

На правах рукописи

*МОКРОУСОВ Максим Игоревич*

**РАЗРАБОТКА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ  
ДЛЯ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ  
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 технических наук  
*Горн Лев Соломонович*  
Специализированный научно-исследовательский  
институт приборостроения

доктор физико-математических наук  
*Застенкер Георгий Наумович*  
Учреждение Российской академии наук  
«Институт космических исследований РАН»

**Ведущая организация:**

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

Защита диссертации состоится **25 июня 2010 года в 15:00**  
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. Попеко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Регистрация ядерного излучения нейтронов или гамма-лучей от вещества небесных тел, которое подвержено бомбардировке галактическими космическими лучами или облучению от искусственного источника энергичных нейтронов, позволяет «измерить» ядерный состав этого вещества и оценить степень присутствия в нем водорода. Такие измерения также позволяют оценить содержание в веществе естественных радиоактивных элементов. Этот метод «ядерного зондирования» позволяет «заглянуть внутрь» вещества под поверхность небесного тела на глубину около 1 м и измерить его состав без бурения и забора образцов грунта. Такие измерения с борта орбитального космического аппарата позволяют построить глобальную карту распространенности основных и радиоактивных элементов для всей поверхности Луны, Марса или Меркурия.

Оптические и инфракрасные наблюдения позволяют судить о составе только самого верхнего слоя толщиной около нескольких микрон. Радиозондирование дает возможность «заглянуть» на глубины около 10 м и более, и оно не чувствительно к элементному составу вещества, а только к вариациям его диэлектрической проницаемости. Поэтому только применение методов ядерно-физических исследований позволяет выполнить оценку содержания основных элементов и радиоактивных изотопов и тем самым является единственным бесконтактным способом выяснения условий образования и характера эволюции вещества небесного тела, изучения процессов формирования различных районов его поверхности.

Диссертационная работа посвящена разработке новых космических приборов для ядерно-физических научных космических

экспериментов на борту российских и иностранных космических аппаратов, включенных в Федеральную космическую программу РФ. В связи с тем, что условия разработки и реализации этих экспериментов выдвигают принципиально новые требования к бортовой научной аппаратуре, данная работа является актуальной.

### Предмет исследования

За истекшие более чем 40 лет ядерно-физические методы исследования планет получили существенное развитие. Были выполнены ряд успешных космических экспериментов по измерениям нейтронной компоненты радиационного фона в околоземном космическом пространстве и ядерным исследованиям состава поверхности небесных тел. Эти исследования позволили существенно продвинуться в понимании процессов формирования Луны, Венеры, Марса и малых тел Солнечной системы. Вместе с тем, на основе полученных результатов были выдвинуты задачи для новых исследований, сформулированы требования к разработке новых научных приборов с применением методов ядерной физики в космосе, что и явилось предметом исследования данной работы.

Данная диссертационная работа подготовлена в лаборатории космической гамма-спектроскопии Института космических исследований РАН, которая является одним из центров ядерно-физических исследований небесных тел. Работы в этом направлении в ИКИ РАН проводятся по теме РАН «Ядерная планетология» (регистрационный № 01.20.03 03438).

Предметом исследования представленной диссертационной работы являются разработка и создание перспективных научных приборов для обеспечения ядерно-физических научных космических экспериментов на борту российских и иностранных космических аппаратов, включенных в Федеральную космическую программу РФ.

### Цели и задачи исследования

Для успешного проведения космического эксперимента по исследованию состава вещества небесного тела методами ядерной

физики необходимо создать бортовую аппаратуру, которая обеспечит реализацию следующих основных функциональных требований:

Функциональное требование	Свойство ядерно-физического прибора или выполняемый им процесс
ФТ1	Обеспечение детекторов нейтронов и гамма-лучей высоким напряжением
ФТ2	Амплитудно-цифровое преобразование отсчетов детекторов нейтронов и гамма-лучей с выбором оптимальной спектральной шкалы в заданном интервале энергий
ФТ3	Обеспечение параллельного и независимого функционирования нескольких детекторов нейтронов и гамма-лучей
ФТ4	Защита детекторов нейтронов и гамма-лучей от вклада отсчетов от посторонних частиц
ФТ5	Накопление профиля послесвечения исследуемого вещества в нейтронах и гамма-лучах под воздействием импульсов нейтронов от генератора
ФТ6	Интегральная и дифференциальная точность и стабильность спектральной шкалы для измерения ядерных гамма-линий
ФТ7	Управление импульсным нейтронным генератором
ФТ8	Обеспечение защиты от самопроизвольного срабатывания импульсного нейтронного генератора
ФТ9	Формирование, хранение и передача на борт кадров научной и служебной информации
ФТ10	Управление и настройка параметров измерительных трактов прибора
ФТ11	Хронометрирование основных процессов прибора и привязка их к бортовому времени
ФТ12	Мониторинг состояния прибора и предотвращение возможных аварийных ситуаций
ФТ13	Взаимодействие с бортовыми системами космического аппарата
ФТ14	Высокая помехозащищенность к воздействию радиации

Целью данной диссертационной работы является *построение научно-методической основы для разработки новых космических приборов*

*по изучению околоземного космического пространства, Луны, Марса, Фобоса и Меркурия на основе применения последних достижений экспериментальной ядерной физики.*

Автор представленного диссертационного исследования был ведущим разработчиком действующего в настоящее время комплекса научной аппаратуры БТН-М1 для космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту Российского сегмента Международной космической станции. Он также является ведущим разработчиком аппаратуры для космических экспериментов ЛЕНД на борту аппарата НАСА «Лунный Орбитальный Разведчик», НС ХЕНД на борту российского межпланетного аппарата «Фобос-Грунт», ДАН на борту перспективного аппарата НАСА «Марсианская Научная Лаборатория» и МГНС на борту перспективного аппарата ЕКА «БепиКоломбо».

### Научная новизна

Представленное исследование является частью обширной 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* этого исследования 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. Полученные в диссертационной работе результаты и выполненная на их основе разработка научной аппаратуры определяют современный уровень развития космической науки в области ядерной планетологии. Эти проекты запланированы к реализации в 2009–2020 гг., поэтому выполненная в рамках представленного исследования разработка научных приборов для этих проектов является весьма актуальной.

Все результаты диссертации были получены в ответ на практические запросы и требования в ходе разработки современных космических приборов, причем многие предложенные решения не имеют зарубежных аналогов и были предложены впервые.

Конкретные элементы новизны представленного исследования состоят в следующем:

1. Предложена и впервые реализована на практике концепция установки научного прибора на борту МКС с условиях космического полета (аппаратура БТН-М1), причем в качестве детектирующего элемента было предложено использовать запасной летный прибор ХЕНД, созданный для ядерно-физического эксперимента на борту межпланетного аппарата НАСА «Марс Одиссей».
2. Предложена и впервые реализована на практике в рамках проекта НАСА «Лунный Разведывательный Орбитер» концепция нейтронного телескопа для картографирования поверхности Луны с борта орбитального космического аппарата с пространственным разрешением 10 км (аппаратура ЛЕНД).
3. Предложена и впервые реализована на практике в рамках проектов «Фобос-Грунт» и «БепиКоломбо» концепция моноблочного нейтронного и гамма-спектрометра, совмещающего 4 измерительных тракта нейтронов в различных энергетических диапазонах и сцинтилляционного гамма-спектрометра на основе кристалла  $\text{LaBr}_3$  со спектральным разрешением около 3 % на энергии 662 кэВ.
4. Предложена и впервые реализована на практике в рамках проекта НАСА «Марсианская Научная Лаборатория» концепция активного нейтронного прибора для измерения содержания водорода в веществе грунта Марса (аппаратура ДАН).

### Практическая значимость

Выполненные в ходе подготовки диссертации исследования имеют *большую практическую ценность*, так как позволили создать новые космические приборы для проведения важных приоритетных исследований околоземного космического пространства, Луны, Марса, Фобоса и Меркурия.

На основе выполненных в ходе подготовки диссертации исследований был создан космический научный прибор БТН-М1 для проведения первого этапа эксперимента «БТН-Нейтрон» на

Российском сегменте Международной космической станции. В настоящее время на основе этих исследований была успешно завершена разработка нейтронного телескопа ЛЕНД, который установлен на борту лунной автоматической станции НАСА «Лунный разведывательный орбитер» (ЛРО). Завершены работы по созданию нейтронного и гамма-спектрометра НС ХЕНД для российской автоматической станции «Фобос-Грунт» и нейтронно-активационного прибора ДАН для автоматического марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория» (МНЛ). Кроме этого, на основе полученных в диссертации результатов производится разработка нейтронного и гамма-спектрометра МГНС для европейского межпланетного космического аппарата «БеппиКоломбо» для исследования планеты Меркурий.

#### Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработана концепция первого этапа научного эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту МКС в условиях доставки и размещения на борту Российского сегмента действующей станции новой аппаратуры БТН-М1, включающей запасной летный образец прибора ХЕНД для марсианского проекта НАСА «Марс Одиссей»; на основе проведенного исследования обоснована целесообразность построения интерфейсного электронного блока этой аппаратуры на базе микропроцессора со специализированным программным обеспечением и с возможностью последующего расширения состава научной аппаратуры на следующих этапах эксперимента; на этой основе создан комплект летной аппаратуры БТН-М1, который успешно прошел летные испытания и в настоящее время функционирует на борту МКС.
2. Разработана концепция нейтронного телескопа с многомодульным узлом детектирования; на этой основе создан, испытан и установлен в настоящее время успешно функционирует на борту исследовательского аппарата НАСА «Лунный Разведывательный Орбитер» летный образец прибора ЛЕНД.
3. Разработана концепция моноблочного нейтронного и гамма-спектрометра с многомодульным узлом детектирования

нейтронов и гамма-лучей для межпланетных автоматических аппаратов; на этой основе создан, испытан и подготовлен к постановке на борт летный образец прибора НС ХЕНД для российского межпланетного аппарата «Фобос-Грунт».

4. Разработана концепция построения научной космической аппаратуры для нейтронно-активационного анализа вещества другой планеты с борта спускаемого аппарата; на этой основе создан комплекс аппаратуры ДАН, включающий блок детектирования и электроники ДАН-ДЭ для совместной работы с блоком импульсного нейтронного генератора ДАН-ИНГ; выполнены автономные и комплексные испытания аппаратуры ДАН в составе марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория».

#### Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, прошли достаточно детальную апробацию. Эти результаты 11 раз докладывались на совещаниях с привлечением независимых специалистов-экспертов, посвященных защите эскизных проектов аппаратуры экспериментов «БТН-Нейтрон» на МКС, ЛЕНД на ЛРО, ДАН на МНЛ и МГНС на «БеппиКоломбо». В этих совещаниях автор представленной работы самостоятельно обосновывал конструктивные решения разработанных им узлов аппаратуры, демонстрировал результаты наземных отработок и испытаний образцов приборов. По итогам этих совещаний независимыми экспертами были сделаны выводы о высоком качестве разработки космической аппаратуры и были приняты решения о ее готовности к установке на борт космических аппаратов.

*Достоверность и высокая надежность полученных научных результатов* также подтверждается большим объемом испытаний созданной бортовой аппаратуры, выполненных в ходе работ по проектам, и накопленным успешным опытом эксплуатации этой аппаратуры в ходе практической работы.

Результаты исследований околоземного космического пространства прибором БТН-М1 докладывались на конференции по научной программе исследований на МКС (ноябрь 2007 г.,

г. Королёв). Результаты разработки приборов ЛЕНД, НС ХЕНД, МГНС и ДАН докладывались на международных рабочих совещаниях по проектам «Марс Одиссей», «Лунный разведывательный орбитер», «Марсианская научная лаборатория» в 2004–2008 гг., на конференциях молодых специалистов ИКИ РАН, они были опубликованы в пяти статьях в реферируемых научных журналах.

Полученные в диссертационном исследовании результаты опубликованы в следующих 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., Konovalov 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 конференциях:

- *Малахов А. В., Митрофанов И. Г., Вострухин А. А., Козырев А. С., Литвак М. Л., Мокроусов М. И., Санин А. Б., Тре-*

*тьяков 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., Лягушин В. И., Пронин М. А., Тюрин М. В., Лопес-Алегрриа 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., Vostrukh-*

*in 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 9 глав, 178 страниц текста, 61 рисунок и 38 таблиц. Список цитируемой литературы включает 65 наименований.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В *главе 2* диссертационной работы представлен обзор современных исследований небесных тел и планет Солнечной системы с использованием методов ядерной физики. В разделе 2.1 изложены основные результаты изучения гамма-излучения и нейтронного потока от поверхности Луны с борта лунного орбитального аппарата «Лунар Проспектор». Показано, что полученные в рамках этого проекта данные измерений позволили построить глобальные карты распространённости в лунном реголите таких породообразующих элементов как Fe и Ti, а также радиоактивных изотопов K и Th. Оказалось, что средняя концентрация водорода в лунном реголите значительно повышается в районах лунных полюсов. С учетом этого обстоятельства и также данных радиолокации было сделано предположение, что на дне постоянно затененных лунных полярных кратеров могут находиться залежи водяного льда, вследствие которых в окрестности лунных полюсов наблюдается значительное

уменьшение среднего потока с поверхности над-тепловых нейтронов. В разделе 2.2 представлены результаты изучения нейтронного и гамма-излучения с поверхности Марса комплексом научной аппаратуры ГРС на борту межпланетного аппарата НАСА «Марс Одиссей». Этот комплекс аппаратуры включает полупроводниковый гамма-спектрометр из высокочистого германия ГРС, нейтронный спектрометр НС и российский детектор нейтронов высоких энергий ХЕНД, который был разработан и изготовлен в лаборатории космической гамма-спектроскопии при непосредственном участии автора данной диссертационной работы.

Измерения потока ядерного излучения от Марса прибором ХЕНД с борта космического аппарата «Марс Одиссей» были начаты в октябре 2001 г. и успешно продолжаются в настоящее время. За это время было установлено, что в районах Марса на севере и юге выше 60° широты вещество поверхности представляет собой вечную мерзлоту, содержание водяного льда в которой составляет 20...50 % по массе. Этот результат существенно поменял представления о Марсе как о сухой планете и определил задачи нескольких последующих проектов по изучению этой планеты.

В разделе 2.3 представлены основные задачи будущих исследований Луны, Марса и других тел Солнечной системы с использованием методов ядерной физики, которые были сформулированы на основе полученных ранее научных результатов. Эти задачи определили требования к разрабатываемой в настоящее время научной аппаратуре (раздел 2.4), научная основа разработки которой представлена в данной диссертационной работе. Наконец, в разделе 2.5 обсуждаются перспективы развития научного космического приборостроения для ядерно-физических исследований Луны и других небесных тел в Солнечной системе.

В *главе 3* обсуждаются основные современные подходы к созданию современной ядерно-физической аппаратуры для планетных исследований. В разделах 3.1 и 3.2 приведены описание и критерии выбора детекторов нейтронного и гамма-излучения, которые в наибольшей степени подходят для использования в космических ядерных приборах. В разделе 3.3 обсуждаются приборы, реализующие метод нейтронно-активационного анализа состава поверхности небесного тела, когда происходит облучение вещества мощным импульсным потоком нейтронов высоких энергий и измеряемый эффект связан с его послесвечением во вторичных гамма-лучах и

нейтронах. В разделе 3.4 представлена типовая блок-схема и перечислены основные узлы современного космического ядерно-физического прибора. Показано соответствие между устройством прибора и основными научными и функциональными требованиями к его разработке. В заключительном разделе 3.5 сформулированы основные задачи представленного диссертационного исследования, решение которых позволило создать научно-техническую основу для разработки новых космических приборов для ядерно-физических исследований.

В *главе 4* представлена научная основа разработки комплекса ядерной научной аппаратуры БТН-М1 для Российского сегмента Международной космической станции. В разделе 4.1 приведены основные научные задачи первого этапа космического эксперимента «БТН-Нейтрон» с аппаратурой БТН-М1 (рис. 1 и 2), а в разделе 4.2 сформулированы основные требования для создания этой аппаратуры. В разделе 4.3 обосновано использование микроконтроллера для электронного интерфейсного блока БТН-МЭ и рассмотрены варианты его реализации. В разделе 4.4 представлены описание и структура бортового программного обеспечения для этого интерфейсного блока. В разделе 4.5 обсуждаются возможности дальнейшего использования аппаратуры БТН-МЭ для обеспечения реализации следующих этапов космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту МКС. В разделе 4.6 представлены основные выводы по материалу, изложенному в главе 4.

В *главе 5* представлена научная основа разработки нейтронного телескопа ЛЕНД для лунного исследовательского аппарата НАСА ЛРО. В разделе 5.1 изложены основные задачи и исходные требования к разработке нейтронного телескопа ЛЕНД для картографирования распространенности водорода в веществе лунной поверхности. В разделе 5.2 описана концепция устройства прибора ЛЕНД, представлено описание его блок-схемы и основных узлов (рис. 3). В разделе 5.3 обоснована программа наземной отработки и испытаний прибора ЛЕНД, показано его соответствие основным требованиям и задачам. В разделе 5.4 изложены основные выводы по материалу главы 5.

В *главе 6* представлена научная основа разработки двух новых аналогичных приборов для спектроскопии нейтронного и гамма-излучения поверхности спутника Марса Фобос (нейтронный и гамма-спектрометр НС ХЕНД, рис. 4) и поверхности Меркурия



Рис 1. Детекторный блок БТН-МД и монтажная ферма БТН-МФ в сборе в электровакуумной термоизоляции

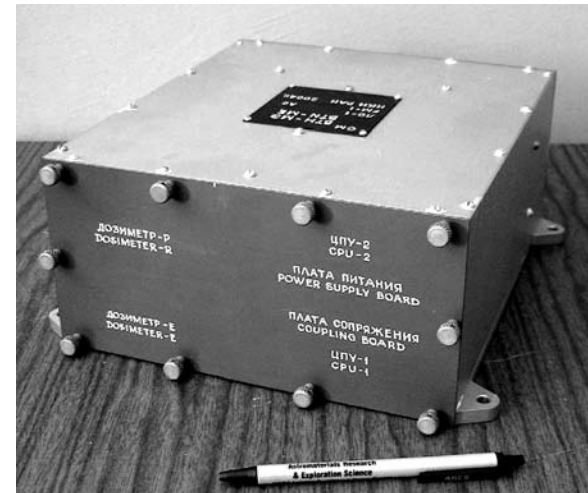
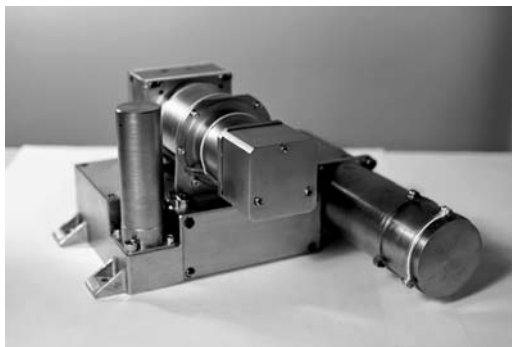


Рис 2. Внутренний блок электроники БТН-МЭ



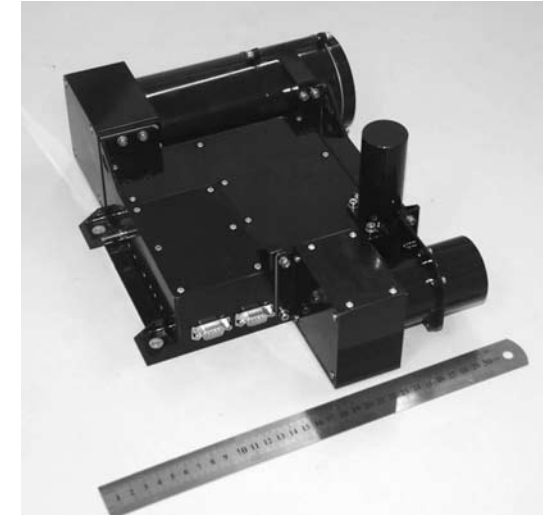


**Рис. 3.** Общий вид нейтронного телескопа ЛЕНД для космического аппарата НАСА «Лунный разведывательный орбитер» (лётный образец прибора)

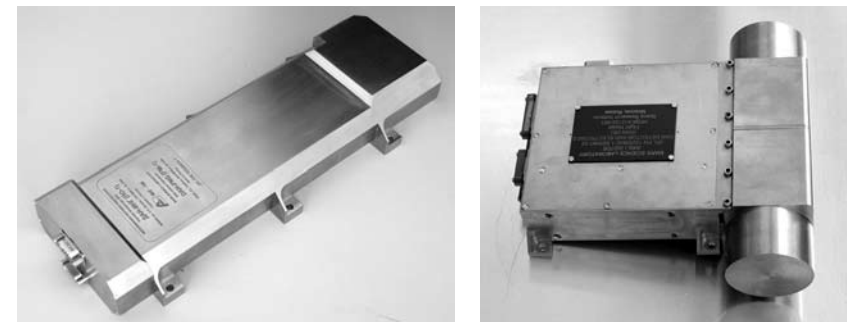


**Рис. 4.** Общий вид нейтронного и гамма-спектрометра НС ХЕНД для российского проекта «Фобос-Грунт» (образец для конструкторско-доводочных испытаний)

(Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр МГНС, рис. 5). В разделах 6.1 и 6.2 представлены научная концепция и основные задачи космических экспериментов с этими приборами. В разделе 6.3 изложена схема и описаны основные узлы приборов



**Рис. 5.** Общий вид нейтронного и гамма-спектрометра МГНС для европейского проекта «БепиКоломбо» (габаритно-тепловой образец)



**Рис. 6.** Общий вид блоков электроники (слева) и импульсного нейтронного генератора (справа) прибора ДАН для марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория»

с учетом обеспечения выполнения главных требований к научным экспериментам НС ХЕНД и МГНС. В разделе 6.4 приведены результаты испытаний и наземных отработок прибора НС ХЕНД, которые подтверждают правильность выбранных конструктивных решений. В разделе 6.5 представлены основные выводы по материалу главы 6.

*Глава 7* посвящена описанию научных основ разработки нового научного прибора ДАН для нейтрон-активационного анализа содержания водорода в веществе поверхности Марса с борта марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория» (рис. 6). В разделе 7.1 описано устройство аппаратуры ДАН, ее основных блоков и узлов. В разделе 7.2 изложена концепция разработки блока детектирования и электроники ДАН и в разделе 7.3 представлены результаты наземных испытаний и отработок изготовленной аппаратуры. Раздел 7.4 содержит основные выводы по материалу главы 7.

В *главе 8* рассмотрены основные проблемы радиационной стойкости космических приборов, созданных в рамках диссертационного исследования, а также методы их решения. Так, в разделе 8.1 приводятся классификация радиационных воздействий на электронные компоненты, а также разновидности отказов космической аппаратуры, вызванных радиационным воздействием. Раздел 8.2 посвящен методам обеспечения необходимой радиационной стойкости разрабатываемой аппаратуры.

В заключении (*глава 9*) диссертационной работы приведены основные выводы выполненного исследования и представлены результаты, выносимые на защиту.