

На правах рукописи

ВОСТРУХИН Андрей Александрович

**АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНЫЕ
СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ АППАРАТУРЫ
ДЛЯ НАУЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЯДЕРНОЙ
ПЛАНЕТОЛОГИИ**

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
Свертилов Сергей Игоревич

Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д. В. Скобельцына

доктор физико-математических наук
Цыган Анатолий Иванович

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится **25 июня 2010 года в 16:00**
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

Известно, что научные приборы для лабораторных или промышленных ядерно-физических измерений представляют собой достаточно специфичный класс физической аппаратуры, обеспечивающей регистрацию гамма-лучей и нейтронов на основе известных процессов взаимодействия этих частиц с веществом. Современная ядерная физика включает большой и быстро развивающийся раздел экспериментального ядерного приборостроения, уровень развития которого в значительной степени определяет уровень знаний в этой области. С другой стороны, современные приборы для ядерно-физических исследований определяют возможности применения методов ядерной физики в других областях науки и техники, от медицины до геологии. Поэтому как задачи фундаментальной науки, так и потребности практических приложений создают в настоящее время достаточно мощные предпосылки для развития техники ядерно-физических измерений. Разрабатываются и создаются новые сцинтилляционные кристаллы для регистрации гамма-лучей с высокой эффективностью и высоким спектральным разрешением, такие, например, как LaBr_3 , которые во многих случаях позволяют заменить полупроводниковые детекторы гамма-лучей из особо чистого германия и тем самым избежать необходимости применения криогенной аппаратуры для глубокого охлаждения германия. Интенсивно разрабатываются методы научного и промышленного нейтрон-активационного неразрушающего анализа элементного состава образцов вещества неизвестного

происхождения или внутреннего содержимого контейнеров. Применение ядерных методов в медицине стимулировало создание таких уникальных приборов как строящие изображения гамма-камеры, которые впоследствии нашли свое применение не только в промышленной гамма-дефектоскопии, но и в создании космических гамма-телескопов.

Уже самые ранние космические исследовательские аппараты несли на борту приборы для ядерно-физических измерений. Известно, что рентгеновская астрономия возникла в 1949 г., когда были обнаружены первые космические рентгеновские источники с борта суборбитальной ракеты простейшим рентгеновским детектором. Первые советские автоматические станции на окололунной орбите имели на борту гамма-спектрометры, которые позволили выполнить первые оценки элементного состава лунного реголита и содержания в лунном веществе естественных радиоактивных изотопов K, Th и U. Спустя около 40 лет после первого измерения гамма-излучения от небесного тела экспериментальная ядерная планетология превратилась в отдельную область научных космических исследований. Были выполнены (и проводятся в настоящее время) многочисленные научные эксперименты на межпланетных космических аппаратах, которые позволили получить многие важнейшие результаты о природе Луны, Марса, Венеры и других небесных тел Солнечной системы.

За последние 10–15 лет цифровая электроника для космической аппаратуры испытала значительный скачок развития. Если в начале 90-х годов прошлого века программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) только входили в практику космического приборостроения с достаточно скромными параметрами, характеризующими логический объем порядка 5000 вентилей и максимальной частотой 20 МГц, то в настоящее время в распоряжении исследователей имеются образцы ПЛИС, которые имеют логический объем около 4 миллионов вентилей и максимальную тактовую частоту более 350 МГц. Современные ПЛИС позволяют строить логически-цифровые узлы космических приборов на основе принципа конечного автомата (state machine), обеспечивают достаточно сложное функционирование прибора и управление его конфигурацией на основе однократно прописанного в ПЛИС единого бортового программного обеспечения (БПО), которое не допускает повторного перезаписывания или исправлений. Новые

возможности современных ПЛИС обеспечили **актуальность представленного исследования** — новые возможности создания сложных приборов для ядерно-физических приборов на основе использования современных ПЛИС потребовали выполнения специальных исследований и проработок, которые представлены в данной работе.

Диссертационная работа посвящена исследованию новой архитектуры и новых программных средств реализации, разработки и создания БПО для перспективных научных приборов для обеспечения ядерно-физических научных космических экспериментов на борту российских и иностранных космических аппаратов, включенных в программу Фундаментальных космических исследований РФ. В связи с тем, что условия разработки архитектуры и реализации БПО для новых ядерно-физических приборов космического применения выдвигают к ним принципиально новые функциональные требования, данная работа является актуальной.

Предмет исследования

В настоящее время в мировой космической науке сформировалась вполне самостоятельная область экспериментальных ядерно-физических исследований небесных тел, в которой были получены значительные научные результаты. В ведущих научных центрах России, США и других стран работают научные коллективы исследователей, усилиями которых эта область активно развивается. С 1966 г. до настоящего времени были проведены десятки ядерно-физических исследований Луны, Марса и Венеры с бортов советских и американских космических аппаратов. В настоящее время подготавливаются и проводятся более 10 космических экспериментов на борту российских, американских и европейских космических аппаратов, которые позволят продолжить подобные исследования на основе объединения современных достижений космической техники и экспериментальной ядерной физики. Пять из этого числа создавались при непосредственном участии автора данной диссертационной работы.

Данная диссертационная работа подготовлена в лаборатории космической гамма-спектроскопии Института космических исследований РАН, которая в настоящее время является одним из

центров ядерно-физических исследований небесных тел. Исследования в этом направлении проводятся по теме РАН «Ядерная планетология» (регистрационный № 01.20.03 03438). Сотрудники лаборатории в настоящее время проводят три космических эксперимента — ХЕНД на борту межпланетного аппарата НАСА «Марс Одиссей», БТН-Нейтрон на Российском сегменте МКС и ЛЕНД на борту аппарата НАСА «Лунный разведывательный орбитер». В лаборатории успешно проводится разработка четырех новых космических приборов — активного нейтронного прибора ДАН для марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория», нейтронного и гамма-спектрометра ХЕНД-НС для российской марсианской автоматической станции «Фобос-Грунт», нейтронного и гамма-спектрометра МГНС для европейского автоматического аппарата по исследованию Меркурия «БеппиКоломбо» и детектора нейтронов и гамма-лучей БТН-М2 для исследований космического фонового излучения внутри отсеков МКС. Автор данной диссертационной работы является сотрудником лаборатории и принимает самое активное участие в разработке указанных космических приборов. Областью его профессиональной ответственности является разработка архитектуры и БПО ядерно-физических приборов, и поэтому представленная работа представляет собой обобщающее изложение новых научных результатов по специальности «Приборы и методы экспериментальной физики», которые были получены автором в 2003–2009 гг. в ходе разработки архитектуры и БПО для этих приборов.

Современный научный космический прибор на исследовательском космическом аппарате представляет собой сложное устройство, которое обеспечивает параллельное выполнение четырех основных требований (Т-1)–(Т-4) к процессу научных измерений:

- (Т-1) проведение измерений в соответствии с поставленными исследовательскими задачами;
- (Т-2) обеспечение оптимальных условий для измерений на борту и мониторинг этих условий;
- (Т-3) производство массивов данных измерений и сопутствующих инженерных данных, характеризующих условия работы аппаратуры;
- (Т-4) взаимодействие с бортовыми служебными системами космического аппарата для обеспечения функциониро-

вания научной аппаратуры на борту и передачи данных измерений на Землю.

Специфический характер ядерно-физических измерений или активных исследований небесных тел в значительной степени определяет способы обеспечения этих четырех основных функциональных требований (Т-1)–(Т-4) проектируемыми научными приборами, и во многих случаях именно условия физических исследований определяют конкретные способы реализации этих требований применительно к устройству и к конструкции научных приборов. Как известно, современный научный прибор для космических исследований представляет собой синтез измерительной и служебной аппаратуры (ниже «аппаратура», в англоязычной литературе используется термин *hardware*) и логически-цифрового бортового программного обеспечения ее функционирования (ниже БПО, в англоязычной аппаратуре используется термин *software*). Очевидно, что одно не существует без другого, и условием оптимальной конструкции прибора является их полное взаимное соответствие. Поэтому все специфические особенности ядерно-физических измерений или исследований в равной степени определяют как конструкцию его аппаратуры, так и его архитектуру с БПО.

Предметом представленного диссертационного исследования является архитектура и программные средства реализации аппаратуры для научных космических экспериментов по ядерной планетологии.

На этапе разработки нового прибора два ведущих разработчика должны работать в непосредственном контакте друг с другом — инженер-разработчик ядерно-физической аппаратуры для космических экспериментов и инженер-разработчик БПО для ядерно-физических приборов. Именно вокруг двух таких профессионалов обычно формируются команды разработчиков, которые работают над созданием новых космических приборов. Очевидно, что узкая профессиональная специализация присуща всем основным направлениям современных экспериментальных космических исследований — ядерно-физические исследования здесь не являются исключением. Так же, как узкая специализация в экспериментальной физике, оказалась необходимым условием ее успешного развития в конце начале 20-го столетия, аналогичный процесс

начал развиваться в космических исследованиях практически сразу же после начала космической эры.

Цели и задачи исследования

Таким образом, целью данной диссертационной работы является *разработка архитектуры логически-цифрового обеспечения для проведения космических ядерно-физических экспериментов по исследованиям небесных тел и создание на этой основе БПО для трех новых научных приборов ХЕНД НС, МГНС и ДАН, которые будут установлены на борту разрабатываемых в настоящее время космических аппаратов.*

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи (3-1)–(3-3):

- (3-1) разработка новых принципов построения БПО для логически-цифровых узлов перспективных научных приборов на основе ядерно-физических методов, включая метод нейтрон-активационного анализа;
- (3-2) разработка архитектуры и создание БПО для обеспечения функциональных требований к приборам для измерений дистанционными методами естественных потоков нейтронного и гамма-излучения с поверхности планет или малых тел Солнечной системы;
- (3-3) разработка архитектуры и создание БПО для обеспечения функциональных требований к приборам для нейтрон-активационного анализа состава вещества непосредственно на поверхности небесных тел на основе измерений вторичных потоков нейтронов и гамма-лучей под воздействием импульсов нейтронов от нейтронного генератора.

В настоящее время приборы ДАН и ХЕНД-НС уже полностью разработаны, изготовлены, испытаны и установлены на борту космических аппаратов «Марсианская научная лаборатория» (НАСА) и «Фобос-грунт» (Федеральное космическое агентство), а прибор МГНС для межпланетного аппарата «БепиКоломбо» (Европейское космическое агентство) находится на заключительном этапе разработки. Поэтому можно утверждать, что результаты диссертации

прошли практическую апробацию в ИКИ РАН, НПО им. С. А. Лавочкина, Лаборатории реактивного движения НАСА и в Европейском центре космической науки и технологий, и таким образом — они внедрены в практику.

Научная новизна

Создание новых космических приборов для приоритетных научных исследований с использованием самых современных компонентов и детекторов требует разработки принципиально новых программных продуктов для реализации их БПО. Поэтому вывод о *новизне представленного в диссертации исследования* непосредственно следует из новизны решенных в нем задач. При этом следует отметить, что понятие «новизны» в данном случае означает не приспособление ранее известных разработок для использования в новых условиях космического эксперимента, а создание принципиально новых программных продуктов и процедур, которые не имеют аналогов в научном космическом приборостроении.

Конкретные элементы новизны представленного исследования состоят в следующем:

1. Исследованы и реализованы на практике новые архитектуры логически-цифровых узлов ядерно-физических космических приборов с использованием ПЛИС с высокой логической емкостью и с встроенными модулями блочной памяти, разработаны критерии выбора конкретных микросхем в соответствии с набором функциональных требований к прибору.
2. Разработаны новые логически-цифровые узлы для перспективных космических приборов НС ХЕНД, МГНС и ДАН с целью установки на бортах российского, европейского и американского космических аппаратов.

Практическая значимость

Во-первых, аппаратура ХЕНД-НС и ДАН прошла полный цикл наземных отработок, как в автономном варианте, так и на борту космических аппаратов. По результатам этих отработок

можно утверждать, что созданные автором диссертационной работы логически-цифровые узлы указанных приборов полностью удовлетворяют требованиям к научной космической аппаратуре для ядерно-физических исследований. Таким образом, полученные в диссертационной работе результаты успешно внедрены в практику.

Во-вторых, на основе выполненных разработок планируется создание следующего поколения космических приборов для дальнейших исследований Луны и планет Солнечной системы. Так, в настоящее время на исходном этапе находится разработка прибора для нейтрон-активационного исследования состава поверхности Венеры с борта спускаемого аппарата. Этот прибор по существу основан на объединении концепции пассивного гамма-спектрометров ХЕНД-НС и МГНС (глава 4) и концепции активного нейтронного прибора ДАН с импульсным нейтронным генератором (глава 5). Полученные в диссертационной работе результаты будут положены в основу разработки этого перспективного прибора.

Апробация

Следует отметить, что *научная достоверность полученных в диссертации новых результатов* проверена достигнутым положительным эффектом их реализации на практике при создании конкретных приборов. Современные требования разработки космических аппаратов предусматривают обширную программу их наземной экспериментальной отработки, и поэтому все возможные ошибки и неточности, допущенные в ходе выполнения представленного исследования, были обнаружены и устранены на этапе испытаний и отработок новой аппаратуры.

Представленные в диссертации результаты прошли многочисленные обсуждения и анализ с привлечением независимых экспертов на этапах предварительной и заключительной защиты эскизных проектов. Они докладывались автором на восьми научных и научно-технических конференциях и семинарах по проектам НАСА «Марсианская научная лаборатория» и ЕКА «БепиКолombo», на конференциях по научной программе исследований на МКС (2007), на международных рабочих совещаниях по проекту «Марс Одиссей» в 2004–2009 гг., на конференциях молодых специалистов ИКИ РАН в 2005–2007 гг. Они были опубликованы в 5

статьях в реферируемых научных журналах. Автор также принимал участие в проекте РФФИ по поддержке молодых ученых по теме «Создание Российского планетного информационно-телекоммуникационного центра (РПИТ-Центра) для обеспечения текущих и перспективных российских космических исследований Луны и планет Солнечной системы».

Автор представленной диссертационной работы является соавтором следующих статей:

- *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.

Автор диссертационной работы представлял доклады и являлся соавтором на следующих научных конференциях:

- *Вострухин А. А., Митрофанов И. Г., Малахов А. В., Козырев А. С., Литвак М. Л., Мокроусов М. И., Санин А. Б., Третьяков В. И.* Создание и использование информационно-телекоммуникационного центра и базы данных коллективного пользования по результатам космических экспериментов в области ядерной планетологии для подготовки пилотируемых межпланетных полетов // 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-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 // 7th 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 // 38th 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 // 38th Lunar and Planetary Science Conf. (Lunar and Planetary Science XXXVI-II). March, 12–16, 2007, League City, Texas. LPI Contribution No. 1338. P. 1648.

Структура и объём работы

Диссертационная работа содержит 6 глав, 162 страниц текста, 29 рисунков и 7 таблиц. Список цитируемой литературы включает 72 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В *главе 1* сформулированы цели диссертационного исследования, обсуждается его новизна и практическая ценность.

В *главе 2* представлено краткое описание научных космических экспериментов по ядерной планетологии, проводимых по настоящее время, а также намеченных к реализации в ближайшем будущем, в которых автор представленной диссертационной работы принимал непосредственное участие. В этой главе описаны также общие физические принципы, используемые при измерениях приборами, предназначенных для решения задач ядерной планетологии, а так же приводятся краткие описания рассматриваемых в диссертационной работе приборов: прибор ДАН для марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория» (МНЛ), прибор ХЕНД-НС для межпланетного аппарата Роскосмоса «Фобос-Грунт», прибор МГНС для европейского межпланетного аппарата «БегиКоломбо», а также других приборов, созданных в лаборатории космической

гамма-спектроскопии Института космических исследований РАН: прибор БТН-М1 для Международной космической станции и прибор ЛЕНД для лунного спутника НАСА.

В *главе 3* рассматриваются общие требования к архитектуре БПО и критерии отбора вариантов реализации БПО аппаратуры для ядерно-физических исследований с борта космических аппаратов. В разделе 3.1 излагаются основные требования и задачи БПО для ядерно-физических приборов. В разделе 3.2 описаны общие концепции двух вариантов реализации логически-цифрового узла космического научного прибора на основе микропроцессора и программируемой логической интегральной схемы. Представлены различные варианты архитектуры построения логически-цифрового узла прибора, применительно к ядерно-физическим приборам, а также произведено их сравнение на основе требований космического научного прибора. Рассмотрен вопрос возможности обновления бортового программного обеспечения после запуска космического аппарата в ходе космического полета. В заключении главы подробно описаны основные семейства радиационно-стойких ПЛИС ведущих фирм-производителей Actel, Aeroflex и Xilinx, которые применяются для космического приборостроения. Произведено их сравнение по таким основным характеристикам, как логическая емкость объема встроенной памяти, радиационная стойкость, стоимости, варианты отработки прототипов и пр.

В *главе 4* представлены основные результаты разработки архитектуры и бортового программного обеспечения для создания логически-цифрового узла на основе технологии ПЛИС для гамма- и нейтронного спектрометра ХЕНД-НС российского проекта «Фобос-Грунт» (рис. 1) и также гамма- и нейтронного спектрометра МГНС для европейского проекта «БепиКоломбо» (рис. 2). В разделе 4.1 описан прибор ХЕНД-НС, который предназначен для изучения состава вещества поверхности Марса и Фобоса, представлено обоснование выбора набора счетчиков и детекторов для регистрации нейтронов и гамма-излучения. Аналогичное описание проводится в разделе 4.2 для прибора МГНС, предназначенного для исследования состава вещества поверхности Меркурия. Описывается аппаратная часть приборов МГНС и ХЕНД-НС, после чего приводится сопоставление вариантов реализации архитектуры этих приборов как на основе ПЛИС, так и микропроцессора. В разделе 4.4 дается обоснование выбора варианта реализации логически-

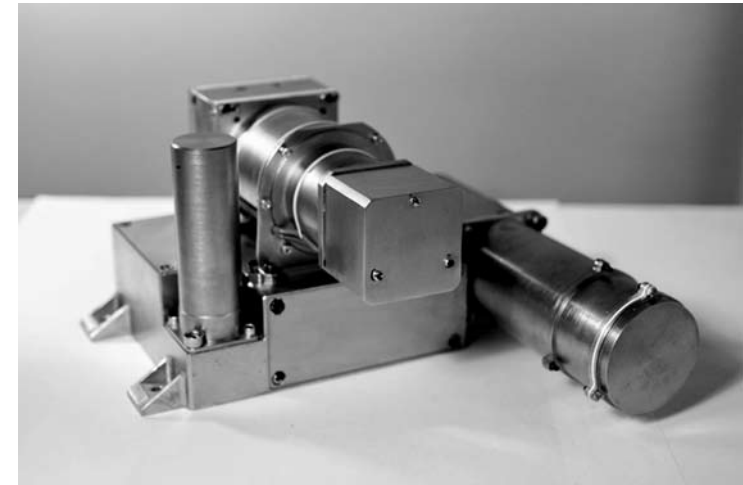


Рис. 1. Общий вид нейтронного и гамма-спектрометра ХЕНД-НС для российского космического аппарата «Фобос-Грунт»

цифрового узла приборов НС ХЕНД и МГНС на основе ПЛИС, а в разделе 4.5 приводится детальное описание логически-цифровых узлов этих приборов на основе ПЛИС. На основе выполненных исследований логически-цифровые узлы приборов НС ХЕНД и МГНС было созданы на основе ПЛИС Actel семейства RTAX, которые обладают необходимыми характеристиками для обеспечения исследовательских задач, поставленных перед этими приборами (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики реализации логически-цифрового узла приборов ХЕНД-НС и МГНС

Тип и параметры ПЛИС	Прибор НС ХЕНД	Прибор МГНС
Марка производителя	Actel RTAX-250s	Actel RTAX-1000s
Потребляемая мощность	0,5 Вт	0,75 Вт
Тактовая частота	16 МГц	16 МГц, 100 МГц
Используемая память	Встроенная 3Кб, Внешняя 1DT 7164L 8Кб	Встроенная 6Кб, Внешняя 1645PY2T 8Кб АЕЯР.431220.576ТУ
Заполнение кристалла	91 %	74 %

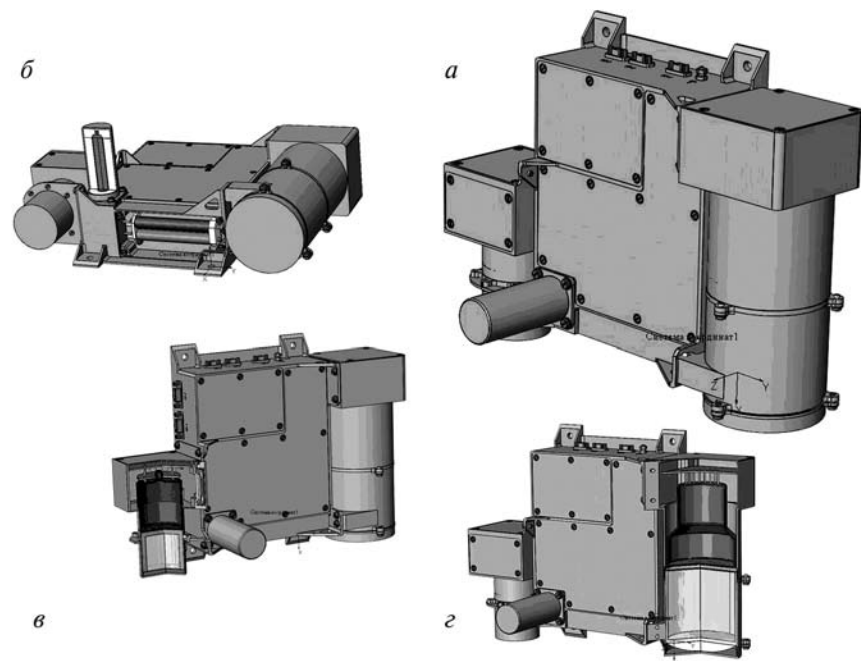


Рис. 2. Общий вид нейтронного и гамма-спектрометра МГНС для европейского космического аппарата «БепиКоломбо»: *a* — общий вид прибора; *b* — разрезами показаны детекторы эпитепловых нейтронов; *c* — детектор нейтронов высоких энергий; *d* — детектор гамма-лучей

В *главе 5* диссертации представлены основные результаты разработки архитектуры и бортового программного обеспечения для создания логически-цифрового узла на основе технологии ПЛИС для космического прибора ДАН нейтрон-активационного зондирования грунта Марса на борту марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория» (рис. 3). В разделе 5.1 изложены задачи исследований прибором ДАН, описаны блоки, из которых он состоит: ДАН ДЕ (блок детекторов и электроники) и ДАН ИНГ (блок импульсного нейтронного генератора). В этом разделе описан принцип нейтрон-активационного зондирования грунта, представлены результаты теоретических расчетов, а также экспериментальные данные, полученные в полевых натурных испытаниях при-

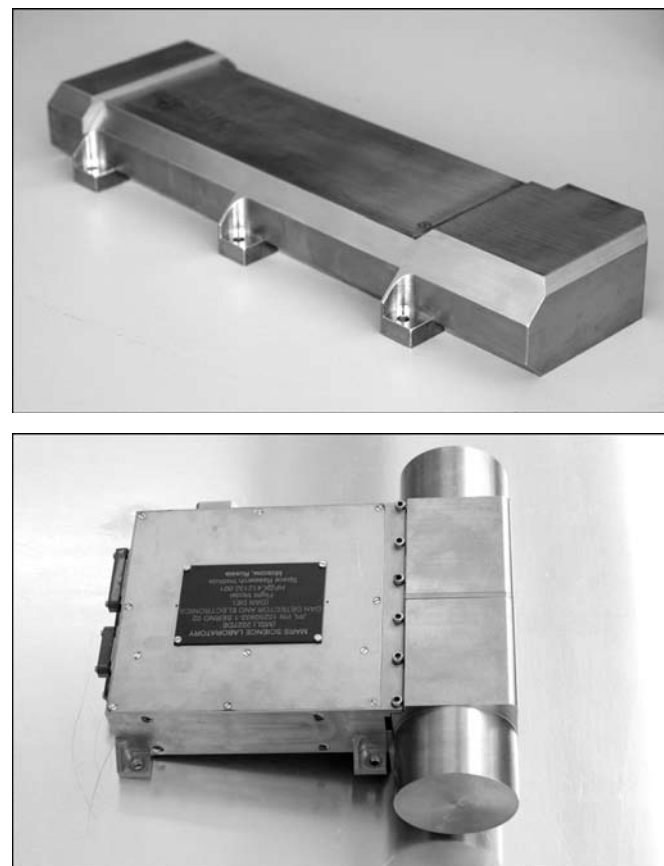


Рис. 3. Блок импульсного нейтронного генератора ИНГ (вверху) и детекторов и электроники (внизу) аппаратуры ДАН для нейтрон-активационного зондирования грунта Марса с борта марсохода НАСА «Марсианская научная лаборатория»

бора ДАН. Сформулированы исходные требования к реализации прибора ДАН. В следующем разделе 5.2 производится подробный функциональный анализ прибора ДАН, на основе которого делается сравнение вариантов архитектур логически-цифрового узла на основе ПЛИС и микропроцессора по различным эксплуатационным характеристикам. В этом разделе обоснован выбор варианта

с ПЛИС для применения в приборе ДАН и производится подробное описание логически-цифрового узла прибора (табл. 2). Показано, что функциональным требованиям к прибору ДАН с наибольшей степени удовлетворяет ПЛИС типа RTAX250-S фирмы Actel.

Таблица 2. Характеристики реализации логически-цифрового узла прибора ДАН

Тип и параметры ПЛИС	Значение
Марка производителя	Actel RTAX-250S
Потребляемая мощность	0,5 Вт
Тактовая частота	16 МГц
Используемая память	Встроенная 5Кб
Заполнение кристалла	83 %

В заключении (*глава 6*) диссертационной работы представлены выводы выполненного исследования и основные результаты, выносимые на защиту.