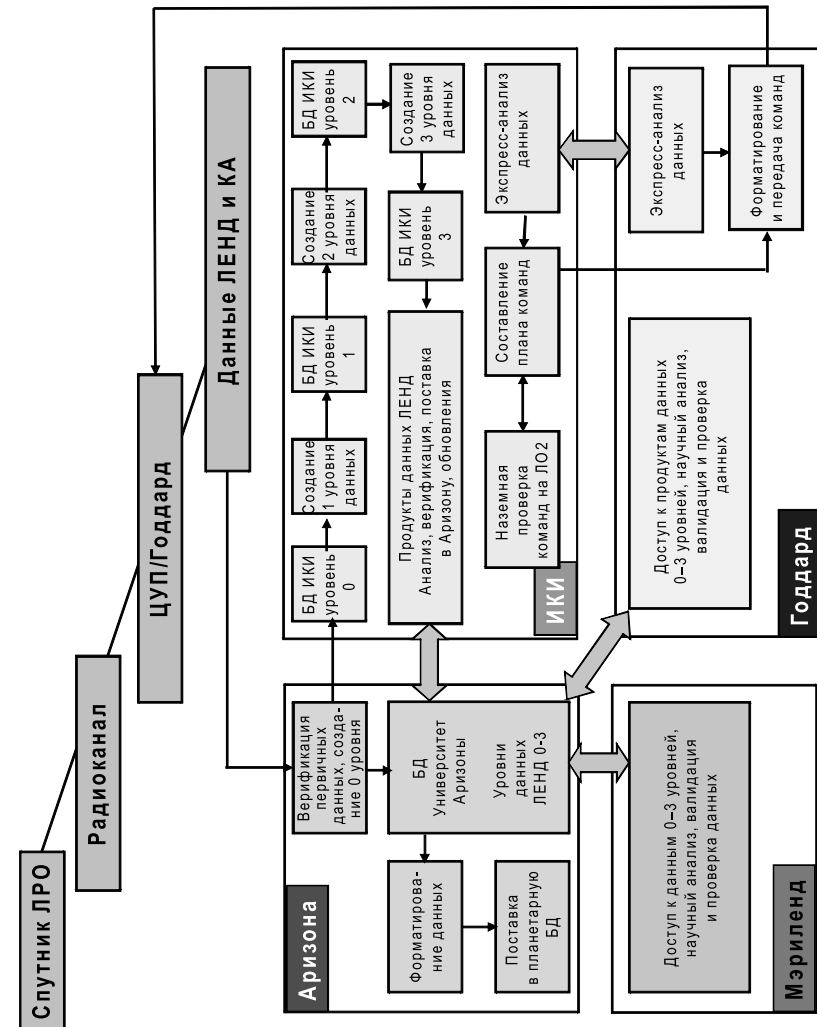


Рис. 2. Структура узла наземной оперативной поддержки эксперимента ЛЕНД

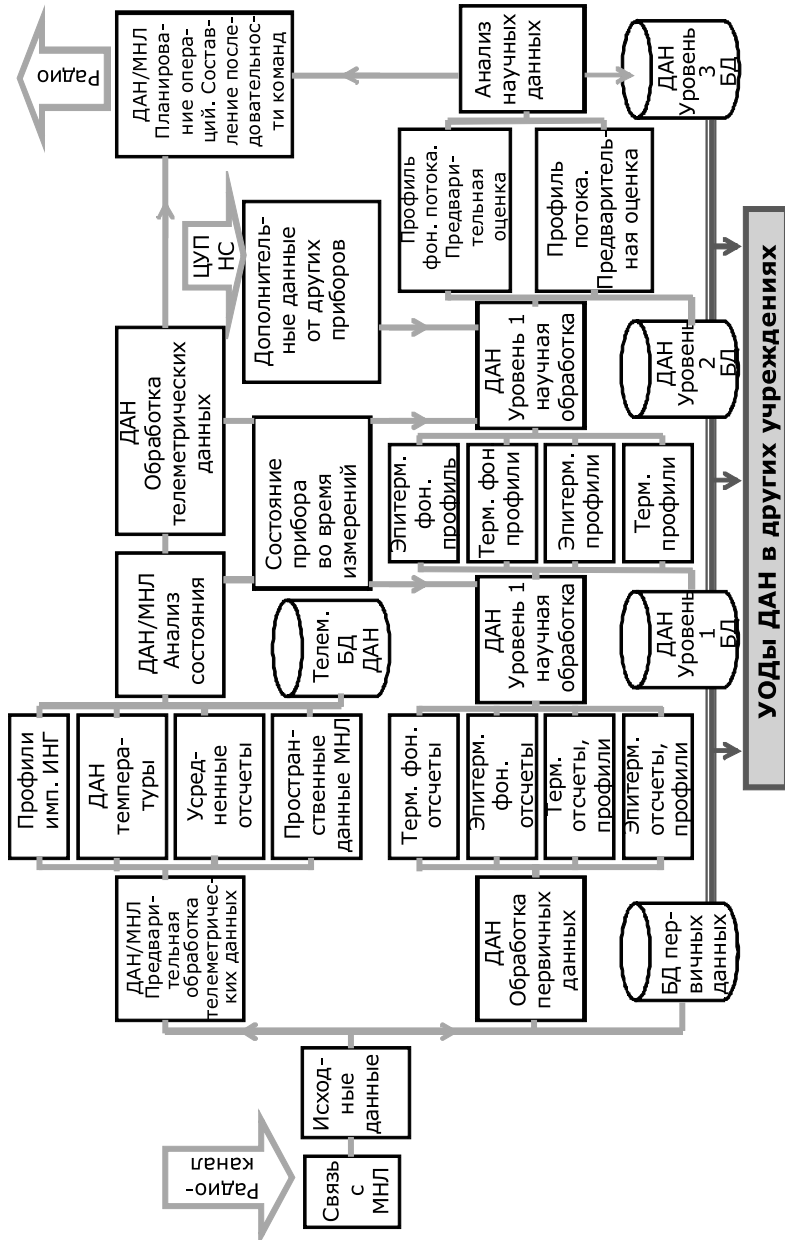


Рис. 3. Структура узла оперативной наземной поддержки эксперимента ДАН

аппарата на поверхности другого небесного тела, и поэтому оперативный контроль и управление этим экспериментом с Земли имеют принципиальное значение. Важной особенностью наземного узла ДАН является необходимость оперативной обработки данных измерений для каждого предыдущего дня («сола») работы на Марсе и выработка предложений по программе исследований следующего дня. Поэтому структура узла ДАН была спроектирована и реализована с учетом этих двух требований (рис. 3).

В разделе 5.3 описан ещё один пример успешно реализованного узла обработки данных (УОД) — для прибора «БТН-Нейтрон», работающего на Международной космической станции. В связи с тем, что этот прибор не требует какого-либо специального управления или других специфических обработок данных (основная цель эксперимента — измерение радиационного фона вокруг МКС), данный УОД не содержит большого количества узлов, решающих различные задачи. Однако с его помощью вполне удачно демонстрируются основные задачи по обработке данных прибора ядерной планетологии.

Все представленные узлы были разработаны и созданы при непосредственном участии автора диссертационной работы.

В главе 6 рассматриваются вопросы экспресс-анализа и физической обработки результатов научных измерений ядерно-физических космических приборов БТН-М1, ЛЕНД и ДАН. Цели и задачи экспресс-анализа научных данных представлены в разделе 6.1. В разделе 6.2 приведены основные известные методы экспресс-анализа данных ядерно-физических экспериментов с учетом их специфики. В разделе 6.3 описаны организация работ при экспресс-анализе данных и их практическая реализация в условиях наземных испытаний и на этапе космического полета. Особенности физического анализа данных измерений ядерно-физических приборов представлены в разделе 6.4. Теоретические основы физической обработки и интерпретации данных измерений нейтронов и гамма-лучей от поверхности планеты или небесного тела приведены в разделах 6.5 и 6.6. В разделе 6.5 также изучается вопрос о влиянии на программу исследований планет условий проведения космического эксперимента (транзиентных эффектов от космического гамма- и нейтронного излучения, солнечных вспышек, магнитосферных эффектов и т. п.). Общий алгоритм процедуры обработки данных ядерно-физических измерений представлен в разделе 6.7.

Описание практической реализации этого алгоритма для обработки данных экспериментов «БТН-Нейтрон», ЛЕНД и ДАН, которое выполняется автором представленной работы, содержится в разделе 6.8. В заключительном разделе 6.9 кратко обсуждаются способы независимой проверки достоверности результатов обработки данных ядерно-физических измерений, полученных при наземных испытаниях и в условиях космического полета.

В *главе 7* рассматриваются вопросы организации хранения и научного анализа данных измерений космическими ядерно-физическими приборами. В разделе 7.1 перечислены основные этапы обработки научных данных ядерно-физических приборов — от уровня первичной информации до конечных «научных продуктов» — являющихся конечной целью проведенных исследований. Структура данных, которые обрабатываются и хранятся в узлах обработки данных, представлена в разделе 7.2. Разделы 7.3–7.4 более подробно описывают основные процессы, происходящие в узлах обработки данных: хранение, обработка, распространение. Далее приведены конкретные примеры новых узлов обработки данных, созданных с участием автора представленной работы, а также примеры баз данных отдельных приборов по ядерной планетологии, функционирующих в составе таких узлов. Этому посвящены разделы 7.5–7.7. Наконец, в разделе 7.8 обсуждаются используемые новые информационные технологии и их взаимодействие в рамках единой системы обработки данных. Выводы и заключения по вопросам обработки научных данных приведены в разделе 7.9.

В заключении (*глава 8*) диссертационной работы приведены основные выводы выполненного исследования и представлены результаты, выносимые на защиту.

## Содержание

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ . . . . .	1
Актуальность работы . . . . .	1
Предмет исследования. . . . .	2
Цели и задачи исследования. . . . .	3
Научная новизна. . . . .	5
Практическая значимость. . . . .	6
Основные положения, выносимые на защиту. . . . .	7
Апробация работы . . . . .	9
Структура и объём работы. . . . .	11
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ . . . . .	12

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН  
Москва, 117997, Профсоюзная ул., 84/32

Подписано к печати 18.05.2010 г.

Заказ 2207

Формат 70×108/32

Тираж 100

0,8 уч.-изд. л.

