

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт космических исследований Российской академии наук  
(ИКИ РАН)

# **НАУЧНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ**

---

**АППАРАТУРА,  
СБОР ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЕ,  
ЭЛЕКТРОННАЯ  
КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА**

---

**ТРУДЫ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО  
СЕМИНАРА**

**РОССИЯ  
ТАРУСА  
23–25 мая 2012 г.**

Под редакцией  
*Р. Р. Назирова,  
И. В. Чулкова,  
В. Н. Юрова*

**МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА**

**Москва — 2013**

В данные труды включены тексты докладов, представленных на семинаре «Научные эксперименты на малых космических аппаратах: аппаратура, сбор данных и управление, электронная компонентная база». Семинар проводился Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Министерства образования и науки (НИЯУ МИФИ) в г. Таруса, Калужской обл., 23–25 мая 2012 г.

Приводятся описания научных экспериментов, систем сбора информации, методик исследования стойкости электронных изделий к радиационным воздействиям.

Материалы представляют интерес для научных сотрудников и инженеров, занимающихся разработкой аппаратуры для космических экспериментов, студентов и аспирантов.

The reports have been presented on the “Scientific experiments on small satellites: apparatus, data collection and control, electronic components” seminar are included in the Proceedings. The seminar was conducted by Space research institute Russian Academy of Science and National research nuclear university “MEPhI” in Tarusa, Kaluga region, 23-25.05.2012.

The scientific experiments, data collection and control systems, methods for investigation radiation stability electronic components descriptions are given in reports.

This information is interesting for scientists and engineers have been occupied with cosmic research equipment working out, and for post-graduate students.

Редакционная коллегия: В. Н. Юров  
И. В. Чулков  
Е. А. Антоненко

Редактор: В. С. Корниленко

Компьютерная верстка: Е. О. Кораблева

Дизайн: А. Н. Захаров  
В. М. Давыдов

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2013

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы ряд организаций – разработчиков космических аппаратов (КА) занимается созданием унифицированных спутниковых платформ для проведения экспериментов различного назначения. Разрабатываемые платформы, в том числе, относятся и к классу малых аппаратов (МКА), обеспечивающих эксплуатацию на орбите целевой аппаратуры массой 100...120 кг и потребляемой мощностью 100...120 Вт. Конечно, эксперименты на МКА не могут полностью заменить большие специализированные научные лаборатории, но занимают и будут занимать своё определенное место в общем объёме космических исследований по следующим причинам:

- унифицированные платформы достаточно быстро и с небольшими затратами адаптируются к требованиям конкретного эксперимента;
- вывод на орбиту может осуществляться групповым пуском нескольких МКА или попутным грузом с большим КА специального назначения, что значительно расширяет возможности и уменьшает стоимость пуска;
- малые КА лучше адаптируются к требованиям эксперимента в части условий наблюдения.

В результате у исследователей появляется возможность проведения научных исследований со значительно меньшими (до 10 раз), чем на больших КА, финансовыми затратами и сокращением сроков (до 3...5 лет) на создание и запуск аппаратуры.

Результат космического эксперимента (КЭ) в значительной степени зависит от реализованной схемы взаимодействия научной аппаратуры (НА) со служебными системами КА. Связи НА с КА осуществляются через системы питания, управления, телеметрии, сбора и передачи данных. Максимальное использование возможностей служебных систем для обеспечения функционирования НА повышает её надёжность и расширяет технические возможности КЭ. К сожалению, разработчики КА весьма неохотно делятся своими ресурсами с создателями научных приборов, так как это требует более сложной наземной отработки взаимодействия аппаратуры. Все интерфейсы обмена реализуются в одном или двух блоках научной аппаратуры, в которых размещаются узлы управления и подачи питания и система сбора, накопления и передачи научной информации. В интерфейсах бортовой аппаратуры применяются, как правило, хорошо ранее отработанные в космических экспериментах системы. Поэтому при выборе схмотехнических решений в научных приборах полезен и очень важен обмен информацией и сравнение различных технических реализаций построения аналогичных устройств.

Надёжность работы аппаратуры при проведении КЭ в значительной степени определяется правильным выбором комплектующей элементной базы. Сложные условия эксплуатации: воздействие солнечных и галактических космических лучей, частиц солнечного ветра и радиационных поясов Земли, широкий температурный диапазон, космический вакуум, длительный (более 5 лет) период функционирования – существенно ограничивают рынок применяемых электрорадиоизделий (ЭРИ). В последние годы произошло несколько инцидентов с российскими космическими аппаратами (КА ГЛОНАСС, КА «Фобос-Грунт»), официальной причиной которых названо применение некачественных ЭРИ. В связи с этим вводятся более жесткие требования к сертификации используемых в бортовой аппаратуре комплектующих изделий отечественного и иностранного производства. Откорректированы и выпущены Перечни ЭРИ, рекомендованных к применению, и в контрактах на разработку приборов планируется выделение этапа работ по обоснованию и защите применяемой комплектации. Ситуация усложняется из-за того, что ЭРИ, сертифицированные для работы в условиях высоких радиационных нагрузок, изготавливаются по специальным технологиям ограниченными партиями и их стоимость в 500...1000 раз превышает цену аналогичных коммерческих изделий. Например, цена программируемой логической интегральной схемы Virtex-4 с квалификацией Space составляет примерно 150 тысяч долларов США. Основными производителями радиационно стойких ЭРИ за рубежом являются компании США и их приобретение — длительная (до одного года) и сложная процедура, требующая разрешения государственных структур. По этим причинам следует в максимальной степени использовать при разработке отечественной научной аппаратуры ЭРИ российского производства и очень большое значение имеет информация о рынке и возможностях разработчиков комплектующих изделий. Для производителей продукции не менее важно знание интересов потенциальных потребителей.

Все вышеизложенные обстоятельства и определили тематику проведенного семинара.

***Юров В. Н.***

# ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ И НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «АРКА» ДЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА МКА-ФКИ № 5

**С. А. Богачев, С. В. Кузин, А. А. Перцов, С. В. Шестов,  
Ю. С. Иванов, А. С. Ульянов, А. С. Кириченко, А. А. Рева**  
**Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Физический институт им. П. Н. Лебедева  
Российской академии наук (ФИАН), Москва**

Физический институт Российской академии наук (ФИАН) ведет работы по созданию комплекса научной аппаратуры «Арка» (КНА «Арка») для малого космического аппарата (МКА) № 5, создаваемого в рамках программы фундаментальных космических исследований (МКА-ФКИ). Аппарат предназначен для построения высокоточных изображений Солнца с пространственным разрешением 0,1 угл. с/пиксел, что соответствует линейному размеру ~70 км на поверхности Солнца. Соответствующее разрешение в 17 раз выше, чем разрешение телескопов ТЕСИС на спутнике «КОРОНАС-Фотон» (Россия) и в 6 раз превышает разрешение действующих солнечных телескопов AIA на спутнике SDO (США). Концепция КНА «Арка» близка к концепции обсерватории TRACE (США), выведенной на орбиту в 1998 году в рамках программы малых космических аппаратов НАСА SMEX (SMall EXplorer missions): наблюдения Солнца производятся в ограниченном поле зрения, но имеют очень высокое угловое разрешение. В состав КНА «Арка» входят три инструмента: два больших телескопа для наблюдения солнечной короны и переходного слоя Солнца в линиях Fe IX 171 Å (телескоп Т1) и He II 304 Å (телескоп Т2), а также относительно компактный телескоп ТХ, строящий изображения полного солнечного диска. Для спутника выбрана геосинхронная орбита с наклоном 63,4°, которая обеспечивает непрерывную видимость Солнца за исключением краткосрочных периодов

---

**Богачев Сергей Александрович** – ведущий научный сотрудник,

доктор физико-математических наук, bogachev@sci.lebedev.ru

**Кузин Сергей Вадимович** – заведующий лабораторией рентгеновской астрономии Солнца, доктор физико-математических наук, kuzin@sci.lebedev.ru

**Перцов Андрей Александрович** – старший научный сотрудник, канд. физико-математических наук, perzov@sci.lebedev.ru

**Шестов Сергей Викторович** – старший научный сотрудник, канд. физико-математических наук, sshestov@gmail.com

**Иванов Юрий Сергеевич** – ведущий инженер-конструктор, yivanov@lebedev.ru

**Ульянов Артем Сергеевич** – аспирант, ikiru@inbox.ru

**Кириченко Алексей Сергеевич** – инженер 1-й категории, kirichenko@lebedev.ru

**Рева Антон Александрович** – аспирант, reva.antoine@gmail.com

затмений, а также позволяет передать на Землю значительные объемы целевой информации. Предполагается, что телескопы будут получать от 100 до 1000 высокоточных изображений Солнца в сутки с размером кадра  $6144 \times 6144$  пиксела. В настоящее время ведутся работы по созданию сайта проекта, который будет открыт по адресу <http://arka.lebedev.ru>.

**Ключевые слова:** малые космические аппараты; Солнце; ВУФ-телескоп.

## **Введение**

Несмотря на значительный прогресс последних десятилетий, в физике Солнца остаётся нерешенным ряд фундаментальных проблем. Это, в частности, нагрев короны и хромосферы Солнца, триггеры солнечных вспышек и формирование и ускорение солнечного ветра [Aschwanden, 2005; Golub, Pasachoff, 2009]. Тот факт, что огромное количество экспериментальных данных, поступающих с космических и наземных обсерваторий, не позволяет решить указанные проблемы физики Солнца, вероятно, свидетельствует о недостаточной точности современных наблюдений. Речь идет как о недостаточно высоком временном разрешении наблюдений, так и о нехватке пространственного разрешения.

Если говорить о космических телескопах, т.е. инструментах, получающих двумерное изображение Солнца, то их временное разрешение складывается из времени экспозиции изображения, времени считывания данных с детектора (обычно ПЗС-матрицы), а также времени на подготовку ПЗС-матрицы к следующему наблюдению. Для космических солнечных телескопов середины 1990–2000 гг. (телескоп EIT на спутнике SOHO [Delaboudinière et al., 1995]; телескоп TRACE [Handy et al., 1998]; телескоп XRT на спутнике Hinode [Golub et al., 2007]) лучшее временное разрешение составляло от 30 до 60 с. В настоящее время (первая половина 2010-х) ситуация несколько изменилась благодаря повышению чувствительности рентгеновской оптики, а также улучшению характеристик ПЗС-матриц, позволяющих заметно сократить время считывания данных и время подготовки матрицы к следующему сеансу наблюдений. Так, телескопы в составе комплекса аппаратуры ТЕСИС на спутнике «КОРОНАС-Фотон» [Kuzin et al., 2009] позволяют получать серии наблюдений со скважностью (интервал времени между двумя последовательными кадрами) около 10 с, а при наблюдениях фрагмента Солнца – до  $4 \dots 5$  с [Ulyanov et al., 2010]. Телескопы AIA на борту спутника SDO (запущен в 2010 г.) имеют сейчас скважность около  $10 \dots 12$  с [Lemen et al., 2012]. Таким образом, в наши дни временное разрешение в 10 с можно считать стандартным, разрешение в 5 с является рекордным, а разрешение в 1 с и лучше все еще недоступно.

Угловое (пространственное) разрешение телескопов зависит от качества оптической системы, но не может быть меньше

предела, устанавливаемого дифракцией или ПЗС-матрицей. При наблюдениях Солнца в коротких длинах волн (порядка и менее  $100 \text{ \AA}$ ) дифракционный предел обычно так мал, что главным является угловой размер пиксела детектора. В частности, при фотографировании Солнца, угловой диаметр которого составляет около 2000 угл. с, с помощью ПЗС-матрицы размером  $1024 \times 1024$  пиксела (матрицами такого размера были оснащены телескопы EIT на спутнике SOHO и телескоп TRACE) нельзя получить угловое разрешение лучше 2 угл. с. В случае ПЗС-матриц размером  $2048 \times 2048$  пикселов (телескопы ТЕСИС на спутнике «КОРОНАС-Фотон» и телескопы EUVI на спутниках STEREO-A и STEREO-B) максимальное угловое разрешение при наблюдении полного диска Солнца составляет одну угловую секунду, а для матриц размером  $4096 \times 4096$  пикселов (телескопы AIA на спутнике SDO) максимальное разрешение равно 0,5 угл. с.

Увеличение размера ПЗС-матрицы не может продолжаться неограниченно, так как при этом растет объем получаемого изображения в байтах. В частности, размер одного изображения телескопа AIA составляет 32 МБ (каждый пиксел содержит 2 байта информации). Для сравнения, суточный объем целевой информации, поступавший в 2009 г. с российского спутника «КОРОНАС-Фотон», составлял около 1...2 Гб. В пересчете на изображения AIA этого хватило бы на 32...64 кадра в сутки. При попытке улучшить угловое разрешение в 2 раза, т. е. при переходе к матрицам  $8192 \times 8192$  пиксела, объем изображения увеличился бы до 128 МБ, а суточное количество кадров на 1 Гб целевой информации сократилось бы до 8. Очевидно, что этого недостаточно для получения сколь-либо значимой информации о динамике Солнца и событиях солнечной активности.

Выход состоит в переходе от наблюдений полного диска Солнца к исследованиям отдельных фрагментов солнечной поверхности. Примером таких наблюдений является обсерватория TRACE (США), запущенная в рамках программы малых космических аппаратов NASA SMEX в 1998 г. [Handy et al., 1999]. Телескопы обсерватории были оснащены ПЗС-матрицами размером  $1024 \times 1024$  пиксела, но наблюдали не полный диск Солнца, а фрагмент поверхности размером  $8,5 \times 8,5$  угл. мин. Если при наблюдении полного диска Солнца максимальное разрешение такой матрицы составляет 2 угловых секунды, то при наблюдениях в поле зрения  $8,5 \times 8,5$  угл. мин разрешение TRACE составило 0,5 угл. с, что в 4 раза лучше. Соответствующий режим наблюдения не свободен от недостатков, главным из которых является то, что значительная часть событий на Солнце, находящихся вне поля зрения инструмента, пропускается им. Этот недостаток компенсируется возможностью получения изображений, в 4-5 раз превышающих по точности кадры полного солнечного диска. Помимо TRACE подобный способ исследования Солнца в крайнем УФ-диапазоне после нигде не применялся.

Комплекс научной аппаратуры «Арка» будет первым после TRACE инструментом для сверхдетального исследования отдельных участков солнечной короны [Кузин и др., 2011]. КНА предназначена для установки на борту малого космического аппарата (платформа «Карат» разработки НПО им. С. А. Лавочкина) и включает три телескопа, два из которых должны осуществлять наблюдения Солнца со сверхвысоким угловым разрешением, а третий телескоп предназначен для координации работы двух основных инструментов. Поле зрения прибора больше, чем у телескопов TRACE (10,2 угл. мин против 8,5 угл. мин). При этом, однако, с использованием ПЗС-матрицы существенно большего размера (6144×6144 пиксела против 1024×1024 пиксела) в ходе эксперимента планируется достичь углового разрешения в 0,1 угл. с против 0,5 угл. с у телескопов TRACE. Таким образом, угловое разрешение КНА «Арка», по плану, должно быть в 5 раз лучше, чем у TRACE, и в 6 раз лучше, чем разрешение наиболее современной солнечной обсерватории NASA SDO (0,6 угл. с). При пересчете в километры, один пиксел матрицы КНА «Арка» соответствует размеру около 70 км. Обоснованы ожидания, что столь подробные наблюдения структур солнечной короны помогут продвинуться в ряде направлений солнечной физики, в особенности в вопросах исследования микроактивности Солнца, имеющей большое значение для решения ряда фундаментальных проблем.

В настоящей работе приводятся научные задачи КНА «Арка» в том объеме, в котором они видны на текущий момент, а также описываются основные технические характеристики научной аппаратуры.

## **1. Научные задачи КНА «Арка»**

Основной целью эксперимента, проводимого с помощью КНА «Арка», является получение изображений солнечной короны с рекордным пространственным разрешением, которое составляет около 70 км/пиксел. Временное разрешение (минимальный интервал времени между двумя кадрами), как ожидается, должно быть не хуже, чем 10 с. Исходя из этих характеристик научной аппаратуры, можно сформулировать круг научных задач, которые могут быть решены в ходе эксперимента.

Одной из наиболее значимых для современной физики Солнца является проблема поиска и исследования так называемых нановспышек, то есть событий, интегральное энерговыделение которых лежит в диапазоне от  $10^{24}$  до  $10^{27}$  эрг. Для сравнения, энерговыделение одной крупной солнечной вспышки может достигать  $10^{33}$  эрг [Aschwanden, 2005]. Исходя из наблюдений известно, что распределение солнечных вспышек по энергии хорошо описывается степенным законом, то есть формулой вида

$$dN = E^{-\varphi} dE, \quad (1)$$

где  $E$  – энергия вспышки, а  $dN$  – число вспышек в интервале энергий от  $E$  до  $E + dE$ . Величина  $\varphi$  называется показателем степен-



ного распределения (обычно полагают, что  $\varphi > 1$ ). Из формулы (1) следует, что при увеличении энергии вспышки их число уменьшается и, наоборот, при переходе от больших энергий к меньшим энергиям число вспышек растет. Поскольку в большинстве случаев интерес представляет не число вспышек, а связанная с ними энергия, то формула (1) может быть переписана в виде:

$$\Delta E = \int_{E_0}^{E_1} E^{-\varphi} E dE, \quad (2)$$

где  $\Delta E$  – полная энергия в диапазоне  $[E_0, E_1]$ , откуда

$$\Delta E = \frac{1}{2-\varphi} (E_1^{2-\varphi} - E_0^{2-\varphi}). \quad (3)$$

Нетрудно убедиться, что если наклон степенного распределения превышает 2, т.е.  $\varphi > 2$ , то интегральная энергия вспышек  $\Delta E$  стремится к бесконечности при  $E_0$ , стремящемся к нулю. Отсюда можно сделать два вывода. Первый состоит в том, что в зависимости от наклона распределения вспышек по энергиям возможны два сценария. Первый соответствует значению  $\varphi \leq 2$ . В этом случае энергия, высвобождающаяся в крупных вспышках, превосходит энергию, выделяющуюся в микро- и нановспышках. При таком сценарии роль микропроцессов в глобальной энергетике короны незначительна. Во втором случае, когда  $\varphi > 2$ , основная вспышечная энергия Солнца оказывается заключена в микро- и нанособытиях. Такой сценарий представляется чрезвычайно привлекательным, так как позволяет использовать микрособытия для объяснения целого ряда фундаментальных вопросов физики Солнца. В настоящее время, в частности, большой популярностью пользуются механизмы нагрева короны, основанные на нановспышках. Следует подчеркнуть, что при  $\varphi > 2$  полная энергия вспышек, просуммированная в диапазоне от  $E = 0$  до  $E \rightarrow \infty$ , неограниченно растет. Это означает, что солнечные вспышки не могут быть сколь угодно малыми и существует так называемая энергия отсекаания:  $E > E_{\text{мин}}$ , которая, помимо прочего, определяет полную вспышечную энергию Солнца:

$$\Delta E_{\text{полн}} = \frac{1}{2-\varphi} \frac{1}{E_{\text{мин}}^{\varphi-2}}. \quad (3)$$

Вопрос о наклоне распределения вспышек в области малых энергий, таким образом, является весьма существенным, причем ответ на него может быть получен только экспериментальным путем. Также, лишь в ходе эксперимента, может быть обнаружена и измерена минимально возможная энергия вспышек и, как следствие, определена суммарная вспышечная энергия всего Солнца.

Вторым, весьма значимым выводом является вопрос о собственных колебаниях мелкомасштабных магнитных структур в нижней короне Солнца. Хорошо известно, что крупные магнитные

петли (с размерами порядка 10...100 тыс. км) при их наблюдении с высоким временным разрешением часто показывают наличие колебаний (осцилляций) [Aschwanden, Schrijver, 2011]. Как правило, такие осцилляции являются реакцией петли на ударное воздействие от солнечной вспышки. Начало осцилляций соответствует моменту прихода к петле вспышечного возмущения, а амплитуда колебаний, их период и время затухания существенно зависят от свойств петли и окружающей короны. Последнее позволяет использовать соответствующие наблюдения для диагностики физических свойств короны Солнца.

Поскольку помимо больших корональных петель на Солнце существует огромное число магнитных структур малого масштаба, представляет интерес вопрос о регистрации в них таких же колебаний. При этом помимо использования этих данных для диагностики нижней короны важной является оценка полной энергии, заключенной в мелкомасштабных осцилляциях. Речь идет о том, что если мы наблюдаем осциллирующую магнитную петлю, колебания которой через какое-то время затухают, то естественным кажется вывод, что энергия колебания этой петли перешла в тепловую или кинетическую энергию окружающей плазмы. Таким образом, множественные осцилляции мелкомасштабных структур могут быть источником дополнительного энерговыделения в короне Солнца, который пока не учитывается в моделях нагрева короны и ускорения солнечного ветра.

Еще одной задачей для КНА «Арка» является исследование солнечных спикул, поставляющих вещество из нижних слоев атмосферы Солнца (хромосферы и переходного слоя) в солнечную корону. Исследование спикул имеет значение, как минимум, для двух фундаментальных проблем физики Солнца: для проблемы нагрева короны и восполнения потерь коронального вещества, уходящего вместе с солнечным ветром. Основным препятствием для такого исследования является малый размер спикул – несколько тысяч километров и короткое время жизни – несколько минут. КНА «Арка», очевидно, будет свободен от таких ограничений. Соответственно, есть основания надеяться на существенный прогресс в изучении физики солнечных спикул и их влияния на атмосферу Солнца в целом.

Из дополнительных задач можно отметить проблему поиска свидетельств магнитного пересоединения среди магнитных структур малого масштаба. Речь идет о том, можно ли считать, что физика микрособытий солнечной активности подобна физике крупных солнечных вспышек, либо механизм энерговыделения на этом уровне является иным, не основанным на магнитном пересоединении.

В целом, есть основания полагать, что экспериментальные данные, полученные благодаря рекордным характеристикам КНА «Арка», могут обеспечить прогресс по целому ряду направлений

физики Солнца, в число которых входят фундаментальные проблемы.

Краткий перечень научных задач КНА «Арка» в настоящее время выглядит следующим образом:

- определение механизма нагрева солнечной короны, получение аргументов в пользу окончательного выбора одного из механизмов;
- экспериментальное подтверждение пересоединения магнитных полей в нижних слоях солнечной атмосферы (“магнитном коврике”);
- определение механизмов переноса энергии и вещества из нижних слоев солнечной атмосферы в корону;
- исследование связей между микро- и макропроявлениями солнечной активности;
- определение механизмов и энергетики микровспышек и установление их роли в формировании горячей короны Солнца.

## 2. Основные технические характеристики КНА «Арка»

В настоящем разделе описываются облик КНА «Арка» и основные технические характеристики аппаратуры. Аппаратура состоит из трех двухзеркальных телескопов (телескопы Т1, Т2 и ТХ) и блока электроники (БЭ), включающего источник питания, модуль управления научной аппаратурой и модуль сбора и обработки

**Таблица 1.** Основные спектральные линии, попадающие в канал регистрации Т1 КНА «Арка»

Ион	Длина волны, Å	Переход	Температура, $\log_{10}(T)$ , К	Интенсивность, эрг·см <sup>-2</sup> ·ср <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>
Fe VIII	168,5450	$3p^6 3d^2 D_{5/2}^- - 3p^5 3d^2 ({}^3P)_{3/2}^2 P_{3/2}^-$	5,6	3,66e+03
Ca XVI	168,8539	$2s^2 2p^2 P_{1/2} - 2s 2p^2 2S_{1/2}$	6,7	4,92e+03
Fe VIII	168,9300	$3p^6 3d^2 D_{3/2}^- - 3p^5 3d^2 ({}^3P)_{1/2}^2 P_{1/2}^-$	5,6	1,92e+03
Fe XXII	169,1123	$2s 2p^2 2S_{1/2} - 2p^3 2P_{1/2}$	7,1	1,18e+03
Ti XIX	169,5800	$2s^2 1S_0 - 2s 2p 1P_1$	6,9	3,51e+03
<b>Fe IX</b>	<b>171,0730</b>	<b><math>3s^2 3p^6 1S_0 - 3s^2 3p^5 3d 1P_1</math></b>	<b>5,9</b>	<b>4,66e+04</b>
Fe XX	171,7248	$2s^2 2p^3 2P_{1/2} - 2s 2p^4 4P_{1/2}$	7,0	2,57e+03
O V	172,1690	$2s^2 1S_0 - 2s 3p 1P_1$	5,4	3,04e+03
O VI	172,9357	$1s^2 2p^2 P_{1/2} - 1s^2 3d^2 D_{3/2}$	5,5	1,95e+03
O VI	173,0798	$1s^2 2p^2 P_{3/2} - 1s^2 3d^2 D_{5/2}$	5,5	3,51e+03
Fe XXIII	173,3181	$2s 2p^3 P_1 - 2p^2 3P_0$	7,1	5,27e+03

информации. Телескопы Т1 и Т2 являются основными инструментами, осуществляющими наблюдение Солнца с угловым разрешением 0,1 угл. с. Телескопы имеют одинаковую оптическую схему и различаются только селективными характеристиками покрытия главного и вторичного зеркал. Первый телескоп Т1 имеет полосу чувствительности в области 168...173 Å с максимумом вблизи 171 Å, совпадающим с линией железа Fe IX (табл. 1). Вторым телескопом Т2 работает в области 296...310 Å с максимумом вблизи линии ионизованного гелия He II 304 Å (табл. 2). Третий телескоп Арка-ТХ является вспомогательным и предназначен для построения

**Таблица 2.** Основные спектральные линии, попадающие в канал регистрации Т2 КНА «Арка»

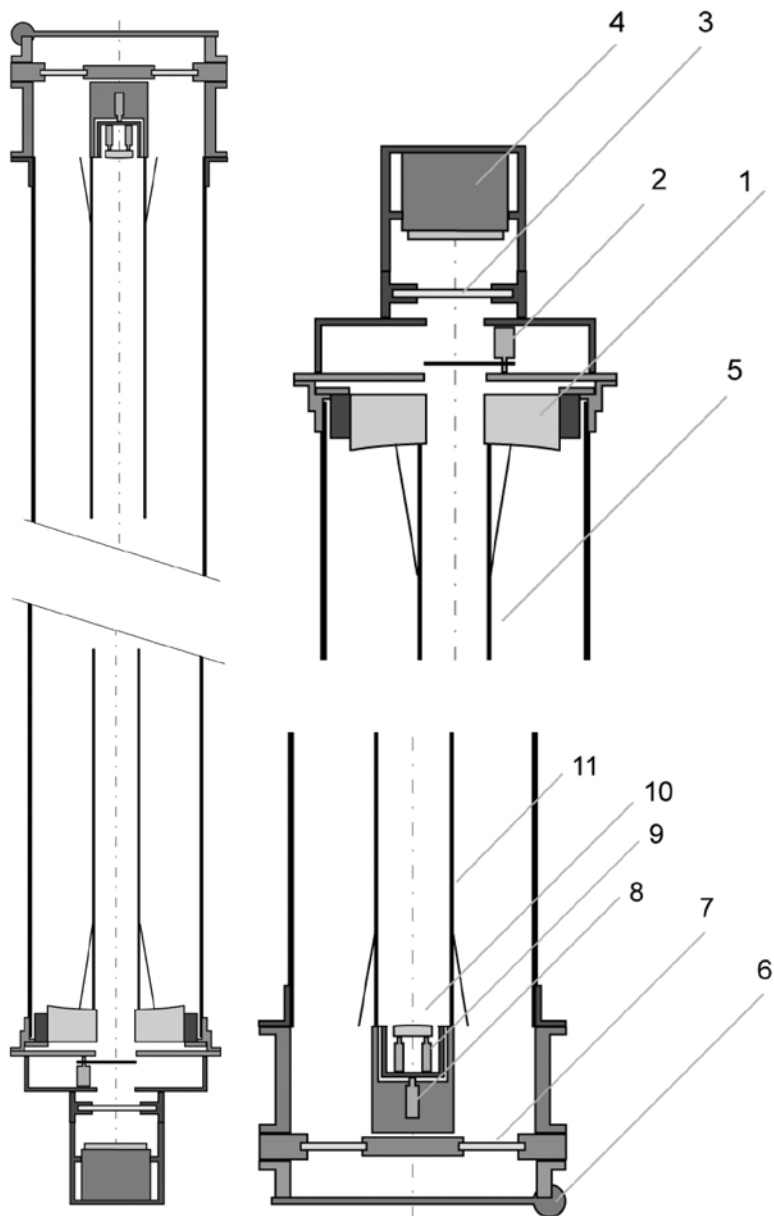
Ион	Длина волны, Å	Переход	Температура, $\log_{10}(T)$ , К	Интенсивность, эрг·см <sup>-2</sup> ·ср <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>
Si IX	296,1130	$2s^2 2p^2 \ ^3P_2 - 2s 2p^3 \ ^3P_2$	6,1	1,65e+03
S XII	299,5407	$2s^2 2p \ ^2P_{3/2} - 2s 2p^2 \ ^2D_{5/2}$	6,4	1,09e+03
Ca XVIII	302,1902	$1s^2 2s \ ^2S_{1/2} - 1s^2 2p \ ^2P_{3/2}$	7,0	7,01e+04
Si XI	303,3250	$2s^2 \ ^1S_0 - 2s 2p \ ^1P_1$	6,2	1,54e+04
O III	303,4610	$2s^2 2p^2 \ ^3P_1 - 2s^2 2p 3d \ ^3P_0$	5,1	1,09e+03
O III	303,6950	$2s^2 2p^2 \ ^3P_2 - 2s^2 2p 3d \ ^3P_1$	5,1	1,42e+03
He II	<b>303,7810</b>	<b><math>1s \ ^2S_{1/2} - 2p \ ^2P_{3/2}</math></b>	<b>4,9</b>	<b>6,01e+05</b>
He II	<b>303,7860</b>	<b><math>1s \ ^2S_{1/2} - 2p \ ^2P_{1/2}</math></b>	<b>4,9</b>	<b>3,00e+05</b>
O III	303,8000	$2s^2 2p^2 \ ^3P_2 - 2s^2 2p 3d \ ^3P_2$	5,1	4,64e+03
Fe XVII	304,8228	$2s^2 2p^5 3p \ ^3P_2 - 2s^2 2p^5 3d \ ^3P_2$	6,9	1,17e+03
Fe XV	304,8940	$3s 3p \ ^3P_2 - 3p^2 \ ^3P_2$	6,4	1,63e+03
O III	305,5960	$2s^2 2p^2 \ ^3P_0 - 2s^2 2p 3d \ ^3D_1$	5,1	2,82e+03
O III	305,6560	$2s^2 2p^2 \ ^3P_1 - 2s^2 2p 3d \ ^3D_2$	5,1	6,31e+03
O III	305,7020	$2s^2 2p^2 \ ^3P_1 - 2s^2 2p 3d \ ^3D_1$	5,1	1,87e+03
O III	305,7670	$2s^2 2p^2 \ ^3P_2 - 2s^2 2p 3d \ ^3D_3$	5,1	1,12e+04
O III	305,8360	$2s^2 2p^2 \ ^3P_2 - 2s^2 2p 3d \ ^3D_2$	5,1	1,62e+03
O IV	306,6210	$2s 2p^2 \ ^2D_{5/2} - 2s 2p \ (^3P) 3s \ ^2P_{3/2}$	5,3	5,99e+03
O IV	306,8840	$2s 2p^2 \ ^2D_{3/2} - 2s 2p \ (^3P) 3s \ ^2P_{1/2}$	5,3	3,27e+03
Ti XX	309,0728	$1s^2 2s \ ^2S_{1/2} - 1s^2 2p \ ^2P_{1/2}$	7,0	2,37e+03
Fe XX	309,2946	$2s^2 2p^3 \ ^4S_{3/2} - 2s^2 2p^3 \ ^2P_{3/2}$	7,0	1,06e+04

изображений полного диска Солнца с разрешением 1,76 угл. с. Телескоп предназначен для координации работы основных двух инструментов, в том числе для привязки наблюдаемых ими участков поверхности Солнца к изображениям полного диска. Полоса пропускания телескопа ТХ совпадает с полосой пропускания телескопа Т1 (см. табл. 1).

Все три инструмента построены по схеме Ричи-Кретьена, т.е. представляют собой двухзеркальные телескопы с гиперболическими зеркалами. Главное зеркало является вогнутым (собирающим); вторичное зеркало – выпуклое (рассеивающее). Схематическое изображение телескопа Т1 показано на рис. 1. Телескоп Т2 построен по такой же схеме.

На левой панели рис. 1 показан общий вид телескопа. Конструктивно инструмент состоит из трех основных элементов: трубы, верхней панели и нижней панели. Труба телескопа имеет длину 180 см и диаметр 25 см. Труба изготавливается из прецизионного сплава ниобия (36 %) и титана (64 %) со следующими характеристиками: плотность – 5,45 г/см<sup>3</sup>; предел текучести – 550 МПа; коэффициент теплового расширения –  $0,75 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Трубы телескопов Т1 и Т2, вероятно, будут термически стабилизированы, то есть их температура будет поддерживаться на одном уровне с точностью до 0,5...1 °С. Назначение системы термической стабилизации заключается в сглаживании суточных вариаций температуры и связанного с ними теплового расширения.

Передний узел телескопа (сторона, обращенная к Солнцу) показан на нижней правой панели рис. 1. Узел включает следующие элементы: передняя крышка (6); входной фильтр (7); узел фокусировки (8); узел стабилизации изображения (9); вторичное зеркало (10); отсекающий вторичного зеркала (11). Система фокусировки включает один двигатель, ось которого совпадает с осью вторичного зеркала. Система обеспечивает линейные подвижки вторичного зеркала с характерным шагом около 1 мкм, что достаточно для обеспечения резкости изображения. Система стабилизации включает три двигателя, работающих на основе пьезоэффекта и обеспечивающих малые подвижки зеркала с шагом несколько нанометров. При подаче одинаковых смещений на все три двигателя зеркало смещается вдоль оптической оси без наклона, что эквивалентно тонкой фокусировке оптической системы. Если смещения неодинаковы, то вторичное зеркало будет наклоняться. При этом происходит смещение изображения в плоскости детектора. Таким способом можно компенсировать биение оси космического аппарата, которое имеет скорость около 1 угл. с/с. Информация о текущем положении Солнца поступает с оптического датчика, входящего в состав аппаратуры (датчик не показан на схеме). Вторым элементом переднего узла являются входной фильтр и расположенная непосредственно перед ним крышка телескопа. Поскольку тонкопленочный фильтр при старте ракеты может быть поврежден акустическими колебаниями, телескоп предполагается



**Рис. 1.** Схематическое изображение каналов Т1 и Т2. Слева – телескоп. Справа наверху – нижняя панель телескопа. Справа внизу – верхняя панель телескопа

вакуумировать. Поэтому к передней крышке (как и к конструкции в целом) помимо других требований предъявляются требования герметичности.

Задний узел телескопа (верхняя правая панель на рис. 1) включает: главное зеркало (1); механический затвор, задающий время экспонирования (2); фильтр детектора (3); детектор (4) и отсека-тель главного зеркала (5). В качестве детектора предполагается использовать ПЗС-матрицу с обратной освещенностью размером  $9216 \times 9216$  пикселей. Размер пиксела – 10 мкм. Формируемое изображение представляет собой круг диаметром 6144 пиксела, т.е. занимает только часть площади ПЗС. Остальная область используется как буфер для быстрого сдвига изображения при его чтении. Поле зрения телескопа составляет  $0,1 \times 6144 = 614,4$  угл. с или 10,24 угл. мин, что примерно равно 1/3 от диаметра солнечного диска. Поскольку рабочая температура детектора составляет около  $-40$  °С, детектор оснащается контуром охлаждения на основе элементов Пельтье (из одного или двух элементов).

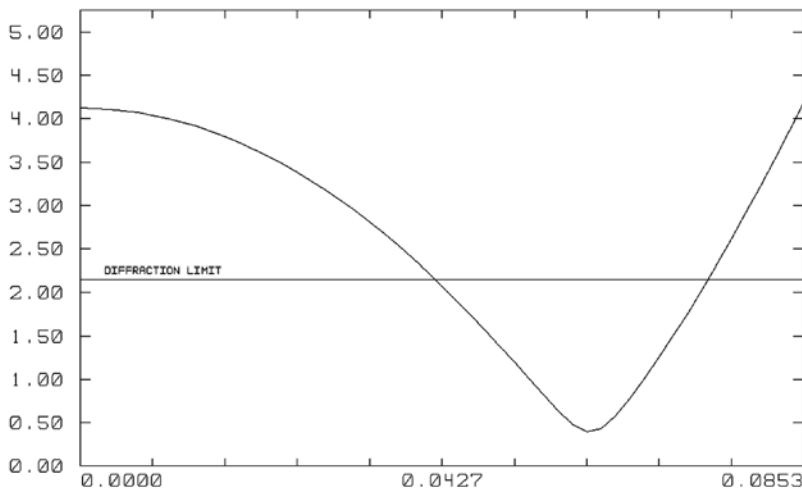
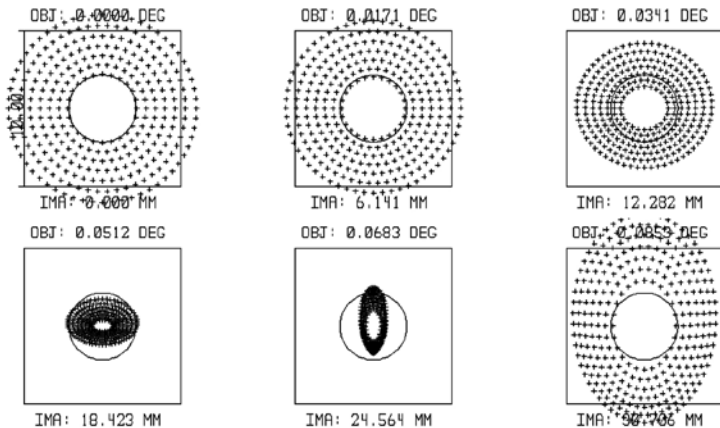
Отсекатели оптической системы (5) и (11) предназначены для устранения оптических лучей, которые могут попадать на детектор сквозь центральное отверстие в главном зеркале без отражения от главного и вторичного зеркал. Также отсекатели блокируют некоторую долю заряженных частиц, тем самым снижая радиационную нагрузку на детектор.

Подробно характеристики телескопов Т1 и Т2 приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Основные характеристики телескопов Т1 и Т2 КНА «Арка»

Угловое разрешение, угл. с/пиксел	0,1
Расстояние между вершинами главного и вторичного зеркал, мм	1800
Расстояние между вершиной первичного зеркала и плоскостью детектора, мм	200
Размер пиксела ПЗС (пиксел является квадратным), мкм	10
Полное поле зрения, угл. мин	10,24
Эффективное фокусное расстояние телескопа, мм	20626,48
Тип главного зеркала	вогнутое гиперболическое
Радиус кривизны главного зеркала, мм	3986,546465
Коническая константа главного зеркала	-1,002005
Тип вторичного зеркала	выпуклое гиперболическое
Радиус кривизны вторичного зеркала, мм	427,896981
Коническая константа вторичного зеркала	-1,476391
Диаметр главного зеркала, мм	200,00
Диаметр вторичного зеркала, мм	24,75

Третий телескоп КНА «Арка», телескоп ТХ, имеет конструкцию, совпадающую с конструкцией Т1 и Т2 (см. рис. 1), но отличается существенно меньшими размерами. Телескоп ТХ также не оснащен системами стабилизации изображения и термостабилизации трубы. Кроме того, поскольку детектор телескопа ТХ имеет рабочую температуру около 0 °С, то здесь не нужна система охлаждения детектора. Характеристики телескопа ТХ приведены в табл. 4.



**Рис. 2.** Расчет RMS (среднеквадратичное отклонение оптических лучей) для каналов Т1 и Т2. Верхняя панель: пятно рассеивания лучей в плоскости детектора как функция угла падения лучей: верхний ряд – изображения для углов 0; 0,0171 и 0,0341°; нижний ряд – изображения для углов 0,0512; 0,0683 и 0,0853°; квадрат соответствует размеру пиксела ПЗС; круг – дифракционный предел. Нижняя панель: радиус RMS как функция угла падения лучей в диапазоне от 0 до 0,0853°



**Таблица 4.** Основные характеристики телескопа ТХ КНА «Арка»

Полное поле зрения, град	1,0
Угловое разрешение, угл. с	1,7578
Эффективное фокусное расстояние, мм	1584,13
Расстояние между вершинами зеркал, мм	450
Расстояние от вершины главного зеркала до плоскости детектора, мм	89,11
Тип главного зеркала	вогнутое гиперболическое
Радиус кривизны главного зеркала, мм	1364,3000
Коническая константа главного зеркала	-1,191322
Тип вторичного зеркала	выпуклое гиперболическое
Радиус кривизны вторичного зеркала, мм	815,441095
Коническая константа вторичного зеркала	-7,349409

Для оценки качества изображения, получаемого основными инструментами КНА «Арка» – Т1 и Т2, была использована программа Zemax. С ее помощью был произведен расчет среднеквадратичного отклонения оптических лучей (RMS), сфокусированных на плоскости детектора, от идеального положения. Расчет производился как функция угла падения лучей: от нулевого угла, соответствующего центру поля зрения, до краевых лучей. Результаты расчетов показаны на рис. 2. Оба изображения демонстрируют, что радиус RMS во всем поле зрения находится ниже уровня 5 мкм; соответственно, пятно рассеивания на всей матрице не превышает размера пиксела. Угловое разрешение оптической системы, таким образом, не хуже, чем пиксельное разрешение.

В заключение, в табл. 5 приводятся основные массово-энергетические характеристики КНА «Арка», а в табл. 6 – характеристики орбиты и объем телеметрии.

**Таблица 5.** Массово-энергетические характеристики телескопов КНА «Арка»

Блок	Длина, мм	Диаметр, мм	Масса, кг	Энергия, Вт	Примечание
Арка-Т1	2200	250	37	35	Телескоп высокого разрешения
Арка-Т2	2200	250	37	35	Телескоп высокого разрешения
Арка-ТХ	950	250	9	10	ВУФ-телескоп полного диска Солнца
Арка-О1	600	50	1	5	Оптический датчик телескопа Т1 (монтируется как часть телескопа Т1)

Окончание табл. 5

Блок	Длина, мм	Диаметр, мм	Масса, кг	Энергия, Вт	Примечание
Арка-О2	600	50	1	5	Оптический датчик телескопа Т2 (монтируется как часть телескопа Т2)
Арка-БЭ	300×200×150		5	20	Общий блок электроники (монтируется произвольно по согласованию с разработчиком КА)
<b>ИТОГО</b>			<b>90</b>	<b>110</b>	

**Таблица 6.** Сведения по орбите и объемам целевой информации КНА «Арка»

Тип орбиты	Геосинхронная
Наклонение орбиты, град.	63,4
Объем целевой информации телескопа Т1, ГБ	9,5
Объем целевой информации телескопа Т2, ГБ	9,5
Объем целевой информации телескопа ТХ, ГБ	1,0
Суммарный объем целевой информации КНА «Арка», ГБ	20,0

## Благодарности

Авторы благодарны коллективу НПО им. С.А. Лавочкина за существенный вклад в работы по подготовке эксперимента КНА «Арка» и по его эскизному проектированию.

Исследовательские работы по проекту частично проводились при поддержке гранта Президента РФ № МД-5510.2011.2 по поддержке молодых российских ученых и поддержке гранта РФФИ № 11-02-01079-а.

## Литература

[Кузин и др., 2011] Кузин С. В., Богачев С. А., Перцов А. А. и др. Исследование солнечной короны со сверхвысоким пространственным разрешением в проекте «Арка» // Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75. № 1. С. 91–94.

[Aschwanden, 2005] *Aschwanden M. J.* Physics of the Solar Corona. An Introduction with Problems and Solutions. Praxis Publishing Ltd., Chichester, UK; Springer, New York, Berlin, 2005.

[Aschwanden, Schrijver, 2011] *Aschwanden M. J., Schrijver C. J.* Coronal Loop Oscillations Observed with Atmospheric Imaging Assembly—Kink Mode with Cross-sectional and Density Oscillations // The Astrophysical Journal. 2011. V. 736. Iss. 2. Article id. 102.

- [Golub, Pasachoff, 2009] *Golub L., Pasachoff J. M.* The Solar Corona. Cambridge University Press, 2009.
- [Golub et al., 2007] *Golub L., Deluca E., Austin G. B.* The X-Ray Telescope (XRT) for the Hinode Mission // *Solar Physics*. 2007. V. 243. Iss. 1. P. 63–86.
- [Delaboudinière et al., 1995] *Delaboudinière J.-P., Artzner G. E., Brunaud J. et al.* EIT: Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope for the SOHO Mission // *Solar Physics*. 1995. V. 162. Iss. 1-2. P. 291–312.
- [Handy et al., 1998] *Handy B. N., Bruner M. E., Tarbell T. D., et al.* UV Observations with the Transition Region and Coronal Explorer // *Solar Physics*. 1998. V. 183. Iss. 1. P. 29–43.
- [Handy et al., 1999] *Handy B. N., Acton L. W., Kankelborg C. C. et al.* The Transition Region and Coronal Explorer // *Solar Physics*. 1999. V. 187. Iss. 2. P. 229–260.
- [Kuzin et al., 2009] *Kuzin S. V., Bogachev S. A., Zhithnik I. A. et al.* TESIS experiment on EUV imaging spectroscopy of the Sun // *Advances in Space Research*. 2009. V. 43. Iss. 6. P. 1001–1006.
- [Lemen et al., 2012] *Lemen J. R., Title A. M., Akin D. J., et al.* The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Physics*. 2012. V. 275. Iss. 1–2. P. 17–40.
- [Ulyanov et al., 2010] *Ulyanov A. S., Bogachev S. A., Kuzin S. V.* Bright points and ejections observed on the sun by the KORONAS-FOTON instrument TESIS // *Astronomy Reports*. 2010. V. 54. Iss. 10. P. 948–957.

## TECHNICAL CONCEPTION AND SCIENTIFIC OBJECTIVES OF THE INSTRUMENT “ARKA” FOR SMALL SPACE EXPLORER

**S. A. Bogachev, S. V. Kuzin, A. A. Pertsov, S. V. Shestov,  
Yu. S. Ivanov, A. S. Ulyanov, A. S. Kirichenko, A. A. Reva**  
*The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy  
of Sciences (LPI RAS), Moscow*

The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI RAS) works currently on the scientific instrument “Arka” for Small space explorer №5 included in the Russian program of fundamental space researches. The instrument is designed to obtain highly-precision images of the Sun with spatial resolution of about 0.1 arcsec/pix which correspond to linear size of ~ 70 km on the solar surface. This resolution is of 17 times higher than the one for TESIS telescopes on board CORONAS-Photon (Russia) and is of 6 times higher than resolution of solar telescope AIA operated on board SDO spacecraft (USA). The conception of “Arka” is similar to the TRACE observatory, launched in 1998 within the NASA program SMEX (SMall EXplorer missions). This concept means an observation of the Sun within a strongly limited field of view and with very high angular resolution. The “Arka” consists of three instruments: two main telescopes for an observation of solar

corona and transition region of the Sun in spectral lines Fe IX 171 Å (telescope T1) and He II 304 Å (telescope T2); the last instrument is a relatively compact telescope TX intended for full solar disk imaging. The spacecraft will operate on geosynchronous orbit with an inclination of 63.4° which provides a possibility for non-occluding observation of the Sun except for short-term eclipse periods. We expect that the telescopes will be providing from 100 to 1000 images of the Sun per day. The size of images will be 6144×6144 pix. The web site of the experiment will be available on <http://arka.lebedev.ru>.

**Keywords:** small space explorer; Sun; EUV telescope.

---

**Bogachev Sergey Aleksandrovich** – Leading researcher, PhD,  
[bogachev@sci.lebedev.ru](mailto:bogachev@sci.lebedev.ru)

**Kuzin Sergey Vadimovich** – Head of laboratory of Solar X-ray Astronomy, PhD,  
[kuzin@sci.lebedev.ru](mailto:kuzin@sci.lebedev.ru)

**Pertsov Andrey Aleksandrovich** – Senior scientific researcher, PhD,  
[perzov@sci.lebedev.ru](mailto:perzov@sci.lebedev.ru)

**Shestov Sergey Viktorovich** – Senior scientific researcher, PhD,  
[sshestov@gmail.com](mailto:sshestov@gmail.com)

**Ivanov Yuriy Sergeevich** – Leading design engineer, [yivanov@lebedev.ru](mailto:yivanov@lebedev.ru)

**Ulyanov Artem Sergeevich** – postgraduate student, [ikiru@inbox.ru](mailto:ikiru@inbox.ru)

**Kirichenko Alexey Sergeevich** – Engineer of the 1st category, [kirichenko@lebedev.ru](mailto:kirichenko@lebedev.ru)

**Reva Anton Aleksandrovich** – postgraduate student, [reva.antoine@gmail.com](mailto:reva.antoine@gmail.com)

# КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ВСЕНАПРАВЛЕННОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА МАЛОМ КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ

*А. В. Дудник<sup>1</sup>, М. Прето<sup>2</sup>, Е. В. Курбатов<sup>1</sup>, С. Санчез<sup>2</sup>,  
Т. Г. Тимакова<sup>1</sup>, К. Г. Титов<sup>1</sup>, П. Парра<sup>2</sup>, А. М. Авиллов<sup>1</sup>,  
Ю. Д. Котов<sup>3</sup>, В. Н. Юров<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Харьковский национальный университет имени  
В. Н. Каразина (ХНУ), Харьков, Украина*

<sup>2</sup> *Группа космических исследований,  
Университет г. Алкала, Алкала де Энарес, Испания*

<sup>3</sup> *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего профессионального  
образования «Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ),  
Институт астрофизики (ИАФ), Москва*

В данной работе представлена концепция построения всенаправленной системы мониторинга заряженных частиц высоких энергий на основе группы малогабаритных бортовых приборов. Описываются структурная схема, принципы работы, первые результаты лабораторных тестов отдельных модулей унифицированного

---

*Дудник Алексей Владимирович* – заведующий сектором космических исследований ХНУ имени В. Н. Каразина, кандидат физико-математических наук, [Oleksiy.V.Dudnik@univer.kharkov.ua](mailto:Oleksiy.V.Dudnik@univer.kharkov.ua)

*Прето Мануэл Матео* – доцент кафедры автоматки политехнического факультета университета г. Алкала де Энарес, доктор философии (PhD), [mpm@aut.uah.es](mailto:mpm@aut.uah.es)

*Курбатов Евгений Владимирович* – инженер 1-й категории ХНУ имени В. Н. Каразина, [Eugen.V.Kurbatov@univer.kharkov.ua](mailto:Eugen.V.Kurbatov@univer.kharkov.ua)

*Санчез Себастиан Прето* – доцент кафедры автоматки политехнического факультета университета г. Алкала де Энарес, доктор философии (PhD), [mpm@aut.uah.es](mailto:mpm@aut.uah.es)

*Тимакова Таиса Гавриловна* – ведущий инженер ХНУ имени В. Н. Каразина, [Taisa.G.Timakova@univer.kharkov.ua](mailto:Taisa.G.Timakova@univer.kharkov.ua)

*Титов Кирилл Германович* – студент 6-го курса физико-технического факультета ХНУ имени В. Н. Каразина

*Парра Пабло Эспада* – старший преподаватель кафедры автоматки политехнического факультета университета г. Алкала де Энарес

*Авиллов Александр Максимович* – старший научный сотрудник ХНУ имени В. Н. Каразина

*Котов Юрий Дмитриевич* — директор ИАФ НИЯУ МИФИ, профессор, кандидат физико-математических наук, [kotov@mephi.ru](mailto:kotov@mephi.ru)

*Юров Виталий Николаевич* — заместитель директора ИАФ НИЯУ МИФИ, кандидат физико-математических наук, [VNYurov@mephi.ru](mailto:VNYurov@mephi.ru)

компактного прибора SIDRA. Обосновывается необходимость разработки спектрометра и приводится перечень актуальных задач, решаемых с помощью группы унифицированных приборов. Обсуждаются результаты компьютерного моделирования, измерений основных характеристик электронных узлов; тестирования лабораторного макета. Описываются режимы работы прибора.

**Ключевые слова:** заряженные частицы, кремниевый детектор, космический аппарат, электронные узлы, ускоритель частиц, ПЛИС, сцинтиллятор, испытания, программное обеспечение.

## **Введение**

Бортовые служебные системы и научная аппаратура спутников могут функционировать со сбоями или даже выходить из строя под воздействием повышенных потоков заряженной радиации высокой энергии. В случае, если спутники имеют на своем борту сенсоры, адекватно отражающие изменения радиационной обстановки, причина сбоев может быть идентифицирована. К примеру, приборы, установленные на борту спутников SCATHA, Voyager I и CRRES, помогли идентифицировать причины сбоев в работе аппаратуры, сброса первичного питания при его подаче на полезную нагрузку [Дудник и др., 2011, 2012; Violet, Frederickson, 1993]. Несмотря на многолетние усилия разработчиков космической аппаратуры по применению различных методов защиты электронного и оптического оборудования от воздействия заряженной радиации, все еще поступают сведения о выходе из строя того или иного устройства или системы космического аппарата. Так, в результате мощной солнечной вспышки балла X5.4 в рентгеновском диапазоне длин волн по данным спутника GOES15, произошедшей в 04.02UT 7 марта 2012 г., и серии более мелких предшествующих и последующих вспышек, из короны Солнца в межпланетной пространстве были выброшены огромные облака намагниченной плазмы. Европейский космический зонд "Венера-Экспресс", находящийся на орбите Венеры и гораздо ближе к Солнцу, чем Земля, подвергся воздействию радиации. Звездные датчики были "ослеплены". Группа управления полетом Европейского космического агентства приняла решение временно вывести датчики из эксплуатации и поддерживать ориентацию зонда с использованием гироскопов.

Новые детектирующие системы для регистрации потоков заряженных частиц развиваются быстрыми темпами. Высоко интегрированные электронные системы цифровой обработки сигналов, такие как микропроцессоры и программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), позволяют разрабатывать достаточно простые и в то же время эффективные малогабаритные приборы для записи и передачи информации о потоках частиц разных сортов и энергий. В частности, применение органических сцинтилляторов из п-терфенила или стильбена с регистрацией сигнала

кремниевыми фотоумножителями [Renker, 2006; Vacheret et al., 2011] в блоке детекторов прибора позволяет уменьшить число слов в телескопической системе по сравнению с применением одних только полупроводниковых детекторов. В то же время расширяется диапазон регистрируемых энергий и увеличивается верхний предел регистрируемых скоростей счета сигналов от частиц.

Целью настоящей работы является описание концепции построения всенаправленной системы мониторинга заряженных частиц высоких энергий на основе унифицированных одноблочных компактных детекторных модулей макета прибора SIDRA (Space Instrument for Determination of Radiation environment) [Dotsenko et al., 2009; Dudnik et al., 2009a, 2009b] – базового прибора системы. Описываются принципы функционирования прибора, электрические характеристики отдельных модулей аналоговой и цифровой обработки сигналов, а также результаты компьютерного моделирования, градуировочных измерений с использованием радиоактивных источников и ускоренных заряженных частиц; результаты тепловакуумных испытаний и измерений электромагнитных помех.

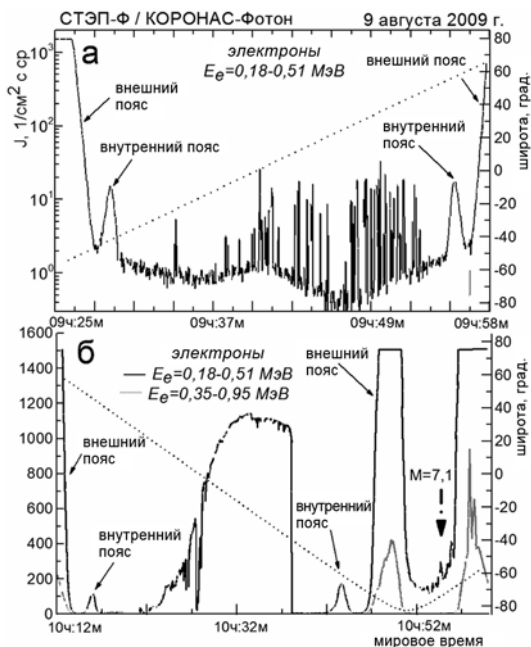
## **1. Научные задачи, решаемые с использованием системы детекторных модулей**

Совместный анализ данных солнечного рентгеновского спектрофотометра SphinX и спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф разработки Центра космических исследований Польской академии наук и ХНУ имени В.Н. Каразина, соответственно, установленных на борту космического аппарата (КА) «КОРОНАС-Фотон», показал значительную разницу в характере энергетических спектров ультрарелятивистских электронов в области Южно-Атлантической магнитной аномалии (ЮАА), внешнего и внутреннего радиационных поясов [Дудник и др., 2012]. Есть указания на то, что даже в случае слабых геомагнитных бурь на малых высотах наблюдаются два внутренних электронных радиационных пояса Земли [Дудник и др., 2011]. Причем, энергетический спектр дополнительного пояса значительно мягче спектра основного внутреннего пояса. Кроме того, пучки электронов под радиационными поясами на высотах ~550 км носят ярко выраженный анизотропный характер в сравнении с почти изотропным распределением потоков частиц в районе ЮАА. Однако данные результаты получены в солнечно спокойный период за короткий промежуток времени и нуждаются в уточнении и подтверждении. В связи с этим остается актуальной задачей дальнейшее изучение динамики потоков и энергетических спектров электронов и протонов промежуточных энергий.

Практически неизученной является природа появления микровсплесков электронов на низких и приэкваториальных широтах под радиационными поясами Земли на высотах в несколько сотен километров от поверхности Земли. Так, в августе 2009 г. прибором СТЭП-Ф на борту КА «КОРОНАС-Фотон» были зарегистрированы

повышения интенсивности электронов с энергиями до  $\sim 0,5$  МэВ в десятки и тысячи раз в виде кратковременных микровсплесков. Эти микровсплески наблюдаются в тех зонах магнитосферы, где их не должно быть согласно моделям распределения заряженной радиации, а именно – на низких широтах и вблизи экватора в областях, далеко отстоящих от ЮАА.

На рис. 1 представлен временной ход плотности потока электронов с энергиями  $E_e = 0,18 \dots 0,51$  МэВ на высоте  $\sim 550$  км 9 августа 2009 г. в период с 9 ч 25 мин до 9 ч 58 мин мирового времени (UTC) с временным разрешением 2 с (рис. 1а) и электронов в двух энергетических диапазонах –  $E_e = 0,18 \dots 0,51$  МэВ и  $E_e = 0,35 \dots 0,95$  МэВ — в период с 10 ч 12 мин до 11 ч 00 мин UTC с временным разрешением 30 с (рис. 1б). Пунктирными линиями обозначены географические широты положения КА в процессе движения. Рис. 1а показывает, что в период между двумя пересечениями внутреннего радиационного пояса в южном и северном полушариях на восходящем витке орбиты КА прибор СТЭП-Ф, проходя низкоширотные и приэкваториальные зоны, регистрировал интенсивные всплески потоков электронов с энергиями



**Рис. 1.** Временной ход плотности потока электронов 9 августа 2009 г. с временным разрешением 2 с на восходящем витке орбиты (а) и с временным разрешением 30 с на нисходящем витке орбиты (б) по данным прибора СТЭП-Ф на борту КА «КОРОНАС-Фотон». Правая шкала оси Y – географическая широта положения КА (пунктирные кривые).



$E_e = 0,18 \dots 0,51$  МэВ. Максимальные амплитуды этих всплесков были сравнимы с плотностью потока частиц во внутреннем поясе и регистрировались, главным образом, на низких широтах северного полушария. В то же время подобные всплески более энергичных электронов практически не наблюдались, что указывает на быстро спадающий энергетический спектр электронов.

На нисходящем витке орбиты КА плотность потока электронов низких энергий в районе экватора и низких широт северного и южного полушарий значительно превышала плотность потока частиц во внутреннем поясе (рис. 1б). Кроме того, в начале восходящего витка в период с 10 ч 56 мин до 11 ч 00 мин UTC наблюдались повышенные потоки электронов с энергиями  $E_e = 0,35 \dots 0,95$  МэВ. Учитывая полное отсутствие солнечной и геомагнитной активности в августе 2009 г., возможной причиной необычного поведения электронов могла быть повышенная сейсмическая активность, в частности землетрясение балла 7,1 вблизи Японии в 10 ч 55 мин с координатами  $33^\circ$  с.ш. и  $138^\circ$  в.д. Для подтверждения этого предположения и выяснения причин появления интенсивных всплесков высыпающихся электронов на низких широтах и в районе экватора необходимы дополнительные спутниковые эксперименты с уменьшением нижнего энергетического порога регистрации с  $E_e = 180$  кэВ до минимально возможного порога по энергии.

Помимо этого, в составе комплекса научной аппаратуры проекта «Солнечный монитор» с целью мониторинга радиационного состояния околоземного космического пространства [Юров и др., 2011] задачей аппаратуры SIDRA планируется исследование на околоземной орбите химического и изотопного состава ускоренных во вспышке ядер легких и средних элементов, энергетических и временных характеристик вспышечных электронов и протонов в режиме мониторинга.

## **2. Состав и расположение системы; функциональные узлы приборов**

Систему всенаправленной регистрации потоков заряженных частиц высоких энергий на спутниковых высотах предполагается построить на основе унифицированных компактных модулей. Каждый из модулей не имеет пространственной чувствительности, однако одновременная установка нескольких модулей под разными углами по отношению к осям КА и в разных местах на его поверхности позволит определять направление прихода каждой частицы или пучков частиц. Так, в случае солнечно-ориентированного КА (ось  $Z$  направлена на Солнце) целесообразно установить 1-й модуль под углом  $35^\circ$  к этой оси для отворота конуса обзора прибора от прямых попаданий солнечных лучей и, соответственно, для минимизации тепловых нагрузок на детекторные узлы. При этом целесообразно расположить модуль таким образом, чтобы проекция оси конуса обзора прибора на плоскость  $XY$  КА совпадала либо с осью  $X$ , либо с осью  $Y$  КА.

Второй унифицированный прибор необходимо расположить на противоположной стороне КА в антисолнечном направлении, вдоль оси  $-Z$ . Наконец, последние 2 прибора следует расположить вдоль осей  $X$  и  $Y$  КА. В случае стабилизации КА не только в направлении на Солнце, но и вдоль осей  $X$  и  $Y$ , в определенный момент времени одна из осей плоскости  $XY$  будет направлена в сторону Земли, а вторая ось – вдоль ее поверхности. Через полвитка первая ось, напротив, будет направлена в сторону от Земли, и, таким образом, приборы системы будут одновременно и попеременно регистрировать потоки частиц, направленные к Земле, от нее и вдоль поверхности Земли.

С целью отработки электрических параметров каждого из модулей был разработан и изготовлен макет прибора, структурная схема которого и общий вид показаны на рис. 2.

Детекторная головка представляет собой телескопическую систему, состоящую из трёх высокоомных кремниевых PIN-детекторов различной толщины и органического сцинтилляционного детектора с малыми значениями эффективного заряда и плотности. Непосредственно под детекторной головкой расположен модуль обработки аналоговых сигналов. Он состоит из трёх однотипных каналов, включающих малошумящие зарядочувствительные предварительные усилители (ЗЧПУ), формирующие усилители (ФУ) с программно регулируемым коэффициентом усиления, масштабирующие усилители, и отдельного канала на основе ФУ. Дополнительно, 2-й и 3-й каналы обработки сигналов включают в себя устройства выборки и хранения (УВХ) и быстрые аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Основными задачами, выполняемыми модулем цифровой обработки сигналов, являются сбор и первичная обработка цифровых данных, поступающих от аналого-цифровых преобразователей; идентификация сортов частиц и их энергий; пересылка научных данных в бортовой компьютер. Кроме того, с помощью модуля цифровой обработки происходит конфигурирование некоторых ключевых параметров прибора в целом [Prieto et al., 2009].

Модуль вторичного питания расположен в нижней части прибора и имеет два идентичных полукомплекта, собранных на одной печатной плате. Модуль работает по принципу «холодного» резервирования, т. е. только один полукомплект, обеспечивающий все вторичные питания, подключен к бортовому источнику первичного питания 18...36 В. Второй полукомплект схемы при этом отключен, обеспечивая продление периода активной работы прибора в целом. Выбор включенного полукомплекта осуществляется путем подачи телекоманды от бортового компьютера спутника. Предусмотрены контроль всех величин вторичных напряжений обоих полукомплектов с помощью телеметрической системы КА, а также применение самовосстанавливающихся после срабатывания от короткого замыкания защитных цепей. Защитные схемы предусмотрены в цепях как первичного, так и вторичного питания.

## Концепция построения всенаправленной системы регистрации потоков заряженных частиц...

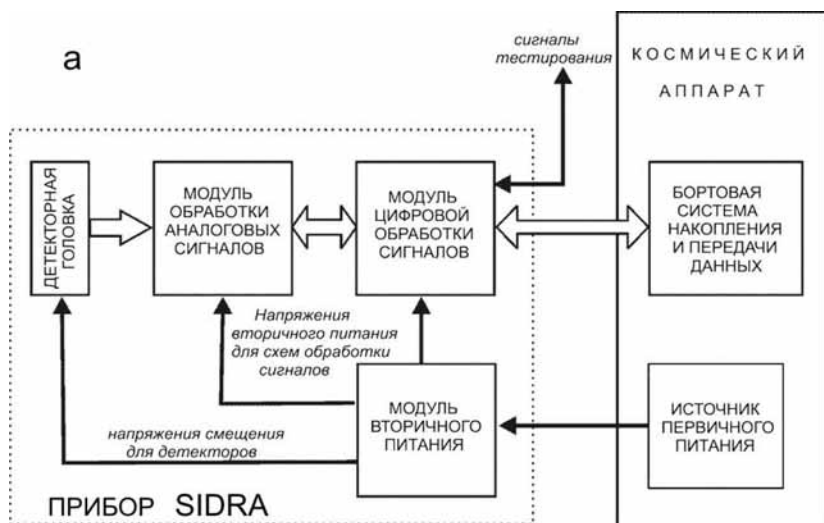


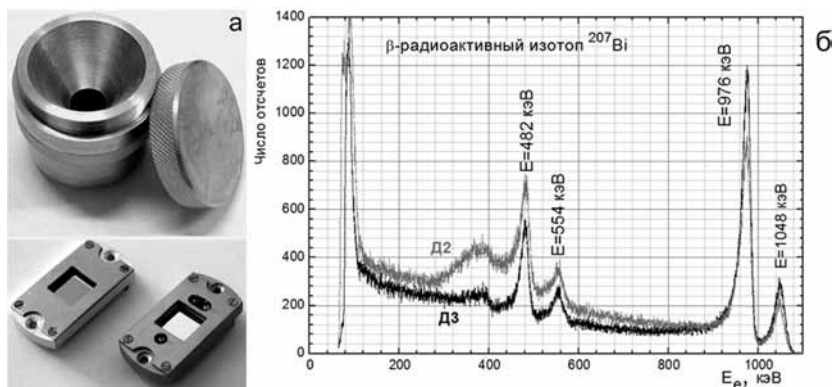
Рис. 2. Структурная схема (а) и общий вид (б) макета прибора SIDRA

Каждый из функциональных узлов сконструирован таким образом, что предусматривает установку печатных плат в отдельные металлические корпуса, соединяемые друг с другом. Такая конструкция, позволяющая дополнить прибор несколькими модулями при необходимости увеличить число аналоговых сигналов от дополнительных детекторов или детекторных головок, очень удобна для настройки, регулировки и ремонта прибора.

### 3. Детекторная головка и детекторы

PIN-детекторы детекторной головки, изготовленные из сверхчистого кремния, защищены от прямого попадания солнечного света и низкоэнергетических частиц магнитосферной и межпланетной плазмы алюминиевой фольгой толщиной  $\sim 20$  мкм. Такая защита обеспечивает нижний энергетический порог регистрации электронов  $E_e \approx 40$  кэВ. Общий вид детекторной головки и кремниевых детекторов, изготовленных по специальному заказу фирмой Micron Semiconductor, Ltd.\* , показан на рис. 3а. Тонкие алюминиевые пластины, соединенные между собой миниатюрными винтами, надежно удерживают кремниевые детекторы и защищают их от механических перегрузок на этапе вывода космического аппарата на орбиту.

Для варианта реализации эксперимента на низколетающем спутнике с круговой полярной орбитой детекторы имеют одинаковые активные площади  $10 \times 10$  мм, толщина верхнего тонкого пролетного  $\Delta E$ -детектора Д1 составляет  $h_{Д1} = 109$  мкм, в то время как толщина второго и третьего толстых детекторов полного поглощения Д2 и Д3 составляет, соответственно,  $h_{Д2} = 999$  мкм и  $h_{Д3} = 1500$  мкм. Полное обеднение активных областей детекторов Д2 и Д3 достигается при напряжениях обратного смещения  $U \approx 150$  В и выше и  $U \sim 250$  В и выше, соответственно. Емкости детекторов довольно малы, практически одинаковы во всем диапазоне напряжений обратных смещений, и составляют  $C \approx 15$  пФ. Полное обеднение активной области детектора Д1 достигается при напряжении обратного смещения  $U \approx 8$  В и выше, при этих условиях емкость детектора будет составлять  $C \approx 105$  пФ.



**Рис 3.** Общий вид детекторной головки и кремниевых PIN- детекторов (а); энергетические спектры  $\beta$ -источника конверсионных электронов  $^{207}\text{Bi}$ , измеренные с помощью детекторов Д2 толщиной  $h = 999$  мкм и Д3 толщиной  $h = 1500$  мкм (б)

\* <http://www.micronsemiconductor.co.uk>

**Таблица 1.** Чувствительность  $S_{\text{ЗЧПУ}}$  и диапазоны регистрируемых энергий для трёх величин коэффициентов усиления  $K_{\text{У}}$  формирующих усилителей(ФУ) в зависимости от емкости обратной связи  $C_{\text{ф}}$  ЗЧПУ

ЗЧПУ			ФУ, U = 25...3600 мВ		
$C_{\text{ф}}$ пФ	$S_{\text{ЗЧПУ}}$ мВ/МэВ	$E_{\text{макс}}$ при $U_{\text{ввых}} = 3,6 \text{ В}$ , МэВ	$\Delta E$ при $K_{\text{У}1} = 1$ , МэВ	$\Delta E$ при $K_{\text{У}2} = 10$ , МэВ	$\Delta E$ при $K_{\text{У}3} = 25$ , МэВ
1	44,2	81,3	0,56...81,3	0,06...8,1	0,02...3,25
2	22,1	163	1,13...163	0,11...16,3	0,05...6,5
3	14,8	244	1,7...244	0,17...24,4	0,07...9,8
4,3	10,3	350	2,4...350	0,24...35	0,1...14,0
5,1	8,7	414	2,9...414	0,29...41,4	0,12...16,6
6,8	6,5	553	3,8...553	0,38...55,3	0,15...22,1
10	4,4	813	5,6...813	0,56...81,3	0,23...32,5

Рис. 3б демонстрирует качество работы кремниевых детекторов Д2 и Д3 с использованием обычной лабораторной техники при нормальной температуре и влажности во время измерения энергетического спектра электронов от  $\beta$ -радиоактивного источника  $^{207}\text{Bi}$ , имеющего четыре энергетические линии.

Спектры показывают очень хорошую эффективность регистрации для наибольшей энергии  $E_e = 1048 \text{ кэВ}$ . Для детектора Д3 эффективность регистрации выше, чем для Д2, ввиду большей толщины и, соответственно, большего количества полностью остановившихся электронов. Хорошее энергетическое разрешение, которое варьирует в диапазоне от  $\Delta E = 14 \text{ кэВ}$  до  $\Delta E = 17 \text{ кэВ}$  для электронов, имеющих энергии  $E_e = 0,4...1 \text{ МэВ}$ , позволяет построить прибор SIDRA как спектрометр энергий заряженных частиц с шагом квантования по энергиям  $\Delta E \geq 20 \text{ кэВ}$ .

#### **4. Модуль обработки аналоговых сигналов**

Зарядочувствительные предварительные усилители (ЗЧПУ) построены на основе широкополосных операционных усилителей с целью обратной связи, в которой емкость обратной связи  $C_{\text{ф}}$  играет важную роль для определения чувствительности ЗЧПУ —  $S_{\text{ЗЧПУ}}$ , выраженной в единицах мВ/МэВ. В табл. 1 представлены значения  $S_{\text{ЗЧПУ}}$  и максимально возможных регистрируемых энергий частиц на выходах ЗЧПУ в зависимости от величины  $C_{\text{ф}}$  в случае, когда максимальное выходное напряжение ЗЧПУ  $U_{\text{ввых}} = 3,6 \text{ В}$ . Скорость нарастания сигналов ЗЧПУ  $\sim 150 \text{ В/мкс}$ , темновой ток  $\sim 1 \text{ нА}$ .

Формирующие усилители обеспечивают плавную регулировку коэффициента усиления без искажения квазигауссовой формы выходного сигнала. Они имеют также цепи восстановления базовой линии, которые могут функционировать при частоте следования

импульсных сигналов до  $f = 300$  кГц. Диапазоны регистрируемых энергий частиц для трех величин коэффициентов усиления ( $K_{y1}$ ,  $K_{y2}$ ,  $K_{y3}$ ) также представлены в табл. 1. Диапазон выходных напряжений  $U = 25 \dots 3600$  мВ соответствует линейной части характеристики  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  устройства выборки и хранения спектрометрических каналов аналоговой обработки сигналов.

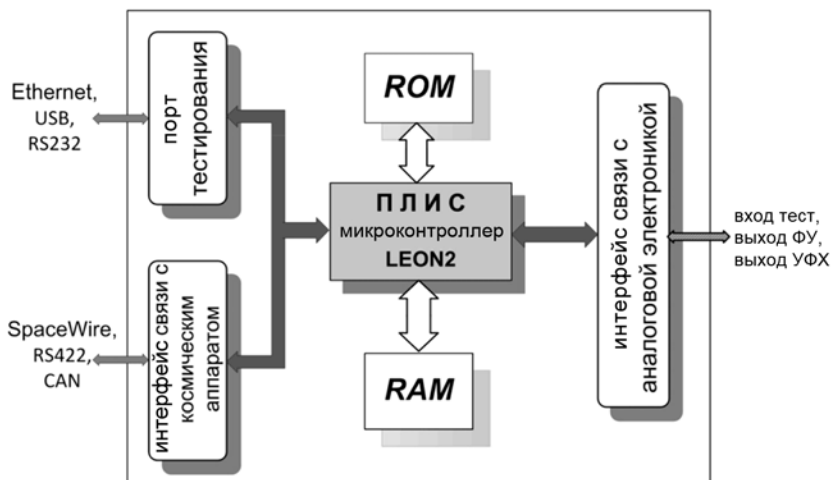
Длительность выходных сигналов составляет  $\sim 2,1$  мкс на уровне  $0,1 U_{\text{max}}$ , где  $U_{\text{max}}$  – максимальная амплитуда выходных сигналов.

Устройство выборки и хранения имеет широкий диапазон длительностей сигналов для запоминания, малые искажения и максимальный темп счета до  $f = 600$  кГц. Максимальные скорости нарастания сигналов пиковых детекторов  $W_{2,3} = 8,1$  В/мкс для второго и третьего каналов и  $W_1 = 50$  В/мкс для первого канала модуля обработки аналоговых сигналов.

Каждый канал модуля обработки аналоговых сигналов имеет внешние разъемы, позволяющие подавать тестовые сигналы на входы ЗЧПУ и наблюдать выходные сигналы формирователей и пиковых детекторов на осциллографе во время регулировки прибора.

## 5. Модуль цифровой обработки сигналов

Основными компонентами модуля цифровой обработки сигналов, блок-схема которого показана на рис. 4, являются программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) с эмулированным микропроцессором LEON2, тестовый порт для отладки программного обеспечения, интерфейсы связи с аналоговой электроникой и бортовыми подсистемами сбора информации. При разработке модуля главной задачей было создание перенастраиваемой си-



**Рис 4.** Блок-схема модуля цифровой обработки сигналов

стемы на основе ПЛИС таким образом, чтобы минимизировать число компонентов и упростить конструкцию печатной платы. Кроме того, благодаря возможности реконfigurирования, обеспеченной микросхемой ПЛИС, в случае изменения технических требований доработка конструкции и сопровождающей технической документации будет происходить с уменьшенными затратами.

Для разработки прототипа модуля цифровой электроники, а также для сокращения времени и стоимости, на ранней стадии проектирования использовался коммерческий вариант готовой отработанной платы, отвечающей изложенным выше требованиям. В качестве такой платы была выбрана GR- XC3S 1500 разработка компаний Aeroflex Gaisler\* и Pender electronic design GmbH\*\*. Программное обеспечение написано на языке программирования СИ и загружается через операционную систему реального времени для мультипроцессорных систем RTEMS, используемую во многих космических системах.

Программное обеспечение ПЛИС позволяет проводить текущий анализ данных таким образом, что могут быть определены тип частицы, ее энергия и интенсивность потока. Это влечет за собой требование исполнения микропроцессором последовательности математических операций в реальном масштабе времени. Для этого программный код должен, помимо реализации операций с плавающей запятой, быть оптимизирован для ускорения исполнения процессов.

Конечная конфигурация для прототипа цифровой электроники обеспечивает два основных входных/выходных интерфейса: интерфейс связи с управляющим персональным компьютером для отладки и тестирования и интерфейс связи с аналоговой электроникой. Интерфейсом связи с управляющим компьютером является 10/100 Мбит/с Ethernet интерфейс. Для летной модели прибора рассматриваются такие возможные интерфейсы связи с космическим аппаратом как Spacewire, RS422 или CANBus.

Посредством порта Ethernet управляющий компьютер получает и хранит телеметрические данные, генерированные прибором (научную информацию и статусные данные).

Он также посылает команды и конфигурирует прибор согласно выбранному режиму работы. Возможно также дистанционное управление в случае, если прибор будет подключен к сети Интернет.

Основная функция интерфейса связи с модулем обработки аналоговых сигналов — это сбор данных, поступающих от высокоскоростных АЦП в реальном времени. Через этот интерфейс идет обмен всеми сигналами между АЦП и микропроцессором. Помимо этого, могут быть настроены определенные параметры узлов аналоговой электроники, такие как коэффициенты усиления ФУ, уровни порогов дискриминации.

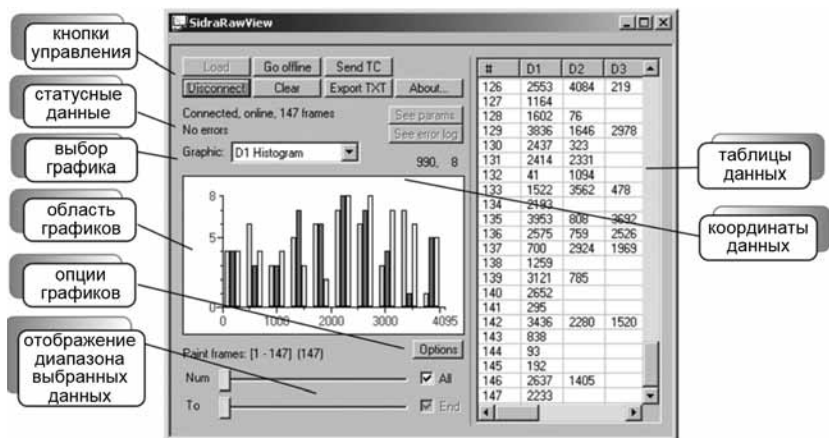
---

\* <http://www.gaisler.com>

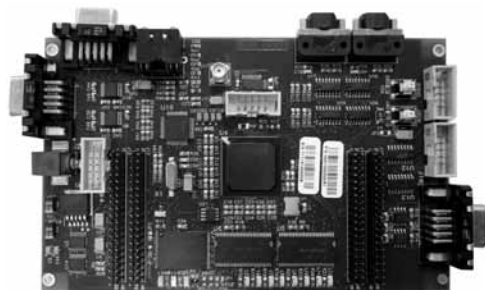
\*\* <http://www.pender.ch>

Аппаратное и основное программные обеспечения разработаны таким образом, чтобы было видно большое количество статусной информации о процессе (счетчик числа ошибок, время выполнения операции и др.) с целью иметь возможность выполнять необходимые настройки на самой ранней стадии отработки проекта.

В итоге было разработано программное обеспечение на языке программирования С++ для получения и передачи данных на управляющий компьютер. Программа SidraRawView.exe может отображать данные в реальном времени, помогая детектировать аномалии в процессе получения данных. Основное интерфейсное окно программы SidraRawView показано на рис. 5. Как видно на рисунке, пользователь может отсылать телекоманды, получать и наблюдать необработанные данные, используя это единственное интерфейсное окно.



**Рис. 5.** Вид интерфейсного окна программы SidraRawView.exe приема и отображения данных в цифровом и графическом форматах



**Рис. 6.** Общий вид платы SRG-A3P-v2 модуля цифровой обработки сигналов

Следующим этапом развития модуля цифровой обработки сигналов была разработка новой оригинальной платы, названной SRG-A3P-v2, которая полностью совместима с описанной выше платой GR-XC3S 1500. Общий вид платы SRG-A3P-v2 представлен на рис. 6. Основной отличительной особенностью новой платы является



**Концепция построения всенаправленной системы  
регистрации потоков заряженных частиц...**

**Таблица 2.** Сравнительные характеристики плат модуля цифровой обработки сигналов прибора SIDRA

Плата	SRG-A3P-v2	GR-XC3S-1500
Производитель ПЛИС	Microsemi SoC Products Group (панее Actel)	Xilinx
Тип ПЛИС	ProAsic3E A3PE3000-FG484 FGPA	Spartan 3 XC3S1500 4FG456 FGPA
<b>Основные характеристики ПЛИС</b>		
Число системных защелок	3 000 000	1 500 000
Число элементарных логических ячеек	75 264	29 952
ОЗУ, Кбит	504	576
Флэш ПЗУ, бит	1 024	Нет
Максимальное число пользовательских линий ввода вывода	620	487
Максимальная тактовая частота, МГц	350	300
Напряжение питания платы, В	+5	+5
Вторичные напряжения на плате, В	+3,3; +2,5; +1,5	+3,3; +2,5; +1,2
Частоты тактовых осцилляторов, МГц	50; 25	50; 25
<b>Запоминающие устройства</b>		
ПЗУ	Flash 8 МБ	Flash 8 МБ
ОЗУ	64 МБ PC-133 совместимая	64 МБ PC-133 совместимая
Возможность расширения ОЗУ на плате	до 64МБ x 64 бит на SODIMM-144	Нет
<b>Интерфейсы</b>		
RS-232 UARTs	2	2
RS-422 UARTs	4	Нет
Ethernet	10/100 Мбит	10/100 Мбит
SpaceWire	2×LVDS	Нет
CAN bus	1 Dual	Нет
USB 2.0	Нет	1
АЦП	AD7472	Нет

Окончание табл. 2

Пользовательские линии ввода вывода		
Количество дифференциальных линий	12 (LVDS (2,5В))	12 (LVDS (2,5В))
Количество линий общего назначения	60 (LVTTTL/LVCMOS (3.3В))	60 (LVTTTL/LVCMOS (3,3В))
Линии связи с дополнительной периферией	Нет	1 порт 16 бит LVTTTL/LVCMOS (3.3В)
Максимальная частота на линии, МГц	66	66
Размеры платы, мм	100×160	100×160
Рекомендованные эмулируемые процессоры	Leon 2/3 поддерживается Leon 4	Leon 2/3 поддерживается Leon 4

использование ПЛИС типа Actel ProAsic3E A3PE3000-FG484 FPGA вместо ПЛИС Xilinx Spartan 3 XC3S1500 4FG456 FPGA. В табл. 2 представлены сравнительные характеристики двух плат цифровой обработки сигналов. Заметны преимущества платы SRG-A3P-v2 в ряде параметров. В частности, большее количество элементарных ячеек ПЛИС Actel ProAsic3E A3PE3000-FG484 позволяет использовать процессорное ядро типа ARM, а конфигурацию логической матрицы можно многократно записывать непосредственно в энергонезависимую память ПЛИС.

## **6. Определение диапазонов энергий регистрации электронов**

С помощью библиотеки программ GEANT4 [Agostinelli et al., 2003] проведено компьютерное моделирование отклика прибора на прохождение частиц через материалы детекторов. С помощью метода Монте-Карло оценены величины поглощенных энергий электронов, протонов и ядер химических элементов в каждом детекторе телескопической системы в зависимости от энергии первичной частицы [Dudnik et al., 2011]. Было обнаружено значительное влияние процессов кулоновского рассеяния электронов с энергиями, близкими к энергиям полного поглощения, на диапазоны регистрируемых энергий во всех детекторах. Поэтому верхние граничные диапазоны энергий электронов, регистрируемые каждым из детекторов телескопической системы, имеют вероятностный характер.

В табл. 3 представлены диапазоны регистрации энергий первичных электронов каждым из трёх кремниевых детекторов. Видно, что прибор будет регистрировать электроны в широком диапазоне энергий от  $E_1 \approx 50$  кэВ до  $E_2 \approx 2450$  кэВ с вероятностью верхнего предела  $P_{дз} = 8\%$ .

**Таблица 3.** Диапазоны первичных энергий электронов, регистрируемых кремниевыми детекторами телескопической системы прибора.  $E_{1D_i}$  и  $E_{2D_i}$  – нижние и верхние пределы энергий,  $i$  – номер детектора.  $P_{D_i}$  – вероятности регистрации верхнего предела энергий

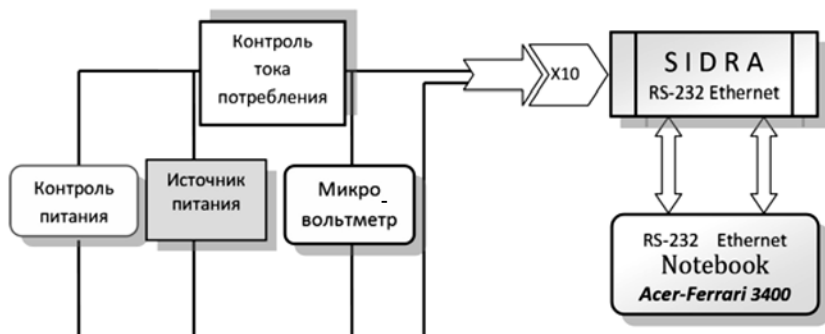
D1, Si 109 мкм			D2, Si 999 мкм			D3, Si 1500 мкм		
$E_{1D_1}$ кэВ	$E_{2D_1}$ кэВ	$P_{D_1}$ %	$E_{1D_2}$ кэВ	$E_{2D_2}$ кэВ	$P_{D_2}$ %	$E_{1D_3}$ кэВ	$E_{2D_3}$ кэВ	$P_{D_3}$ %
50	100	100	160	500	100	730	1000	100
	120	96		750	99		1180	95
	170	70		790	70		1590	70
	205	50		915	50		1700	50
	220	40		985	40		1780	40
	300	11		1185	20		2100	20
	350	3		1423	10		2450	8
	390	2	1800	4	2800	4		

Протоны, дейтроны, альфа-частицы и ядра легких элементов не испытывают такого сильного рассеяния в материале детектора, поэтому величины поглощенных энергий, отражаемые в виде амплитуд импульсов в модуле аналоговой обработки сигналов, приобретают более определенные значения.

## **7. Измерения электромагнитных помех прибора в цепи питания**

При функционировании в составе космического аппарата научная аппаратура (НА) должна быть устойчива к воздействию электромагнитных помех, создаваемых другими научными приборами и служебными системами КА, и одновременно не оказывать вредного влияния на них. Поэтому на этапе автономной отработки НА проводятся испытания на электромагнитную совместимость (ЭМС). Допустимые уровни помех задаются в технической документации на аппаратуру. На стадии разработки и изготовления макетов необходимо проведение исследовательских испытаний, подтверждающих правильность выбранных схемотехнических решений и возможность создания НА с заданными характеристиками.

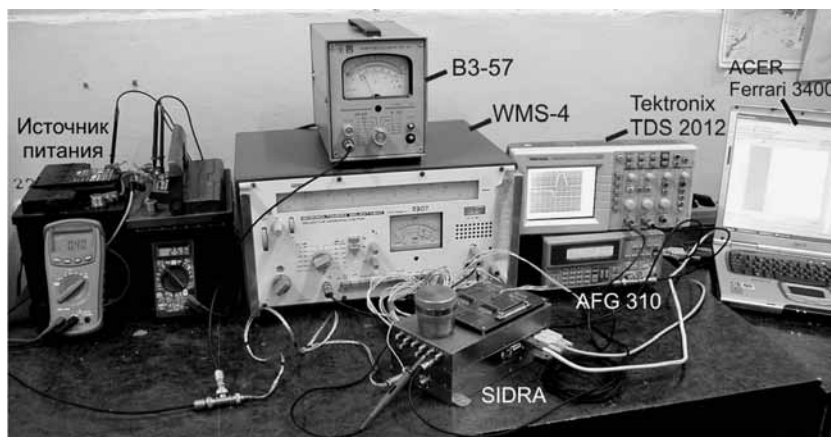
Одним из видов электромагнитных воздействий являются кондуктивные помехи по цепям питания. Величина воздействия определяется выбором элементной базы, применением конструктивных и схемных решений в виде электрических и магнитных экранов, использованием электрических фильтров и защитных заземлений и оптимальной разводки электрических цепей. Для оценки примененного нами технического решения проведены предварительные измерения уровня кондуктивных помех, которые макет прибора генерирует в цепи первичного электропитания. Чтобы устранить попадание различных типов шумов и электромагнитных наводок из промышленной сети  $U = 220$  В с частотой  $f = 50$  Гц, для



**Рис 7.** Схема электрическая подключения аппаратуры при измерении уровней кондуктивных помех, создаваемых прибором SIDRA в цепях первичного питания

питания макета прибора SIDRA были использованы две аккумуляторные батареи с суммарной разностью потенциалов  $U = 25,5$  В. На рис. 7 изображена схема измерительной установки.

Уровни шумов измерялись микровольтметром ВЗ-57 с частотным диапазоном от 5 Гц до 9 МГц и селективным микровольтметром WMS-4 польского производства, работающим в частотном диапазоне от 30 до 300 МГц. Для контроля работоспособности макета прибора, имитации прохождения частиц через детекторную систему, приема контрольным компьютером цифровых сигналов и наблюдения аналоговых сигналов использовались осциллограф Tektronix TDS 2012, генератор сигналов произвольной формы Tektronix AFG 310 и переносной персональный компьютер Acer-Ferrari 3400. С помощью микровольтметра ВЗ-57 измерения про-



**Рис 8.** Установка для измерения уровня кондуктивных помех

водились в двух поддиапазонах —  $\Delta f_1 = 5 \text{ Гц} - 50 \text{ кГц}$ , и  $\Delta f_2 = 5 \text{ Гц} - 9 \text{ МГц}$ . По результатам измерений величины эффективных кондуктивных помех  $U_{\text{эф}}$ , генерируемых прибором SIDRA в цепь первичного питания  $U = 25,5 \text{ В}$ , составили:  $U_{\text{эф}} \approx 700 \text{ мкВ}$  в первом частотном поддиапазоне и  $U_{\text{эф}} \approx 121 \text{ мкВ}$  в каждом произвольно выбранном поддиапазоне  $\Delta f_3 = 50 \text{ кГц}$  общего диапазона  $\Delta f_2$ . На рис. 8 показана установка для измерения уровня кондуктивных помех.

В табл. 4 представлены результаты измерений пиковых значений  $U_{\text{пик}}$  кондуктивных помех в высокочастотном диапазоне с использованием селективного микровольтметра WMS-4. Уровень помех, создаваемых в 4-м частотном поддиапазоне, несколько выше, чем в соседних. Однако все измеренные значения достаточно низкие в сравнении с требованиями по ЭМС, предъявлявшимися к прибору СТЭП-Ф при установке на КА «КОРОНАС-Фотон». Проведенные измерения в диапазоне частот от 5 Гц до 300 МГц показали правильность выбора элементного состава и схемы модуля вторичного питания прибора.

**Таблица 4.** Пиковые значения кондуктивных помех в высокочастотном диапазоне, создаваемых прибором SIDRA в цепях первичного питания

Номер поддиапазона	Границы диапазона, МГц	Величина помехи, мкВ
1	30...35	20
2	35...50	14
3	50...99	20
4	100...109	36
5	110...300	17

## **8. Градуировочные измерения с использованием ускоренных частиц**

Проверка работоспособности детекторов и модуля обработки аналоговых сигналов проводилась с использованием изотопных радиоактивных источников и ускоренных легких ядер, полученных на циклотроне НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова [Саркисян и др., 1979]. В экспериментах использовались выходные сигналы устройств выборки и хранения, которые анализировались с помощью спектрометрического 12-разрядного АЦП 4К-8К-САЦП-USB производства ООО «Парсек»\*.

В качестве радиоактивных источников использовались  $\beta$ -источник конверсионных электронов  $^{207}\text{Bi}$  и источник альфа-частиц  $^{226}\text{Ra}$ . Для экспериментов на циклотроне использовались ускоренные пучки протонов, дейтронов и  $\alpha$ -частиц с энергиями до 7,5 МэВ/нукл.

\* <http://www.parsek.ru>

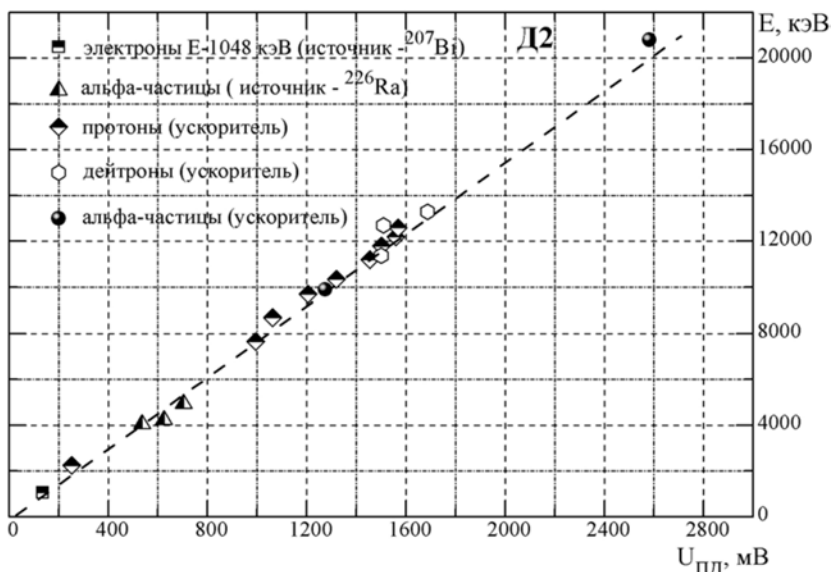
С помощью набора калиброванных алюминиевых пластин различной толщины на входе детекторов были получены пучки легких ядер в диапазоне энергий  $\Delta E = 7,8 \dots 21$  МэВ.

В канале обработки сигналов детектора полного поглощения Д2 коэффициент усиления по тестовому входу был отрегулирован на величину  $K_y = 3,8$  для расширения линейной части диапазона регистрируемых энергий частиц. Поэтому из четырех энергетических линий электронов  $\beta$ -источника  $^{207}\text{Bi}$  была использована только одна с наибольшей энергией  $E = 1048$  кэВ, сигнал от которой регистрировался в 32-м канале АЦП.

В эксперименте с  $\alpha$ -частицами расстояние между источником  $^{226}\text{Ra}$  и детектором составляло 4,02 мм; на таком расстоянии потери энергии в воздухе  $\Delta E = 543$  кэВ.

Поэтому значения исходных энергий  $E_{\alpha 1} = 4599$  кэВ,  $E_{\alpha 2} = 4782$  кэВ и  $E_{\alpha 3} = 5490$  кэВ были уменьшены на величину потерь при построении соответствующего графика.

На основе полученных энергетических спектров от частиц были найдены значения номеров каналов АЦП, соответствующих максимумам в распределениях числа частиц с разными энергиями. Был произведен перерасчет номеров каналов АЦП в амплитуды выходных сигналов пиковых детекторов  $U_{\text{пд}}$  и полученные результаты сведены на одном графике. На рис. 9 представлена зависимость энергии полного поглощения в детекторе Д2 от ам-



**Рис. 9.** Зависимость энергии полного поглощения частиц в детекторе Д2 от амплитуды на выходе пикового детектора канала обработки аналоговых сигналов

плитуды аналогового сигнала  $U_{\text{пл}}$  на выходе пикового детектора соответствующего электронного канала обработки. Видно, что все полученные экспериментальные значения от разных источников ускоренных заряженных частиц с хорошей точностью можно аппроксимировать линейной зависимостью.

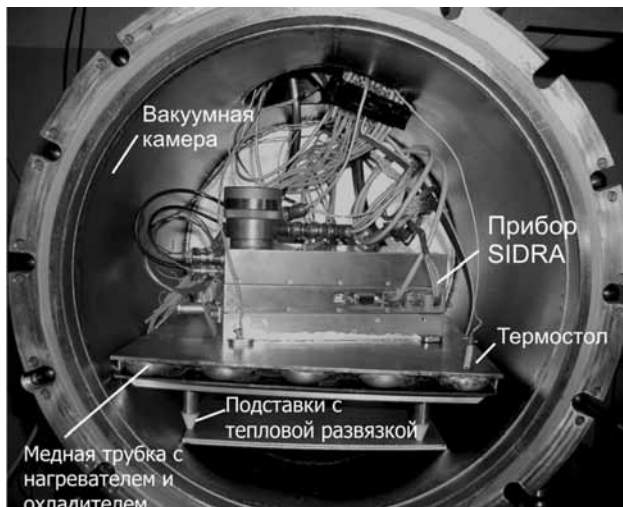
Следовательно, примененная методика может быть использована для определения чувствительности канала при выбранном коэффициенте усиления, нахождения максимального значения энергии полного поглощения после предварительного измерения динамического диапазона работы пикового детектора с помощью тестового сигнала. Кроме того, полученная зависимость является одним из источников исходных данных для создания логики обработки и программного обеспечения ПЛИС.

## 9. Тепловакуумные испытания действующего макета прибора

С целью имитации температурных режимов работы прибора и его отдельных модулей в космическом пространстве был спроектирован и изготовлен термостол в составе стационарной вакуумной установки ХНУ имени В. Н. Каразина. Термостол состоит из медной плиты, на которой установлены медная трубка змеевидной формы, предназначенная для охлаждения стола парами жидкого азота, и нагреватель из нихромовой проволоки мощностью 1 кВт, выполненный в виде спирали, размещаемой в кварцевых трубках. Медная и кварцевая трубки установлены в пазах медной плиты таким образом, чтобы теплопередача была максимальной. Выбранный способ размещения обеспечивает также равномерный нагрев по всей верхней рабочей плоскости термостола. Минимальный температурный градиент по поверхности и толщине стола реализуется благодаря очень хорошему тепловому контакту медной трубки змеевидной формы и нагревателя с плитой. Для установки и тепловой развязки термостола от корпуса вакуумной камеры в его нижней части предусмотрены четыре тепловых изолятора в виде ножек высотой ~50 мм.

Медная трубка нижней части термостола соединяется с сосудом Дьюара для хранения жидкого азота с помощью медных и стальных трубок, выведенных через гермопереходник из вакуумной камеры. Поток холодных паров поступает по наружным трубкам в змеевик, охлаждая при этом термостол до температуры ~-40 °С, а нагрев до +80 °С осуществляется с помощью нихромовой спирали, расположенной в кварцевых трубках.

Для поддержания температуры термостола в пределах  $\pm 1$  °С служит двухканальный термостат типа ТРМ-202, работающий в режиме как нагрева, так и охлаждения. Передача тепла от стола к испытываемым частям телескопа осуществляется, в основном, вследствие их теплопроводности. Контроль температур в разных точках испытываемого устройства ведется с помощью специально изготовленных и отградуированных хромель-алюмелевых термопар.



**Рис. 10.** Действующий макет прибора SIDRA в вакуумной камере при открытом боковом фланце перед проведением испытаний

Тепловакуумные испытания действующего макета прибора SIDRA проводились при давлении внутри вакуумной камеры  $P = 2 \dots 8 \cdot 10^{-5}$  торр, величина которого зависела от степени нагрева или охлаждения прибора. Вакуум обеспечивался форвакуумным насосом и магниторазрядным высоковакуумным насосом типа НОРД-250. На рис. 10 показано размещение прибора в вакуумной камере перед проведением испытаний.

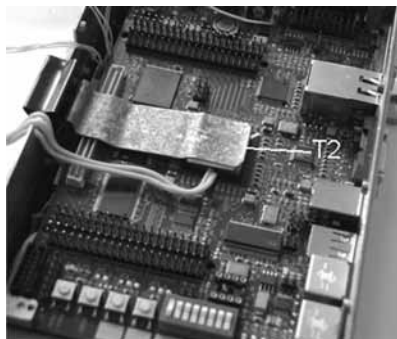
Испытания проводились в три этапа:

- 1) проверка работоспособности макета прибора при постоянной температуре термостола, поддерживаемой хладагентом; проведение этого этапа вызвано медленным нагревом термостола работающим прибором SIDRA, который являлся источником положительных температур;
- 2) проверка работоспособности макета прибора и распределение температур внутри модулей во время нагрева термостола до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- 3) проверка работоспособности макета прибора и распределение температур внутри модулей при медленном охлаждении термостола до температуры  $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### **9.1. Испытания прибора при постоянной температуре термостола**

Перед проведением испытаний в разных точках прибора были установлены термодатчики — калиброванные термопары из хромель-алюмелевых сплавов: T1 — на поверхности термостола; T2 — на поверхности ПЛИС Xilinx Spartan 3 XC3S1500 4FG456

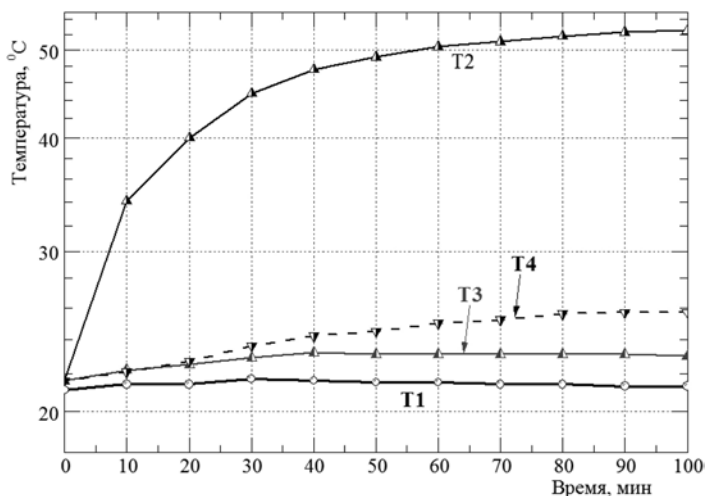




**Рис. 11.** Вариант расположения термодатчика на поверхности ПЛИС Xilinx Spartan 3 XC3S1500 4FG456 FPGA платы GR-XC3S-1500

FPGA; T3 – на поверхности цельного радиатора DC-DC конвертеров платы вторичного питания; T4 – вблизи модуля аналоговой обработки сигналов с внутренней стороны корпуса прибора. На рис. 11 показан вариант установки и прижима фигурной скобой из оцинкованного железа термодатчика на поверхности ПЛИС Xilinx Spartan 3 XC3S1500 4FG456 FPGA.

Используя водяной хладагент и варьируя скорость течения воды, на протяжении 100-минутного эксперимента при высоком уровне вакуума внутри вакуумной камеры с включенным прибором температура термостата поддерживалась постоянной и равной  $T \approx 21^\circ\text{C}$ . На рис. 12 показано распределение температур по показаниям четырех термодатчиков с течением времени. Через 90...100 мин от начала эксперимента температура на поверхности ПЛИС достигла  $\sim 53^\circ\text{C}$  и далее практически не изменялась. В то время как температура на поверхности ПЛИС в лабораторных условиях при атмосферном давлении составляла  $\sim 40^\circ\text{C}$ , в условиях вакуума, при постоянной температуре термостата и отсутствии конвекции и внешних тепловых излучателей, температура возросла на величину  $\Delta T = 13^\circ\text{C}$ .



**Рис. 12.** Распределения температур в условиях высокого вакуума при постоянной температуре термостата

## 9.2. Распределение температур при нагреве термостола

Сначала термостол был нагрет до температуры  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и поддерживался в таком состоянии в течение 140 мин. За время  $t \approx 40$  мин наступила почти полная термостабилизация (рис. 13). Уровень вакуума составил  $\sim 7 \cdot 10^{-5}$  торр и несколько ухудшился из-за оттаживания клеевых материалов печатных плат и кабельной сети. Температура на поверхности ПЛИС достигла  $\sim 66\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тонкой горизонтальной штрихпунктирной линией при  $T = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  обозначена верхняя температурная граница работоспособности ПЛИС.

Далее на 160...220-й мин эксперимента температура термостола была повышена до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура на поверхности ПЛИС достигла значения  $+72\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в то время как температура остальных частей и модулей прибора медленно приближалась к температуре термостола.

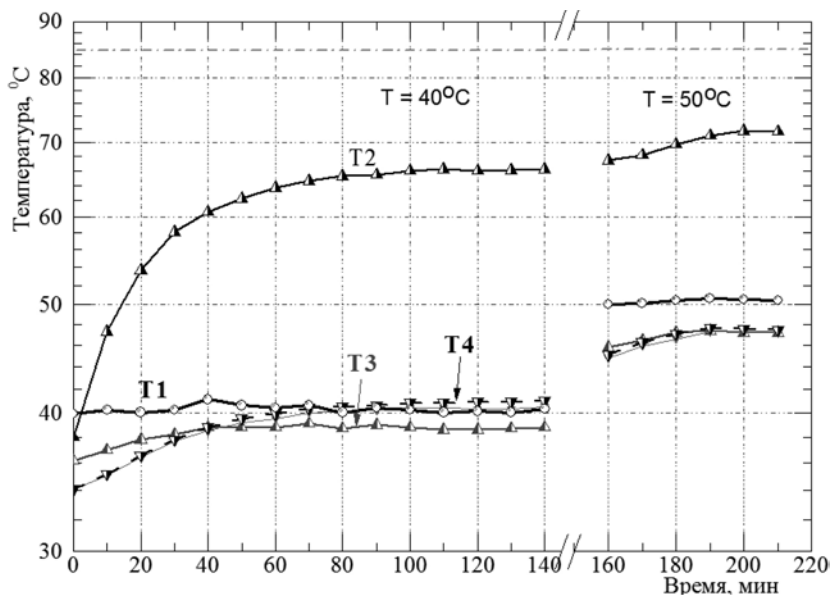
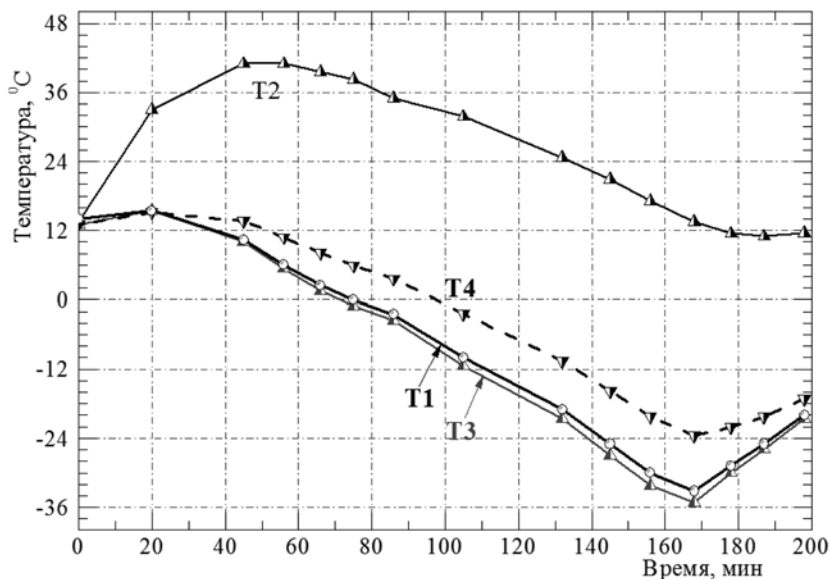


Рис. 13. Распределения температур в условиях высокого вакуума при нагреве термостола до  $+40$  и  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 9.3 Распределение температур при охлаждении термостола

На рис. 14 представлены распределения температур во время охлаждения термостола с помощью паров жидкого азота в течение 170 мин. Система охлаждения была выключена на 171-й мин, и до окончания эксперимента (200-я мин) шла теплопередача от внешних стенок вакуумной камеры к внутренним. Давление остаточной атмосферы внутри камеры варьировало от  $4,2 \cdot 10^{-5}$



**Рис. 14.** Распределения температур в условиях высокого вакуума при охлаждении термостата до  $-34^{\circ}\text{C}$

до  $1,4 \cdot 10^{-5}$  Торр при самой низкой температуре. Несмотря на непрерывное снижение температуры термостата и всех плат в течение первых 60 мин, температура на поверхности ПЛИС повышалась и достигла  $T=42^{\circ}\text{C}$  на 50...60-й мин. При достижении практически всеми модулями прибора отрицательных температур  $T=-34^{\circ}\text{C}$  температура на поверхности ПЛИС была все еще положительной и составляла  $T=12^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, работающий макет прибора SIDRA продемонстрировал свою работоспособность в условиях высокого вакуума при охлаждении температуры термостата до  $-34^{\circ}\text{C}$  и при его нагреве до  $+50^{\circ}\text{C}$ . В то же время была подтверждена правильность установки теплоотводящего радиатора на поверхности DC-DC-конвертеров платы вторичного питания, и проявилась необходимость установки подобного радиатора на поверхности ПЛИС.

## 10. Режимы работы прибора

Как уже указывалось выше, дистанционное программное управление коэффициентами усиления  $K_y$  в каналах модуля аналоговой обработки сигналов дает возможность выбирать типы регистрируемых заряженных частиц в процессе эксплуатации прибора. Настройка на определенные группы частиц происходит путем выбора чувствительности ЗЧПУ, т.е. емкости обратной связи ЗЧПУ, и значения  $K_y$  масштабирующего усилителя в каждом из каналов.

**Таблица 5** Последовательные режимы регистрации прибором SIDRA разных групп сортов заряженных частиц высоких энергий

№ п/п	Режим 1		Режим 2		Режим 3	
	типы измеряемых частиц	энергетический диапазон, МэВ	типы измеряемых частиц	энергетический диапазон, МэВ	типы измеряемых частиц	энергетический диапазон, МэВ
1	Электроны $e$	0,05...2,3	Альфа-частицы $\alpha$	5,0...52 (1,3...13 МэВ/нукл)	Ядра углерода $C$	23...480 (1,9...40 МэВ/нукл)
2	Протоны $p$	1,2...14	Ядра лития $Li$	10...175 (1,4...25 МэВ/нукл)	Ядра азота $N$	29...605 (2,1...43 МэВ/нукл)
3	Дейтроны $d$	1,6...18 (0,8...9 МэВ/нукл)	Ядра бериллия $Be$	13,5...279 (1,5...31 МэВ/нукл)	Ядра кислорода $O$	35...720 (2,2...45 МэВ/нукл)
4	Ядра, тяжелее дейтронов	$\geq 18$	Ядра бора $B$	18,7...396 (1,7...36 МэВ/нукл)	Ядра, тяжелее группы $CNO$	$\geq 720$

В процессе эксплуатации прибора емкости обратной связи для каждого из трёх ЗЧПУ остаются неизменными, в то время как величины  $K_y$  настраиваются независимо друг от друга в произвольном выбранный момент путем подачи телекоманды. В связи с этим возможны различные варианты регистрации разных групп частиц.

Легкие частицы, дающие наименьшие сигналы в детекторах, регистрируются при максимальных величинах  $K_y$ . Мониторинг более тяжелых ядер, образующих в материалах детекторов гораздо большее количество вторичных зарядов, требует уменьшения величин  $K_y$ . При этом регистрация легких частиц остается возможной, но в более узком диапазоне энергий при неизменных уровнях нижних порогов дискриминации шумовых сигналов.

В табл. 5 представлен вариант организации последовательных режимов регистрации трёх групп частиц высоких энергий с разными сортами ядер в каждой из групп. Измерения ядер тяжелее кислорода требуют значительного подавления величины  $K_y$  и одновременного увеличения активной площади детекторов, поскольку распространенность элементов в космическом пространстве заметно падает с увеличением количества нуклонов.

## **Заключение**

Разработана концепция построения системы всенаправленной регистрации потоков заряженных частиц. Изготовлен действующий лабораторный макет компактного одноблочного прибора SIDRA для мониторинга заряженных частиц высоких энергий

в космических условиях. Моделирование прохождений одиночных частиц разных сортов через телескопическую систему, а также лабораторные измерения с использованием радиоактивных изотопов и пучков ускоренных ядерных частиц показали возможность мониторинга электронов, протонов и ядер легких элементов в широком диапазоне энергий и темпов счета. Универсальность разработанного модуля аналоговой обработки сигналов позволяет использовать его для мониторинга потоков электронов и протонов и одновременно для регистрации ядер легких и средних элементов с помощью дополнительных детекторных модулей на внешней обшивке космического аппарата. Использование разработанной фирмами Aeroflex Gaisler и Pender electronic design GmbH платы GR-XC3S-1500 в стандарте EuroCard с ПЛИС Xilinx Spartan III и эмулированным процессором LEON 2 в качестве прототипа модуля цифровой обработки информации позволило отработать лабораторный макет одноблочного компактного прибора с небольшими габаритными размерами и энергопотреблением. Тепловакуумные испытания показали работоспособность макета прибора в диапазоне температур от  $-30$  до  $+50$  °С.

Авторы благодарны заведующему лабораторией ускорительных установок НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова А. В. Спасскому и старшему научному сотруднику ХНУ имени В. Н. Каразина В. Н. Дубине за активную помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке Научно-технологического центра в Украине, грант № 3542, при поддержке Университета г. Алкала, грант № CCG08-UAN/ESP-3991, и Министерства науки и инноваций Испании, грант № ESP2005-07290-C02-02.

## Литература

- [Дудник и др., 2011] Дудник А. В., Подгурски П., Сильвестер Я. и др. Исследования электронных поясов в земной магнитосфере с помощью рентгеновского спектрофотометра SphinX и спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф: предварительные результаты // *Космічна наука і технологія*. 2011. Т.17. № 4. С. 14–25.
- [Дудник и др., 2012] Дудник А. В., Подгурски П., Сильвестер Я. и др. Рентгеновский спектрофотометр SphinX и спектрометр частиц СТЭП-Ф спутникового эксперимента КОРОНАС-Фотон – предварительные результаты совместного анализа данных // *Астрономический вестник*. 2012. Т. 46. № 2. С. 173–183.
- [Саркисян и др., 1979] Саркисян Л. А., Кирьянов Е. Ф., Воробьев Ю. А. Модернизация стовдцатисантиметрового циклотрона // *Приборы и техника эксперимента*. 1979. № 1. С. 19–21.
- [Юров и др., 2011] Юров В. Н., Котов Ю. Д., Глянченко А. С. и др. Научная аппаратура “Солнечный монитор” для исследования радиационного состояния околоземного космического пространства // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2011. Т. 2. № 4. С.314–319.
- [Agostinelli et al., 2003] Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. Geant4-a simulation toolkit // *Nucl. Instrum. Meth. A*. 2003. V. 506. Iss. 3. P. 250–303.

- [Dotsenko et al., 2009] *Dotsenko O. V., Dudnik O. V., Meziat D., Prieto M.* Concept of application of the SIDRA instrument to ensure safe operation of a satellite // 9<sup>th</sup> Ukrainian Conference on space research. Abstracts, 2009. P. 76.
- [Dudnik et al., 2009a] *Dudnik O. V., Meziat D., Prieto M.* The concept of compact on-board instrument for measurements of particle fluxes and dose rates // Scientific Session MEPhI-2009, Abstracts. 2009. V. 2. P. 151. (in Russian).
- [Dudnik et al., 2009b] *Dudnik O. V., Bilogub V. V., Kurbatov E. V. et al.* Compact on-board instrument SIDRA for measurement of particle fluxes and dose rates — concept and first model // 9<sup>th</sup> Ukrainian Conference on space research. Abstracts, 2009. P. 78.
- [Dudnik et al., 2011] *Dudnik O. V., Prieto M., Kurbatov E. V. et al.* First concept of compact instrument SIDRA for measurements of particle fluxes in the space // J. Kharkiv University, phys. series “Nuclei, Particles, Fields”. 2011. V. 969. Iss. 3(51). P. 62–66.
- [Prieto et al., 2009] *Prieto M., Guzman D., Garcia J. I. et al.* Control Unit of the SIDRA Scientific Instrument // Proc. of 9<sup>th</sup> Conference “Jornadas de Computacion Reconfigurable y Aplicaciones”, Alcala de Henares, Spain, 2009. P. 475–484.
- [Renker, 2006] *Renker D.* Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems // Nucl. Instrum. Meth. A. 2006. V. 567, Iss. 1. P. 48–56.
- [Vacheret et al., 2011] *Vacheret A., Barker G. J., Dziwiecki M. et al.* Characterization and simulation of the response of Multi-Pixel Photon Counters to low light levels // Nucl. Instrum. Meth. A. 2011. V. 656. Iss. 1. P. 69–83.
- [Violet, Frederickson, 1993] *Violet M. D., Frederickson A. R.* Spacecraft anomalies on the CRRES satellite correlated with the environment and insulator samples // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1993. V. 40. N. 6. P. 1512–1519.

## **CONCEPT OF THE OMNIDIRECTIONAL SYSTEM FOR THE REGISTRATION OF CHARGE PARTICLE FLUXES AT THE SMALL SPACECRAFT**

**O. V. Dudnik<sup>1</sup>, V. Prieto<sup>2</sup>, E. V. Kurbatov<sup>1</sup>, S. Sanchez<sup>2</sup>,  
T. G. Timakova<sup>1</sup>, K. G. Titov<sup>1</sup>, P. Parra<sup>2</sup>, A. M. Avilov<sup>1</sup>,  
Yu. D. Kotov<sup>3</sup>, V. N. Yurov<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup> V. N. Karazin Kharkiv National University (KhNU), Kharkiv,  
Ukraine**

**<sup>2</sup> Space Research Group (SRG), University of Alcala, Alcala  
de Henares, Spain**

**<sup>3</sup> Institute of Astrophysics, National Research Nuclear University  
“MEPhI”**

In this work we introduce the concept of construction of the omnidirectional monitoring of high energy charged particles on the basis of several small on-board devices. It is described a block diagram of the system, work principles, first results of laboratory tests of an individual

modules of unified compact device SIDRA. The necessity of development of the spectrometer and a list of actual tasks to be solved by a system of standardized instruments is substantiated. The results of computer simulations as well as of measurements of main characteristics of electronic modules, and tests of laboratory model are discussed. Different work modes of the apparatus are described.

**Keywords:** charge particles, silicon detector, spacecraft, electronic modules, particle accelerator, FPGA, scintillator, tests software.

---

**Dudnik Oleksiy Volodymyrovich** – head of space research sector, PhD,  
Oleksiy.V.Dudnik@univer.kharkov.ua

**Prieto Manuel Mateo** – associate professor, PhD, mpm@aut.uah.es

**Kurbatov Evgen Volodymyrovich** – engineer, Eugen.V.Kurbatov@univer.kharkov.ua

**Sanchez Sebastian Prieto** – associate professor, PhD, sebastian.sanchez@uah.es

**Timakova Taisa Gavrilovna** – leading engineer, Taisa.G.Timakova@univer.kharkov.ua

**Titov Kirill Germanovich** – student, titov-kirill@yandex.ru

**Parra Pablo Espada** – assistant lecturer, pablo.parra@uah.es

**Avilov Alexandr Maximovich** – senior researcher.

**Kotov Yury Dmitrievich** — professor, PhD, kotov@mephi.ru.

**Yurov Vitaly Nikolaevich** — deputy director, PhD, VNYurov@mephi.ru

## РЕНТГЕНОВСКИЙ И ГАММА-СПЕКТРОМЕТР ГРИС

**Ю. Д. Котов<sup>1</sup>, В. Н. Юров<sup>1</sup>, А. С. Гляненко<sup>1</sup>, А. В. Кочемасов<sup>1</sup>,  
Е. Э. Лупарь<sup>1</sup>, Ю. А. Трофимов<sup>1</sup>, И. В. Рубцов<sup>1</sup>, Е. А. Жучкова<sup>1</sup>,  
В. Г. Тышкевич<sup>1</sup>, Е. М. Орешников<sup>1</sup>, А. В. Туманов<sup>1</sup>,  
В. И. Лягушин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»» (НИЯУ МИФИ) Министерства образования и науки РФ, Институт астрофизики (ИАФ), Москва**

<sup>2</sup> **ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева», Королев, Московская обл.**

Описан планируемый эксперимент по исследованию рентгеновского и гамма-излучения и нейтронов солнечных вспышек. Излучение будет регистрироваться сцинтилляционными спектрометрами на основе кристаллов  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и  $\text{CsI}(\text{Tl})$  в диапазонах энергии 0,05...15 МэВ и 0,3...200 МэВ соответственно. Спектрометр  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  будет с высокой эффективностью регистрировать линейчатое излучение и обеспечивать идентификацию линий. Спектрометр  $\text{CsI}(\text{Tl})$  предназначен для регистрации высокоэнергичного излучения и выделения нейтронов по форме сцинтилляционного сигнала. Приведены описания научной аппаратуры

---

**Котов Юрий Дмитриевич** – директор ИАФ НИЯУ МИФИ, кандидат физико-математических наук, kotov@mephi.ru.

**Юров Виталий Николаевич** — заместитель директора ИАФ НИЯУ МИФИ, кандидат физико-математических наук, VNYurov@mephi.ru.

**Гляненко Александр Степанович** – заведующий НИС ИАФ НИЯУ МИФИ, кандидат физико-математических наук, asgl2005@rambler.ru.

**Кочемасов Алексей Викторович** – инженер 2-й категории ИАФ НИЯУ МИФИ, AVKochemasov@mephi.ru

**Лупарь Евгений Эдуардович** — инженер 2-й категории ИАФ НИЯУ МИФИ, EELupar@mephi.ru.

**Трофимов Юрий Алексеевич** — инженер ИАФ НИЯУ МИФИ, YuTrofimov@gmail.com.

**Рубцов Игорь Васильевич** — ведущий инженер ИАФ НИЯУ МИФИ, rubsov2002@mail.ru.

**Жучкова Евгения Анатольевна** — инженер ИАФ НИЯУ МИФИ, jan-k@mail.ru

**Тышкевич Владимир Георгиевич** – доцент НИЯУ МИФИ, vlad@dozen.mephi.ru.

**Орешников Евгений Михайлович** — инженер ИАФ НИЯУ МИФИ, EMOreshnikov@mephi.ru.

**Туманов Андрей Викторович** — инженер ИАФ НИЯУ МИФИ, Tumanov.Andre@gmail.com.

**Лягушин Владимир Иванович** — ведущий научный сотрудник РКК «Энергия» имени С. П. Королева, кандидат физико-математических наук, Lyagushinvi@mail.ru.



ГРИС, условия проведения эксперимента и результаты расчёта характеристик его детектора.

**Ключевые слова:** эксперимент ГРИС-ФКИ-1 на Международной космической станции, нейтроны, рентгеновское и гамма-излучение, солнечные вспышки, кристаллические спектрометры, характеристики аппаратуры.

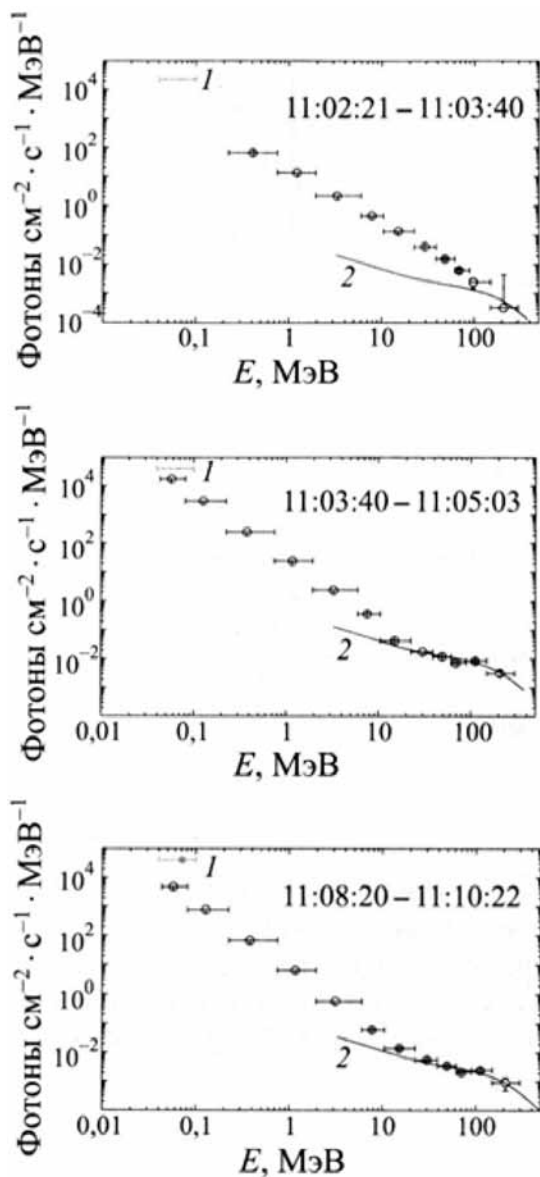
### Введение

Сильное воздействие на гелиосферу оказывают нестационарные процессы на Солнце, обусловленные его активностью. Особенно это касается вспышечных ударных волн, корональных выбросов массы в солнечном ветре и излучений солнечных вспышек. Все эти факторы эффективно воздействуют на магнитосферу Земли, а также на атмосферу и биосферу.

Излучения солнечных вспышек представляют собой:

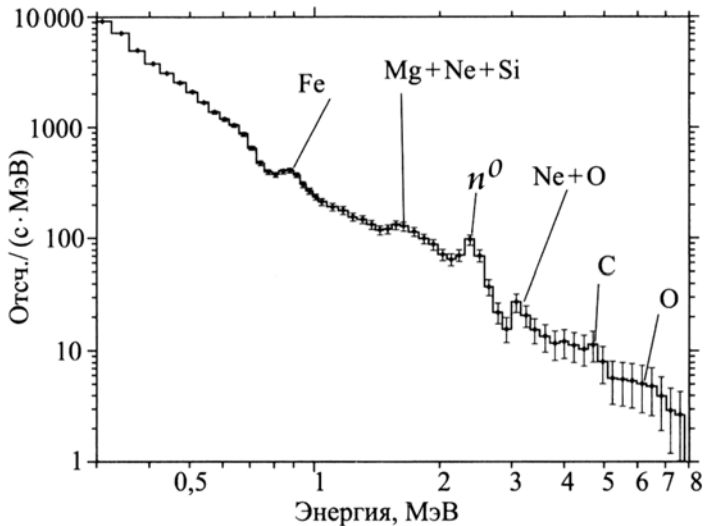
- электромагнитное излучение в диапазоне от радиоволн до жёсткого гамма-излучения;
- ускоренные во вспышечном процессе и вышедшие в межпланетное пространство протоны, ядра химических элементов и электроны;
- рождённые в ядерных реакциях в атмосфере Солнца во время мощных вспышек и вышедшие из неё нейтроны.

Для исследования процесса ускорения частиц и, следовательно, первичного энерговыделения очень важны характеристики производимого частицами жёсткого рентгеновского излучения, гамма-излучения, а также нейтронного излучения. В частности, на основании изучения временного поведения жёсткого рентгеновского и гамма-излучения была определена длительность актов ускорения. Было установлено, что частицы ускоряются цугами импульсов с длительностью 1...4 с. Внутри цуга проявляются отдельные короткие импульсы, длящиеся десятки микросекунд. Измерения энергичного нейтрального излучения солнечных вспышек в 23-м цикле солнечной активности проводились только на космических аппаратах RHESSY [Lin et al, 2002] и «КОРОНАС-Ф» [Кузнецов, 2009а]. Аппаратура на космическом аппарате RHESSY регистрировала направление прихода и энергетические спектры излучения до энергий ~2...3 МэВ, вследствие резкого уменьшения светосилы с ростом энергии и плохих фоновых условий. Приборы АВС-Ф и СОНГ на аппарате «КОРОНАС-Ф» регистрировали излучение в диапазоне от десятков килоэлектронвольт до сотен мегаэлектронвольт. Регистрация излучения осуществлялась одним и тем же блоком детекторов СОНГ-Д. Аппаратура АВС-Ф осуществляла амплитудно-временной анализ сигналов в диапазоне 0,1...80 МэВ. Прибор СОНГ регистрировал рентгеновское и гамма-излучение в диапазоне 30 кэВ – 200 МэВ и потоки нейтронов с энергией более 20 МэВ. Гамма-излучение с энергией более 17 МэВ наблюдалось в девяти событиях [Котов и др., 2009], а с



**Рис. 1.** Динамика спектра гамма-излучения во вспышке 28 октября 2003 г. по измерениям прибора СОНГ. Точка 1 – поток жёсткого рентгеновского излучения, измеренный прибором СПР-Н [Житник и др., 2006]. Линия 2 — спектр гамма-излучения, обусловленного распадом нейтральных и заряженных пионов

энергией более 60 МэВ было зарегистрировано в четырёх событиях [Кузнецов, 2009б]. В трёх событиях были зарегистрированы потоки нейтронов [Кузнецов, 2009б]. Эти измерения составляют значительную часть всех имеющихся к настоящему времени данных. На рис. 1 и 2 представлены измеренные спектры излучения для вспышек класса X10 28 октября 2003 г. и класса X17,2 29 октября 2003 г. Следует отметить, что высокоэнергичное излучение регистрировалось в подавляющем большинстве случаев во вспышках класса не ниже М3.



**Рис. 2.** Суммарный энергетический спектр солнечной вспышки 29 октября 2003 г. (с вычетом фона) во временном интервале 20:39:07–20:55:00 UT по данным аппаратуры ABC-Ф

Измерения гамма-излучения и потоков нейтронов в настоящее время единичны и поэтому для обнаружения и анализа характерных свойств их временного поведения и спектров, а также сопоставления с излучением в других энергетических диапазонах необходимо проведение новых экспериментов длительностью несколько лет с чувствительной аппаратурой, обеспечивающей высокое энергетическое и временное разрешение.

Задачами эксперимента ГРИС-ФКИ-1 на Российской космической станции (РС МКС) являются:

- измерение потоков и энергетических спектров гамма- и жёсткого рентгеновского излучения и регистрация нейтронов солнечных вспышек;
- измерения энергетических и временных характеристик фонового излучения;

- отработка методики измерений и основных узлов аппаратуры для проведения исследований на специализированных автоматических космических аппаратах.

### **Особенности проведения эксперимента на РС МКС**

Проведение экспериментов на МКС имеет как ряд преимуществ, так и недостатки по сравнению с исследованиями на автоматических космических аппаратах.

Преимущества заключаются в следующем:

- Орбита МКС проходит под радиационными поясами Земли (РПЗ) и поэтому она значительно менее подвержена воздействию как частиц солнечных и галактических космических лучей, так и частиц РПЗ. Периодическая коррекция орбиты позволяет проводить длительные эксперименты.
- При проведении эксперимента возможно привлечение к участию экипажа МКС для установки аппаратуры и частичной замены блоков при необходимости. Возможна также доставка с Земли на МКС транспортным грузовым кораблём сменных и запасных блоков и возвращение на Землю сменных электронных носителей информации.
- Габаритно-массовые и энергетические ресурсы, выделяемые научной аппаратуре, существенно превосходят возможности разрабатываемых платформ малых космических аппаратов.
- Принципиальная возможность непрерывной передачи на наземные пункты приёма научной информации и оперативного управления работой научной аппаратуры.

К недостаткам можно отнести:

- Необходимость корректировки программы наблюдений в соответствии с общей программой научных экспериментов на станции и графиками работы экипажа.
- Невозможность выполнения экспериментов, требующих прецизионного наведения на астрофизические объекты и длительных непрерывных наблюдений.

Научная аппаратура на РС МКС может устанавливаться как внутри модулей станции, так и вне их на специальных конструктивах. Для блоков, устанавливаемых внутри модулей, обеспечиваются практически лабораторные условия измерений в части температурных режимов и радиационных дозовых нагрузок. Установка приборов и их стыковка со служебными системами МКС не требует работы экипажа в открытом космическом пространстве, что существенно упрощает и облегчает выполнение всех монтажных операций. Недостатком такой установки, для некоторых экспериментов неприемлемым, является необходимость проведения измерения через оболочку модуля значительной толщины (до 6 мм Al) и более существенные ограничения на размеры аппаратуры, чем при внешней установке.

Устанавливаемые снаружи блоки научной аппаратуры термоизолируются от корпуса станции для снижения взаимовлияния

на режимы работы. Тепловые режимы их работы обеспечивают пассивными и активными средствами терморегулирования, которые позволяют поддерживать температуру приборов в допустимом диапазоне. При наружной установке ужесточаются требования к радиационной стойкости материалов и применяемых радиодеталей. Все элементы и покрытия должны быть устойчивы к воздействию космического вакуума. Преимуществом наружной установки является отсутствие экранирования аппаратуры от объекта измерений корпусом станции и возможность её оптимальной ориентации.

До настоящего времени существуют большие проблемы с передачей значительных объёмов научных данных с РС МКС на наземные пункты приёма. Пропускная способность существующего радиоканала позволяет передавать до 10 МБ в сутки, что не удовлетворяет потребностям многих космических экспериментов. Поэтому полные массивы данных записывались на съёмные электронные носители информации. Использованные накопители возвращались на Землю на спускаемых аппаратах вместе со съёмным экипажем, а новые доставлялись на МКС транспортным кораблём. И только малая часть данных регулярно передавалась по радиоканалу на наземные пункты приёма. В настоящее время практически создан высокоскоростной канал передачи данных с МКС с использованием спутников-ретрансляторов «Луч-5А» (запущен 11 декабря 2011 г.) и «Луч-5Б» (запущен 3 ноября 2012 г.)

Управление аппаратурой и корректировка режимов функционирования осуществляется с помощью командно-программных информационных посылок из бортового комплекса управления (БКУ). Для подачи питания на научную аппаратуру (НА) и переключения основных и резервных систем при нештатных ситуациях используются выдаваемые БКУ импульсные разовые команды. Интерфейсы НА с БКУ используют стандартные каналы обмена и передачи данных Ethernet и RS-432.

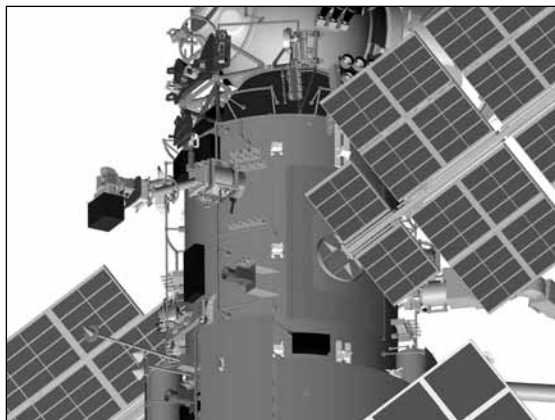
### **Условия проведения эксперимента ГРИС-ФКИ-1 и характеристики НА ГРИС**

Научная аппаратура ГРИС предназначена для регистрации рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне от 50 кэВ до 200 МэВ. Так как толщина оболочки модуля РС МКС составляет в среднем  $1,65 \text{ г/см}^2 \text{ Al}$ , то поглощение в ней излучения с энергией 50 кэВ будет составлять около 45 %. По этой причине, а также для обеспечения возможности оптимальной ориентации детекторов при наблюдении Солнца было принято решение разместить блок детекторов НА ГРИС вне модуля, а блок электроники – внутри модуля.

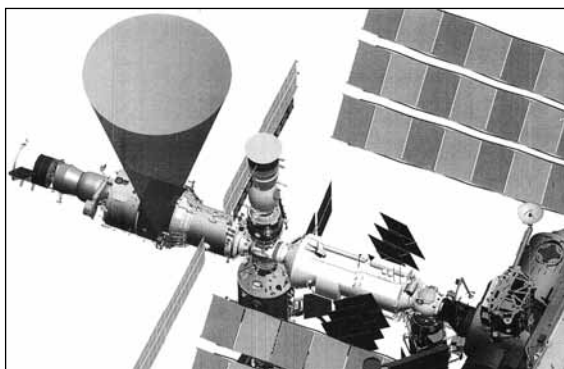
Для определения лучших условий установки специалистами РКК «Энергия» им. С.П. Королева было проведено моделирование времени нахождения Солнца в поле зрения блока детекторов (ГРИС-БД) НА ГРИС при орбитальной ориентации МКС на годовой интервал полёта (12 месяцев, 5698 витков) для двух вариантов

установки ГРИС-БД на служебном модуле «Звезда»: стационарно и на поворотной платформе. Дополнительным условием было отсутствие в поле зрения ГРИС-БД элементов конструкции МКС при проведении наблюдений. Для расчётов использовалась проектная орбита МКС на интервале полёта 01.06.2011 г. – 31.05.2012 г. На рис. 3 и 4 показано размещение блока детекторов НА ГРИС на платформе и его поле зрения. Получены следующие результаты моделирования.

- При фиксированной установке время нахождения Солнца в поле зрения ГРИС-БД  $30^\circ$  составляет около 1,5 % полётного времени, что делает проведение эксперимента нецелесообразным.



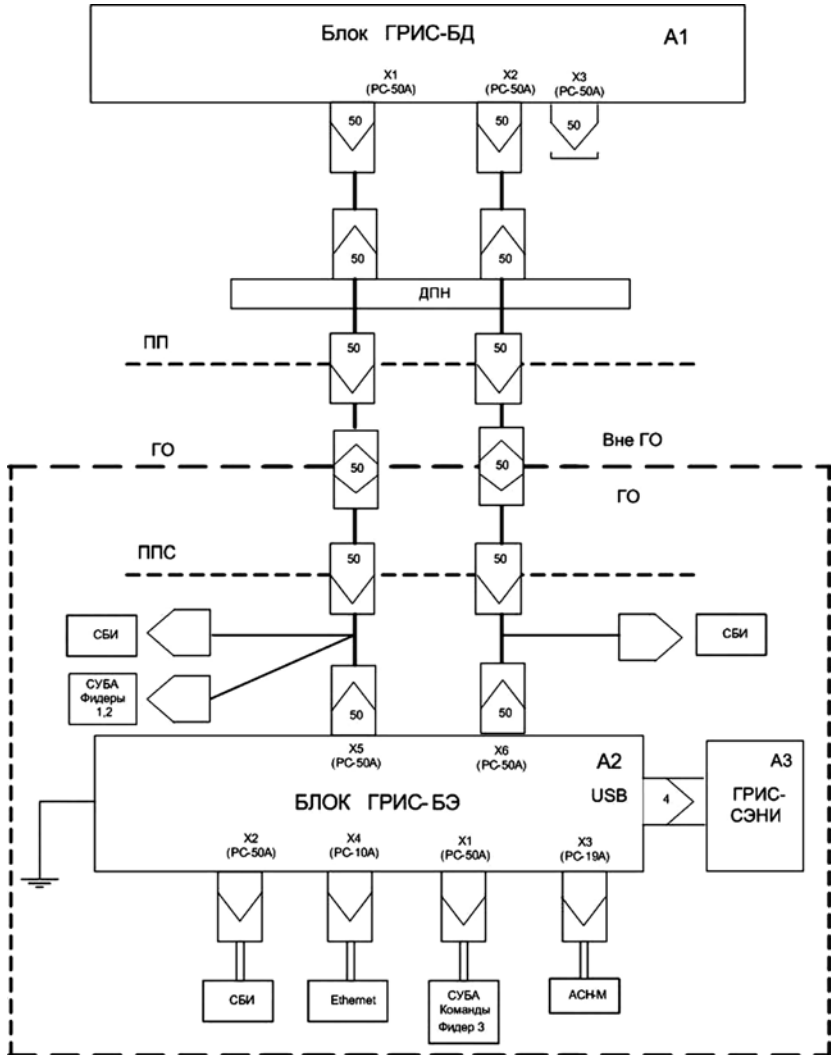
**Рис. 3.** Размещение блока детекторов на поворотной платформе



**Рис. 4.** Поле зрения блока детекторов

- При установке на поворотной платформе время нахождения Солнца в поле зрения ГРИС-БД  $30^\circ$  составляет от 36 до 52 % по-

лётного времени. Верхнее значение, равное 52 %, получено путём исключения из рассмотрения витков, на которых угол Солнце–плоскость орбиты превышает  $45^\circ$ , так как на таких витках в поле зрения НА гарантированно попадают элементы конструкции МКС в течение практически всего витка. Нижнее значение,



**Рис. 5.** Общая схема НА ГРИС; АСНМ — аппаратура спутниковой навигации, ГО — гермоотсек, ДПН — двухслойная платформа наведения, ПП — переходная плата, СБИ — система бортовых измерений, СУБА — система управления бортовой аппаратурой

равное 36 %, получено путём исключения из рассмотрения витков, на которых угол Солнце – плоскость орбиты превышает  $15^\circ$  и на оставшихся учтённых витках в поле зрения НА элементы конструкции МКС практически не попадают. Так как орбита МКС не проходит через зоны радиационных поясов, где наблюдения солнечного излучения затруднены из-за высокого уровня фона, то практически всё время нахождения Солнца в поле зрения прибора может быть использовано для проведения измерений. Следовательно, условия проведения измерений на МКС сравнимы с условиями на низкоорбитальных околоземных космических аппаратах.

Была выбрана схема построения аппаратуры, показанная на рис. 5. Научная аппаратура ГРИС состоит из блока детекторов ГРИС-БД, устанавливаемого снаружи, и блока электроники ГРИС-БЭ с накопителем информации ГРИС-СЭНИ, устанавливаемого внутри служебного модуля «Звезда» РС МКС. Вариант конструкции ГРИС-БД представлен на рис. 6.

В блоке ГРИС-БД размещаются сцинтилляционный спектрометр на кристалле CsI(Tl) диаметром 100 мм и высотой 150 мм для регистрации гамма-излучения и нейтронов и сцинтилляционный спектрометр на кристалле LaBr<sub>3</sub>(Ce) диаметром 76 мм и высотой 76 мм для регистрации жёсткого рентгеновского излучения и гамма-линий.

Выделение взаимодействий нейтронов в кристалле CsI(Tl) производится по форме светового сигнала. Для исключения из регистрации фона заряженных частиц используется защитный полистирольный сцинтилляционный детектор. В электронных узлах ГРИС-БД осуществляется амплитудно-временной анализ событий, накопление энергетических спектров и данных об интенсив-

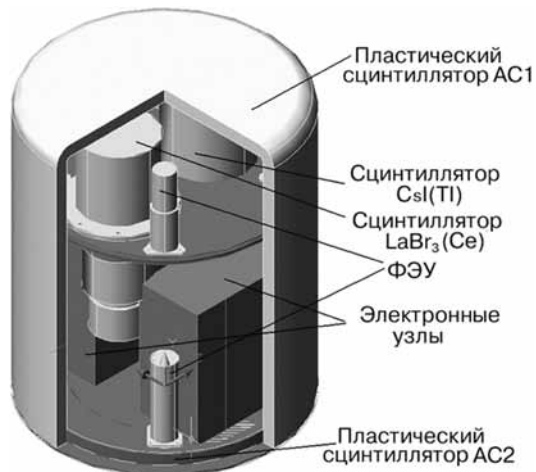


Рис. 6. Конструкция ГРИС-БД



ностях, а также сбор контрольно-служебных параметров, формирование массивов экспериментальных данных и передача их в блок ГРИС-БЭ.

В блоке ГРИС-БЭ выполняются предварительная обработка и сжатие данных, запись полного объема данных на ГРИС-СЭНИ и передача цифровых массивов объемом до 200 МБ в сутки в информационно-управляющий сегмент системы управления бортовой аппаратурой и показаний телеметрических датчиков в систему бортовых измерений. В функции блока входит также получение электропитания, дискретных команд, цифровых командных массивов и кода бортового времени от служебных систем МКС.

**Таблица 1.** Характеристики НА ГРИС

<b>Физические характеристики</b>	
Измеряемый энергетический спектр рентгеновского излучения в диапазоне энергий, кэВ	от 50 до 300
Измеряемый энергетический спектр гамма-излучения в диапазоне энергий, МэВ	от 0,3 до 200
Пороговая энергия регистрации солнечных нейтронов, МэВ	20
Скорость счёта регистрируемых нейтронов, отсчёт/с	до $5 \cdot 10^4$
Скорость счёта фотонов в диапазоне от 0,05 до 10 МэВ, отсчёт/с	до $1 \cdot 10^6$
Скорость счёта фотонов в диапазоне от 10 до 200 МэВ, отсчёт/с	до $5 \cdot 10^4$
Временное разрешение, мс	100
<b>Технические характеристики</b>	
Блок детекторов ГРИС-БД: • масса, кг • габаритные размеры, мм • потребляемая мощность с автоматической системой обеспечения теплового режима, Вт	20,0 360×340×460 (высота) 22,0
Блок электроники ГРИС-БЭ: • масса, кг • габаритные размеры, мм • потребляемая мощность, Вт	7,0 300×300×150 (высота) 20,0
Сменный электронный носитель информации ГРИС-СЭНИ: • масса, кг • габаритные размеры, мм • объём собственной памяти, ГБ	до 0,1 до 80×80×150 64
Объём среднесуточной получаемой информации, МБ	до 200

Научная аппаратура ГРИС будет измерять спектры электромагнитного излучения в диапазоне от 50 кэВ до 100 МэВ с временным разрешением до 100 мс и регистрировать нейтроны с энергией более 20 МэВ. Масса и потребляемая мощность НА не более 27,5 кг и 42 Вт, соответственно.

Технико-физические характеристики НА ГРИС представлены в табл. 1.

### Расчёты и измеренные характеристики НА ГРИС

Наиболее важными характеристиками спектрометрических детекторов являются светосила, энергетическое и временное разрешение. На исследование и оптимизацию этих характеристик было обращено первоочередное внимание при проведении численного моделирования и измерений. В результате численного моделирования были получены значения полной эффективности регистрации и доля пика полного поглощения в зависимости от энергии фотонов для кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  с размерами 76 мм (диаметр) и 76 мм (высота), приведенные на рис. 7.

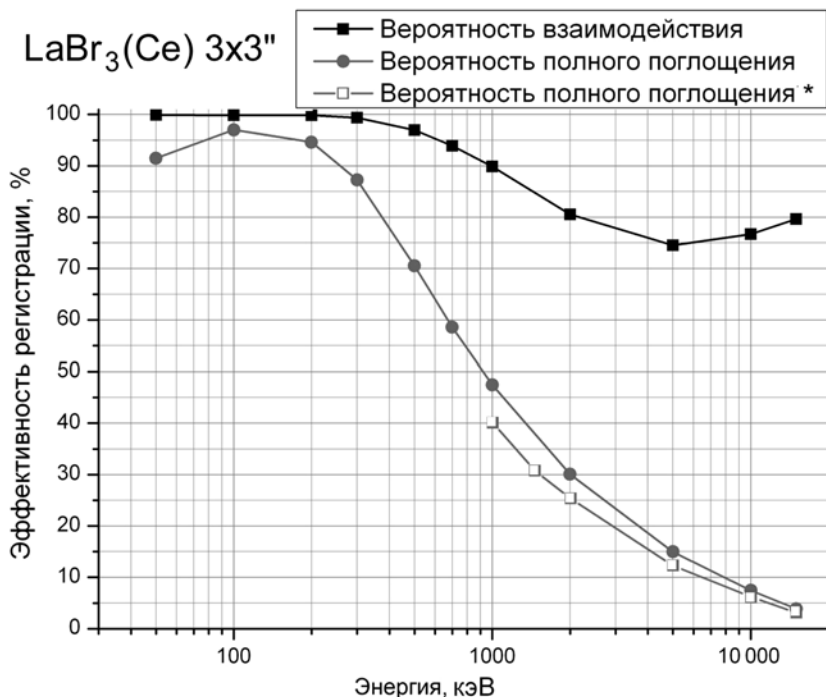


Рис. 7. Эффективность регистрации (\* по данным [Nicolini et al., 2007])

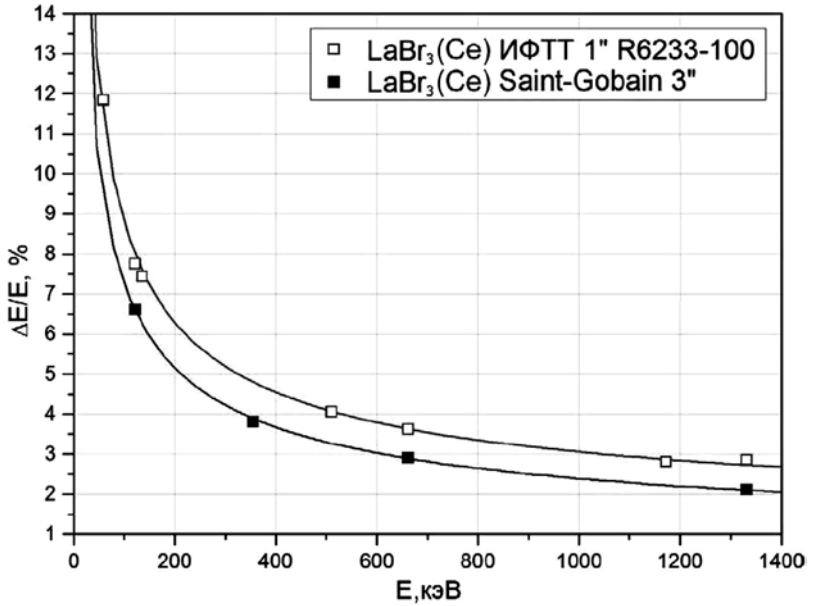


Рис. 8. Результаты измерений с отечественным детектором  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$

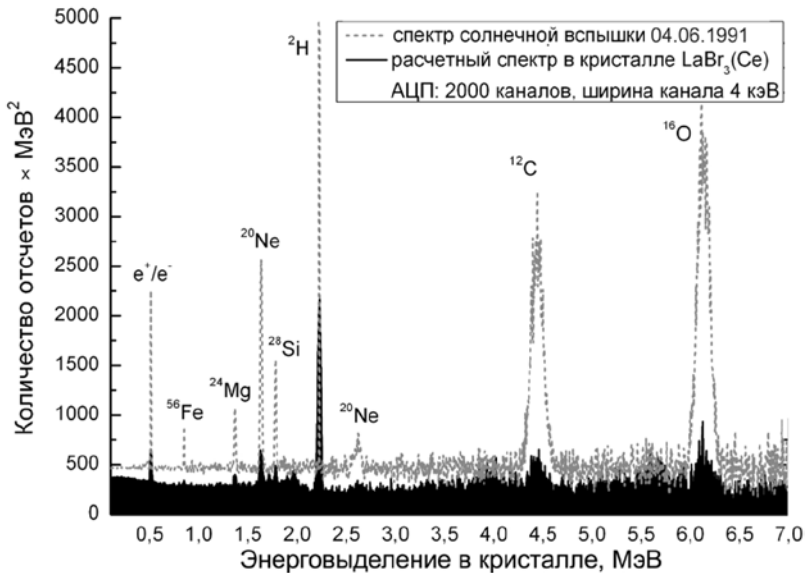


Рис. 9. Отклик детектора с кристаллом  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  на мощную солнечную вспышку

Для выделения линейчатого излучения основным параметром является доля пика полного поглощения. Она быстро уменьшается с ростом энергии. Если считать практической границей диапазона значение энергии фотонов, при которой доля пика полного поглощения составляет около 10 %, то для детектора данных размеров она будет примерно 10 МэВ. Это позволит эффективно регистрировать в солнечных вспышках излучение от всех ранее идентифицированных линий [Кононович и др., 2007]. На рис. 8 показаны результаты наших измерений энергетического разрешения опытного образца детектора  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  российского производства с размерами 25 мм (диаметр) и 25 мм (высота), а также данные измерений с промышленными образцами детекторов компании Saint-Gobain [Nicolini et al., 2007].

Из графиков видно, что энергетическое разрешение детекторов позволит определить присутствие в спектре всех известных линий в пределах чувствительности детектора. Это подтверждается результатами моделирования отклика детектора  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  на спектр вспышки 04.06.1991, зарегистрированной детектором OSSE CGRO [Murphy et al, 1997], представленными на рис. 9.

Для спектрометра на кристалле  $\text{CsI}(\text{Tl})$  кроме светосилы и энергетического разрешения очень важны ограничения энергетического диапазона в области высоких энергий, возникающие от срабатывания защитных детекторов при регистрации выходящих из кристалла вторичных заряженных частиц.

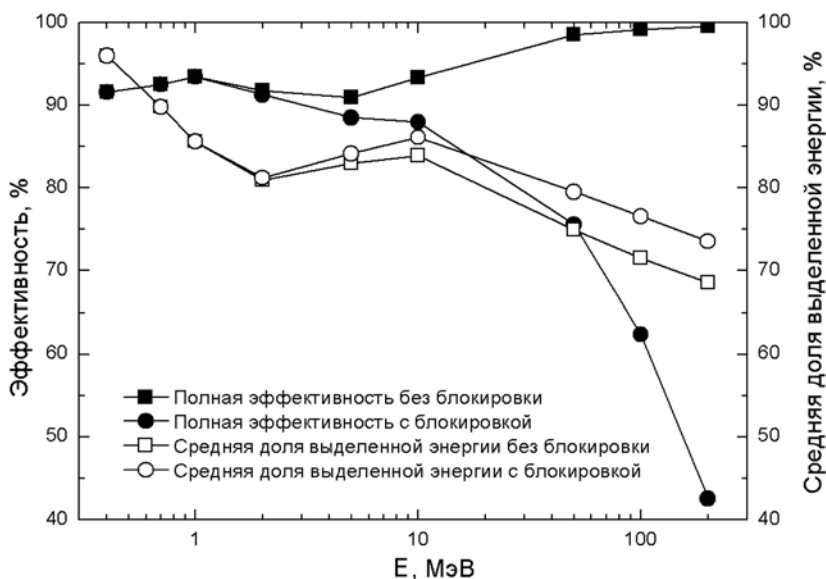


Рис. 10. Расчетные характеристики детектора  $\text{CsI}(\text{Tl})$

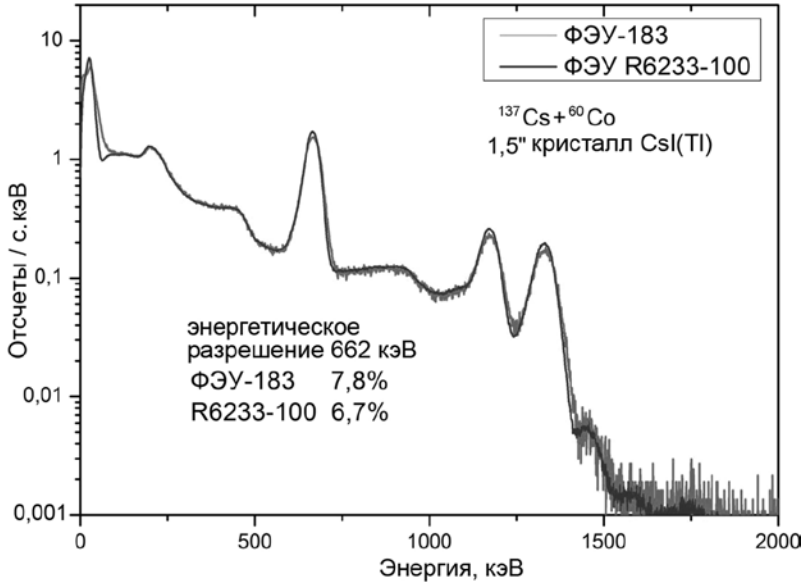


Рис 11. Результаты измерений энергетического разрешения детектора на кристалле CsI(Tl)

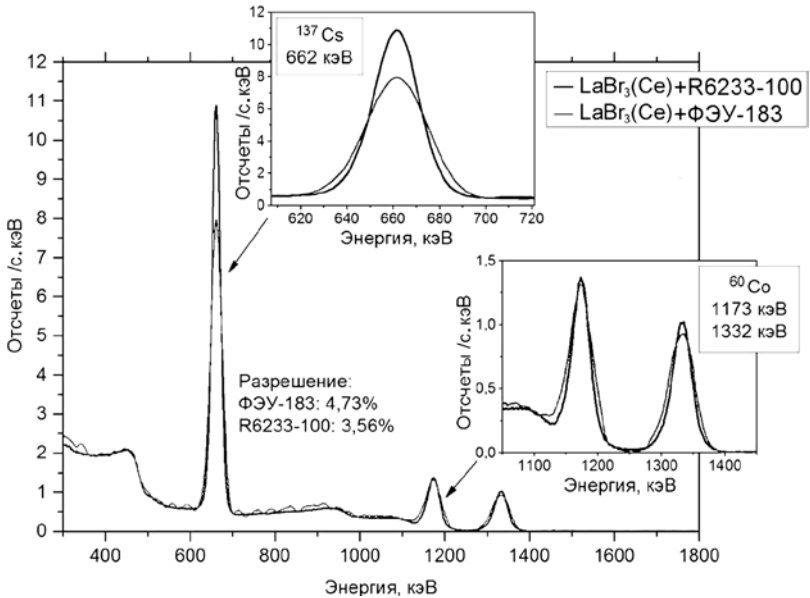


Рис. 12. Результаты измерений энергетического разрешения детектора на кристалле LaBr<sub>3</sub>(Ce)

**Таблица 2.** Отклонения от линейности отклика

Напря- жение пита- ния, В	Отклонение от линейности, %					
	4,4 МэВ		7,6 МэВ		10,8 МэВ	
	типовой дели- тель	выбран- ный делитель	типовой дели- тель	выбран- ный делитель	типовой дели- тель	выбран- ный делитель
700	-0,3	-0,5	-3,0	-1,6	-9,0	-3,8
800	-2,4	-0,5	-12,5	-2,2	-22,5	-5,5
900	-10,7	-0,6	-25,5	-3,3	-36,2	-9,7

Для количественной оценки этого эффекта и выбора оптимальной конфигурации детектора с использованием математического моделирования были построены распределения энерговыделений в кристаллах CsI(Tl) различных размеров и определены эффективности регистрации с учётом блокировки для различных энергий фотонов. На рис. 10 представлены результаты расчётов для кристалла CsI(Tl) диаметром 10 см и высотой 15 см.

Из графиков видно, что верхний энергетический порог для такого детектора будет составлять около 200 МэВ.

Результаты проведенных измерений разрешения макетов детекторов с отечественными и зарубежными (фирма Hamamatsu) фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) даны на рис. 11 и 12. Из них следует, что использование ФЭУ фирмы Hamamatsu с более высокой квантовой эффективностью приводит к уменьшению ширины линии радиоизотопа Cs-137 (662 кэВ) примерно на 25 % для LaBr<sub>3</sub>(Ce) и на 14 % для CsI(Tl). Зарубежный ФЭУ имеет также значительно больший гарантированный срок службы.

При проведении спектральных измерений важной характеристикой является линейность зависимости величины отклика детектора от выделенной в нём энергии. Сцинтилляционная световая вспышка в кристалле LaBr<sub>3</sub>(Ce) значительно более интенсивная, чем в других неорганических сцинтилляторах. Импульсный ток в ФЭУ примерно в 25 раз больше, чем для вспышки в NaI(Tl). Поэтому при энерговыделениях, больших 2...3 МэВ, могут проявляться эффекты насыщения, приводящие к непропорциональности анодного сигнала от засветки фотокатода. Уменьшения этого эффекта добиваются использованием делителей напряжения для питания ФЭУ с неравномерным распределением потенциалов на последних диодах. В табл. 2 приведены измеренные отклонения от линейности отклика макета детектора на кристалле LaBr<sub>3</sub>(Ce) в диапазоне до 10 МэВ в зависимости от напряжения питания ФЭУ для выбранной схемы делителя. Нижняя граница напряжения устанавливалась из условия энергетического разрешения на линии Am-241 (59,6 кэВ) не хуже 12 %. Нелинейность определялась относительно экстраполяции измерений на ОСГИ в диапазоне 59,6...1332 кэВ. Точность измерений ±0,3 %.

Приведенные результаты показывают, что можно реализовать режим спектральных измерений с кристаллом  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  в диапазоне от 0,05 до 10 МэВ с нелинейностью зависимости выходного сигнала ФЭУ от энергии излучения не более 4 %.

Описание построения электронных узлов НА ГРИС дано в работе А. С. Гляненько (см. статью *Гляненько А. С.* «Контроллеры научных приборов для космических экспериментов ГРИС-ФКИ-1 и «ПИНГ-М»» в настоящем сборнике, с. 72).

### Заключение

Космический эксперимент ГРИС-ФКИ-1 даст возможность провести измерения потоков высокоэнергичного излучения и нейтронов, образующихся во время мощных солнечных вспышек, заметно пополнить имеющиеся в настоящее время данные. Проведение эксперимента будет также способствовать отработке новых детекторов и электронной компонентной базы в условиях космического пространства с целью их последующего применения на автоматических космических аппаратах.

Выполненные расчёты и анализ показывают, что на РС МКС могут быть реализованы условия для успешного проведения эксперимента ГРИС-ФКИ-1, а результаты моделирования и исследовательских испытаний с макетами спектрометрических детекторов подтверждают возможность создания НА с требуемыми физическими характеристиками.

В настоящее время проводятся работы в рамках эскизного проекта. Начало космического эксперимента на РС МКС планируется в 2016 г. Продолжительность измерений не менее 3 лет.

### Литература

- [Житник и др., 2006] *Житник И. А., Логачев Ю. И., Богомолов А. В.* и др. Результаты измерений поляризационных, временных и спектральных характеристик жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек по данным эксперимента с прибором СПР-Н на ИСЗ «КОРОНАС-Ф» // *Астрономический вестник*. 2006. Т. 40. С. 108–119.
- [Кононович и др., 2007] *Кононович Э. В., Красоткин С. А., Курт В. Г., Гетлинг А. В.* Солнечная активность // *Модель космоса*. Т. 1: Физические условия в космическом пространстве / Под ред. М. И. Панасюка. М.: КДУ, 2007. С. 288.
- [Котов и др., 2009] *Котов Ю. Д., Архангельская И. В., Архангельский А. И.* и др. Исследование характеристик нестационарных потоков космического гамма-излучения по данным аппаратуры АВС-Ф. // *Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике «КОРОНАС-Ф»* / Под ред. В. Д. Кузнецова. М.: Физматлит, 2009. С. 178–258.
- [Кузнецов, 2009а] *Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике «КОРОНАС-Ф»* / Под ред. В. Д. Кузнецова. – М.: Физматлит, 2009. 488 с.
- [Кузнецов, 2009б] *Кузнецов С. Н., Курт В. Г., Юшков Б. Ю.* и др. Ускорение протонов в солнечных вспышках: результаты анализа измерений гамма-

излучения и нейтронов прибором СОНГ на ИСЗ «КОРОНАС-Ф» // Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике «КОРОНАС-Ф» / Под. ред. В. Д. Кузнецова. М.: Физматлит, 2009. С. 308–331.

[Lin et al., 2002] *Lin R. P., Dennis B. R., Harford G. J.* et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // *Solar Physics*. 2002. V. 210. P. 3–32.

[Murphy et al., 1997] *Murphy R. J., Share G. H., Grove J. E.* et al. Accelerated Particle Composition and Energetics and Ambient Abundances from Gamma-Ray Spectroscopy of the 1991 June 4 Solar Flare // *Astrophysical J.* 1997. V. 490. P. 883–900.

[Nicolini et al., 2007] *Nicolini R., Camera F., Blasi N.* et al. Investigation of the properties of  $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ -scintillator // *Nuclear Instruments and Methods*. 2007. A 582. P. 554–561.

## **X-RAY AND THE GAMMA SPECTROMETER GRIS**

***Yu. D. Kotov<sup>1</sup>, V. N. Yurov<sup>1</sup>, A. S. Glyanenko<sup>1</sup>, A. V. Kochemasov<sup>1</sup>,  
E. E. Lupar<sup>1</sup>, Yu. A. Trofimov<sup>1</sup>, I. V. Rubtsov<sup>1</sup>, E. A. Zhuchkova<sup>1</sup>,  
V. G. Tyshkevich<sup>1</sup>, E. M. Oreshnikov<sup>1</sup>, A. V. Tumanov<sup>1</sup>,  
V. I. Lyagushin<sup>2</sup>***

***<sup>1</sup> National Research Nuclear University “MEPhI” (NRNU MEPhI),  
Moscow***

***<sup>2</sup> S. P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, Korolev***

Planned experiment on research x-ray and gamma radiation and neutrons of solar flares is described. Radiation will be registered scintillation spectrometers on the basis of  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  and  $\text{CsI}(\text{Tl})$  crystals in ranges of energy of 0,05... 15 MeV and 0,3... 200 MeV respectively.  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  spectrometer with high efficiency will register  $\gamma$ -lines radiation and to provide identification of lines. The spectrometer of  $\text{CsI}(\text{Tl})$  is intended for registration of high-energy radiation and detection of neutrons using of a scintillation signal. Descriptions of scientific equipment of GRIS, a condition of carrying out experiment and results of calculation of characteristics of its detector are provided.

**Keywords:** Experiment GRIS-FKI-1 at the international space station, neutrons, x-ray and gamma radiation, solar flares, crystal spectrometers, equipment characteristics.

---

**Kotov Yury Dmitrievich** – Director of the Astrophysics Institute NRNU MEPhI, PhD in physics, kotov@mephi.ru

**Yurov Vitaly Nikolaevich** – Deputy director of the Astrophysics Institute NRNU MEPhI, PhD in physics, VNYurov@mephi.ru

**Glyanenko Alexander Stepanovich** – Head of the group of the Astrophysics Institute NRNU MEPhI, PhD in physics, asgl2005@rambler.ru

**Kochemasov Alexey Viktorovich** – Engineer of the Astrophysics Institute NRNU MEPhI, AVKochemasov@mephi.ru

**Lupar Evgeny Eduardovich** – Engineer of the Astrophysics Institute NRNU MEPhI, EELupar@mephi.ru



## Рентгеновский и гамма-спектрометр ГРИС

---

**Trofimov Yury Alekseevich** – Engineer of the Astrophysics Institute NRNU MEPHI, YuTrofimov@gmail.com

**Rubtsov Igor Vasilyevich** – Leading engineer of the Astrophysics Institute NRNU MEPHI, rubsov2002@mail.ru

**Zhuchkova Eugenia Anatolyevna** – Engineer of the Astrophysics Institute NRNU MEPHI, jan-k@mail.ru

**Tyshkevich Vladimir Georgievich** – Senior lecturer of NRNU MEPHI, vladi@dozen.mephi.ru

**Oreshnikov Eugeny Mihailovich** – Engineer of the Astrophysics Institute NRNU MEPHI, EMOreshnikov@mephi.ru

**Tumanov Andrey Viktorovich** – Engineer of the Astrophysics Institute NRNU MEPHI, Tumanov.Andre@gmail.com

**Lyagushin Vladimir Ivanovich** – Leading Scientist of S. P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, PhD in physics, Lyagushinvl@mail.ru.

# КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ КОНУС-УФ

*Ф. П. Олейник, Р. Л. Аптекарь, С. В. Голенецкий, К. С. Грибовский, Е. П. Мазец, В. Д. Пальшин, Д. С. Свинкин, М. В. Уланов, Д. Д. Фредерикс*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А. Ф. Иоффе), Санкт-Петербург*

Представлен проект будущего перспективного космического эксперимента КОНУС-УФ по наблюдению космических гамма-всплесков, вспышек мягких гамма-репитеров, солнечных вспышек и других космических транзиентных источников в гамма-диапазоне от 10 кэВ до 10 МэВ. Обсуждаются особенности условий наблюдения на борту орбитального телескопа «Спектр-УФ», научная программа эксперимента, требования к научной аппаратуре.

**Ключевые слова:** гамма-спектрометр, гамма-всплески, солнечные вспышки, мягкие гамма-репитеры.

## Введение

Задача исследования космических гамма-всплесков остаётся одной из самых актуальных в современной астрофизике, несмотря на несколько десятилетий наблюдений и теоретических исследований в этой области. Природа источников гамма-всплесков, детальные особенности протекания процессов в источниках гамма-всплесков, особенности образования и эволюции таких ис-

---

*Олейник Филипп Петрович* – младший научный сотрудник, oleyunik.phil@mail.ioffe.ru

*Аптекарь Рафаил Львович* – ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, aptekar@mail.ioffe.ru

*Голенецкий Сергей Владимирович* – старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, golen@mail.ioffe.ru

*Грибовский Кирилл Станиславович* – ведущий электроник, kirill.gribovskiy@mail.ioffe.ru

*Мазец Евгений Павлович* – заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, mazets@mail.ioffe.ru

*Свинкин Дмитрий Сергеевич* – младший научный сотрудник, svinkin@mail.ioffe.ru

*Уланов Михаил Владимирович* – младший научный сотрудник, ulanov@mail.ioffe.ru

*Фредерикс Дмитрий Дмитриевич* – старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, fred@mail.ioffe.ru

точников остаются темой современных научных экспериментов во всём мире [Gehrels et al., 2009].

Эксперимент КОНУС-УФ планируется с целью исследования рентгеновского и гамма-излучения космических гамма-всплесков, вспышек мягких гамма-репитеров и солнечных вспышек в широком энергетическом интервале от 10 кэВ до 10 МэВ с высоким временным разрешением и является составной частью научной программы космического аппарата(КА) «Спектр-УФ».

## **1. Научная программа эксперимента**

Основной задачей эксперимента КОНУС-УФ является наблюдение космических гамма-всплесков, вспышек мягких гамма-репитеров и солнечных вспышек. Каждое из этих событий характеризуется набором энергетических и временных характеристик, что требует от программы наблюдений возможности гибко подстраиваться и изменять режимы работы соответственно с наблюдаемым явлением. Аппаратура работает в двух основных режимах: «Фон» и «Всплеск». В режиме «Фон» непрерывно регистрируются временные истории в 22 энергетических каналах с разрешением 0,25 с и многоканальные спектры в 256 квазилогарифмических энергетических каналах со временем накопления 8 с. Вместе с регистрацией по программе «Фон» непрерывно заполняется и перезаписывается кольцевой буфер, состоящий из временной истории с высоким временным разрешением в тех же 22 энергетических каналах и многоканальных спектров с временем набора 64 мс, который при переходе в режим «Всплеск» образует запись предыстории. Переход в режим «Всплеск» происходит при выполнении одного из условий, разработанного специально для конкретного типа событий. Все условия основаны на регистрации превышения скорости счёта в определённом энергетическом окне за определённое время. Для космических гамма-всплесков заданы два условия, так как существуют два существенно различных класса гамма-всплесков, различающиеся характерными длительностями и жёсткостью гамма-излучения [Gehrels et al., 2009].

В режиме «Всплеск» регистрируются временные истории с разрешением от 1 мс в 22 энергетических каналах, а также многоканальные спектры с временем накопления от 64 мс. Длительность записи варьируется в зависимости от сработавшего условия, для гамма-всплесков составляет до 300 с. Временная предыстория регистрируется также с временным разрешением 1 мс в 22 энергетических каналах.

Программа наблюдений адаптирована также к условиям наблюдений, на высокой орбите возможна длительная запись событий уникальной продолжительности, в отличие от условий ближнего околоземного пространства, где длительная запись с большой вероятностью неэффективна из-за влияния естественных поясов захваченной радиации.

Для решения различных наблюдательных задач, в первую очередь, точной триангуляции источников гамма-всплесков, предпочтительно использовать режим пофотонной регистрации. В эксперименте КОНУС-УФ планируемая точность привязки бортового времени к всемирному составит порядка 1 мс, что позволит эффективно использовать регистрацию отдельных фотонов в режиме «Всплеск», причём объём выводимой информации будет меньше или равен объёму информации при формировании традиционных структур данных временной истории высокого разрешения. Рассматриваются два возможных режима пофотонной регистрации: 256 энергетических каналов и 1 или 2 байта на временной код с разрешением 1 мкс. Количество фотонов, регистрируемых детектором при самых мощных гамма-всплесках, порядка  $10^6$ , что в случае двубайтного временного кода даёт объём информации порядка 3 МБ, в случае однобайтного объём не так чётко детерминирован, так как при низкой интенсивности и большой длительности возрастает вероятность «пропуска» интервалов времени, за которое счётчик временного кода переполнится и потребуются вводить маркер переполнения.

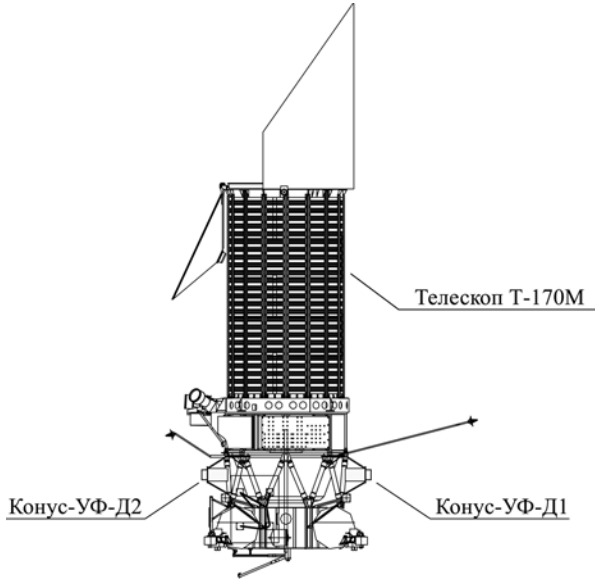
Пофотонная регистрация в фоновом режиме в старших энергетических каналах также позволит уменьшить требуемые от телеметрии объёмы передачи, поскольку интенсивность потоков высокоэнергичных гамма-квантов невелика, и научная аппаратура не подвергается воздействию мощных потоков энергичных заряженных частиц из поясов захваченной магнитным полем Земли радиации.

## **2. Схема эксперимента и условия наблюдения**

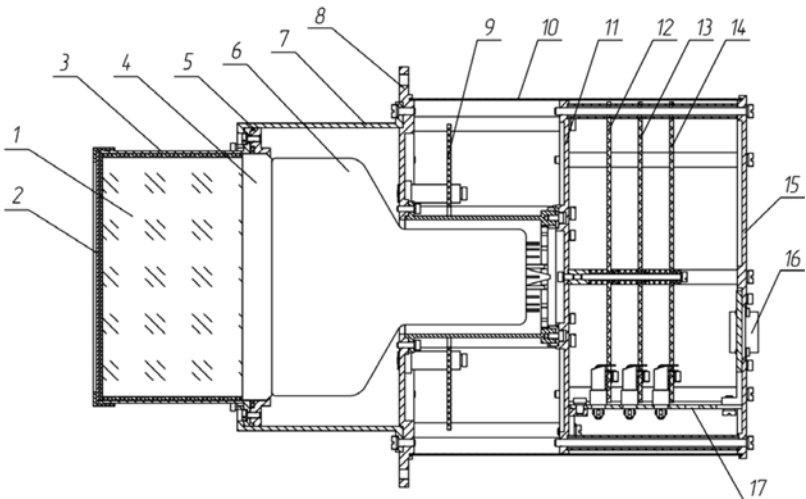
Научная аппаратура состоит из двух одинаковых детекторных блоков, гамма-спектрометров и блока электроники, обеспечивающего буферизацию научных данных, приём и исполнение команд с наземных пунктов управления, служебные функции и вторичное питание всех приборов эксперимента КОНУС-УФ. Каждый гамма-спектрометр осматривает свою небесную полусферу, схема расположения приведена на рис. 1.

Спектрометрические блоки вынесены относительно аппарата с тем, чтобы его конструкции не попадали в поле зрения спектрометров. Два блока дублируют друг друга, работают полностью независимо. Конструкция одного из двух блоков приведена на рис. 2.

Детектор гамма-излучения спектрометрических блоков — сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) диаметром 130 мм и высотой 75 мм, помещённый в тонкостенный контейнер из лёгкого алюминиевого сплава с бериллиевым входным окном. Сцинтилляционный кристалл просматривается фотоэлектронным умножителем через выходное окно из свинцового стекла высокой прозрачности толщиной 16 мм, оно служит для экранировки гамма-излучения, рассеянного конструкциями аппарата. Эффективная площадь детектора составляет  $\sim 80 \dots 160 \text{ см}^2$  в зависимости от энергии



**Рис. 1.** Схема расположения спектрометрических блоков аппаратуры «Конус-УФ» на космическом аппарате «Спектр-УФ»



**Рис. 2.** Конструкция детекторного блока аппаратуры «Конус-УФ»: 1 — кристалл сцинтиллятора NaI(Tl), 2 — входное бериллиевое окно, 3 — контейнер из лёгкого алюминиевого сплава, 4 — выходное окно, 5, 8, 11 — фланцы, 6 — фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), 7, 10 — обечайки, 9 — плата высоковольтного стабилизатора, 12–14 — платы электроники блока, 15 — крышка, 16 — коммутационный разъём, 17 — коммутационная стенка

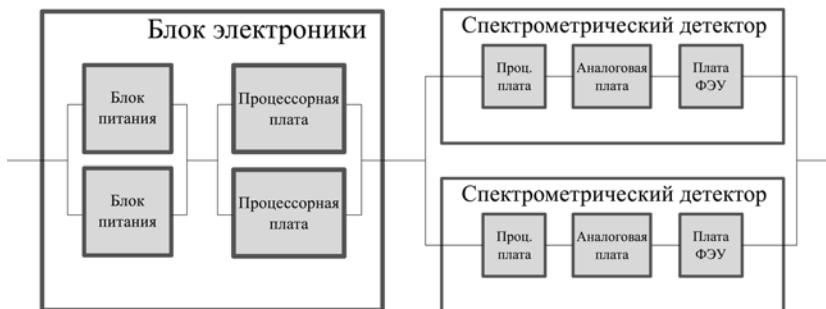
фотонов и угла падения пучка излучения. Спектральное разрешение составляет ~8 % на линии  $^{137}\text{Cs}$  662 кэВ, чувствительность к всплеску составляет порядка  $10^{-7}$  эрг/см<sup>2</sup>. Входное бериллиевое окно позволяет эффективно регистрировать мягкие гамма-кванты, прозрачность входного окна для квантов с энергией 20 кэВ составляет 95 %.

Планируется, что несущий аппарат будет выведен на круговую орбиту высотой 35 800 км с наклоном 51,4°, орбита аналогична геостационарной, наземный трек представляет собой «восьмёрку» шириной порядка 30° по долготе. Высокая круговая орбита позволит проводить непрерывные длительные наблюдения в условиях относительно стабильного фонового потока заряженных частиц, влияние естественных радиационных поясов Земли на качество наблюдений будет минимально.

Высокая орбита также позволит аппаратуре «Конус-УФ» быть удалённой триангуляционной точкой относительно околоземных аппаратов, в результате окажется возможной точная локализация источников гамма-всплесков методом триангуляции. В настоящий момент это является одной из самых важных задач наблюдательной астрофизики в гамма-диапазоне, поскольку локализация позволяет в ходе дальнейших наблюдений в различных диапазонах энергий, прежде всего, в оптическом, определить расстояние до источника по красному смещению оптического послесвечения гамма-всплеска. Определение расстояния критически важно для построения теоретических моделей объектов, являющихся источниками гамма-всплесков, требующих установления рамок выделяемой в ходе всплеска энергии.

### 3. Меры повышения надёжности

Научная аппаратура разрабатывается с учётом длительного срока эксплуатации в космическом пространстве. Надёжность научной аппаратуры обеспечивается дублированием внутренних узлов блока электроники и спектрометрических детекторов в целом. Блок электроники состоит из двух узлов: платы вторичного питания



**Рис. 3.** Схема надёжности «Конус-УФ»

и платы электроники. Каждый из них дублирован узлом в «холодном» резерве с возможностью независимого переключения на резервный комплект. Спектрометрические детекторы дублируются целиком, отказ одного из детекторов не приводит к потере функциональности всего комплекса научной аппаратуры. Схема надёжности аппаратуры «Конус-УФ» приведена на рис. 3.

Кроме аппаратных средств обеспечения надёжности применяются программные, осуществляющие резервирование блоков памяти, содержащих микропрограммы для программируемых логических схем и сигнальных процессоров, работающих в аппаратуре, и программную проверку целостности содержимого этих блоков памяти в ходе работы аппаратуры с возможностью восстановления блоков со сбоями в информации. Резервирование блоков памяти и первичная проверка целостности информации производится аппаратно устройствами жёсткой логики, что исключает возможность сложных, комплексных программных сбоев, не поддающихся устранению в автономном режиме.

#### **4. Ожидаемые научные результаты**

По результатам многолетних непрерывных наблюдений в эксперименте КОНУС-WIND [Аптекарь и др., 2010; Aptekar et al., 1995, 2012] в межпланетном пространстве, в условиях, сходных по уровню и стабильности фона, ожидаемое число регистрируемых гамма-всплесков  $\sim 10^2$  в год. Ожидаемый суточный объём информации порядка 100 МБ/сут, минимум 60 МБ/сут при наблюдениях исключительно по фоновой программе. В ходе наблюдений возможна регистрация не только транзитных событий (гамма-всплески, вспышки мягких гамма-репитеров), программа наблюдений позволяет проводить детальные исследования фонового космического гамма-излучения, компактных постоянных источников методом наблюдения затмений. Эксперимент КОНУС-УФ планируется проводить в течение пяти лет.

#### **Литература**

- [Аптекарь и др., 2010] Аптекарь П.Л., Голенецкий С.В., Мазец Е.П., Пальшин В.Д., Фредерикс Д.Д. Исследования космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров в экспериментах ФТИ КОНУС // УФН. 2010. Т. 180. С. 420–424.
- [Gehrels et al., 2009] Gehrels N., Ramirez-Ruiz E., Fox D.B. Gamma-Ray Bursts in the Swift Era // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2009. V. 47. P. 567–617.
- [Aptekar et al., 1995] Aptekar R.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V., Il'ynskii V.N., Mazets E.P., Panov V.N., Sokolova Z.J., Terekhov M.M., Sheshin L.O., Cline T.L. et al. Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft // Space Science Reviews. 1995. V. 71. N. 1–4. P. 265–272.
- [Aptekar et al., 2012] Aptekar R.L., Golenetskii S.V., Frederiks D.D., Mazets E.P., Palshin V.D. Cosmic Gamma-ray Bursts Studies with Ioffe Institute Konus Experiments // Gamma-Ray Bursts 2012 Conf. Munich, Germany, May 7–11, 2012.

## **KONUS-UF: THE FUTURE SPACE EXPERIMENT TO EXPLORE GAMMA-RAY BURSTS**

*P. P. Oleynik, R. L. Aptekar, S. V. Golenetskii, K. S. Gribovskii,  
E. P. Mazets, V. D. Palshin, D. S. Svinkin, M. V. Ulanov,  
D. D. Frederiks*

*Ioffe Institute of Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg*

A project of future advanced space experiment KONUS-UF to study temporal and spectral properties of space gamma-ray bursts, soft gamma repeaters and solar flares is presented. Target energy range for observations is from 10 keV to 10 MeV.

Experiment will be carried out onboard SPEKTR-UF space telescope, orbital environment and technical requirements are considered.

**Keywords:** gamma-spectrometer, gamma-ray bursts, solar flares, soft gamma repeaters.

---

*Oleynik Philipp Petrovich* – scientist, [oleynik.phil@mail.ioffe.ru](mailto:oleynik.phil@mail.ioffe.ru)

*Aptekar Rafail Lvovich* – leading scientist, PhD, [aptekar@mail.ioffe.ru](mailto:aptekar@mail.ioffe.ru)

*Golenetskii Sergey Vladimirovich* – senior scientist, PhD, [golen@mail.ioffe.ru](mailto:golen@mail.ioffe.ru)

*Gribovskii Kirill Stanislavovich* – leading electronics engineer,  
[kirill.gribovskiy@mail.ioffe.ru](mailto:kirill.gribovskiy@mail.ioffe.ru)

*Mazets Evgeny Pavlovich* – head of Laboratory, doctor of sciences,  
[mazets@mail.ioffe.ru](mailto:mazets@mail.ioffe.ru)

*Svinkin Dmitry Sergeevich* – postgraduate student, [svinkin@mail.ioffe.ru](mailto:svinkin@mail.ioffe.ru)

*Ulanov Mikhail Vladimirovich* – scientist, [ulanov@mail.ioffe.ru](mailto:ulanov@mail.ioffe.ru)

*Frederiks Dmitry Dmitrievich* – senior scientist, PhD, [fred@mail.ioffe.ru](mailto:fred@mail.ioffe.ru)



## КОНТРОЛЛЕРЫ НАУЧНЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ГРИС-ФКИ-1 И «ПИНГ-М»

**А. С. Гляненко**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Министерства образования и науки РФ, Институт астрофизики (ИАФ), Москва**

В данной работе рассматривается структура контроллеров для различных научных приборов, выбор элементной базы и возможность унификации технических решений при создании контроллеров научной аппаратуры для различных космических экспериментов, подготавливаемых в НИЯУ МИФИ.

**Ключевые слова:** контроллер научного прибора, элементная база, микросхемы, программируемая логическая интегральная схема, космический эксперимент, радиационная стойкость, унификация.

В настоящее время в НИЯУ МИФИ проводится разработка нескольких экспериментов на различных космических аппаратах:

- прибор «ПИНГ-М» в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, предназначенный для изучения рентгеновского и гамма-излучения Солнца в диапазоне 1,5 кэВ-2,5 МэВ, в котором, в качестве детекторов используются кремниевые дрейфовые диоды SDD и сцинтилляционный детектор на основе  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , кроме того, в эксперименте предполагается решение задач по поляриметрии жесткого рентгеновского излучения Солнца [Гляненко и др., 2012, Котов и др., 2012а];
- эксперимент ГРИС-ФКИ-1 на борту Международной космической станции (МКС), предназначенный для изучения потоков солнечного рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне 50 кэВ-200 МэВ, в котором для решения задач эксперимента используются сцинтилляционные детекторы  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и  $\text{CsI}(\text{Tl})$  [Котов и др., 2012б];
- планируемый эксперимент со спектрометром рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1,5...25 кэВ на борту космического аппарата (КА) «Электро-М» (отечественный аналог GOES), ориентированный на решение задач в интересах Роскомгидромета

---

**Гляненко Александр Степанович** – заведующий научно-исследовательским сектором, кандидат физико-математических наук НИЯУ МИФИ, [asgl2005@rambler.ru](mailto:asgl2005@rambler.ru)

(далее эксперимент ГИДРОМЕТ), в котором в качестве детекторов используются кремниевые дрейфовые диоды SDD.

Ядром любой электронной системы любого научного прибора является контроллер, обеспечивающий решение основных задач научного эксперимента и выполняющий в подготавливаемых экспериментах НИЯУ МИФИ следующие функции:

- сбор данных от устройств преобразования в цифровой вид сигналов с детекторов;
- выделение «вспышечных» событий на основе алгоритмов статистической обработки информации о потоках частиц;
- первичную обработку данных;
- упаковку полученных данных;
- привязку данных ко времени;
- передачу данных на телеметрическую систему;
- прием управляющих кодовых слов и метки времени от телеметрических систем или систем управления бортовым комплексом;
- преобразование информации, поступающей в виде потоков импульсов (интенсиметры), в цифровой код и передачу данных на телеметрическую систему.

При разработке контроллера возможны несколько подходов: создание системы на базе существующих универсальных вычислительных компонентов или разработка «системы на кристалле», максимально отвечающей требованиям данного эксперимента.

В космическом научном приборостроении существует несколько принципиальных ограничений, которые отсутствуют в наземных экспериментах: высокая надежность систем электроники, широкий диапазон рабочих температур, устойчивость к различным механическим воздействиям, особенно на этапе выведения КА, необходимость обеспечить работоспособность в вакууме и высокие требования к радиационной стойкости микроэлектронной компонентной базы. Так, в рассматриваемых проектах орбита КА «Электро-М» является геостационарной и, следовательно, аппарат находится во внешнем (электронном) радиационном поясе Земли, а КА «Интергелиозонд» при движении по орбите будет значительно приближаться к Солнцу и потоки частиц «солнечного ветра», соответственно, будут многократно превышать потоки, наблюдаемые на околоземных орбитах.

Рассмотрим возможности использования современной отечественной микроэлектронной компонентной базы.

Вычислительное («интеллектуальное») ядро любого контроллера составляют универсальный процессор (либо микроконтроллер), для хранения команд и данных в состав ядра обязательно входят оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и постоянное программируемое запоминающее устройство (ППЗУ), а также набор интерфейсов для сопряжения с прибором и системами управления и телеметрии КА, структура контроллера приведена на рис. 1.

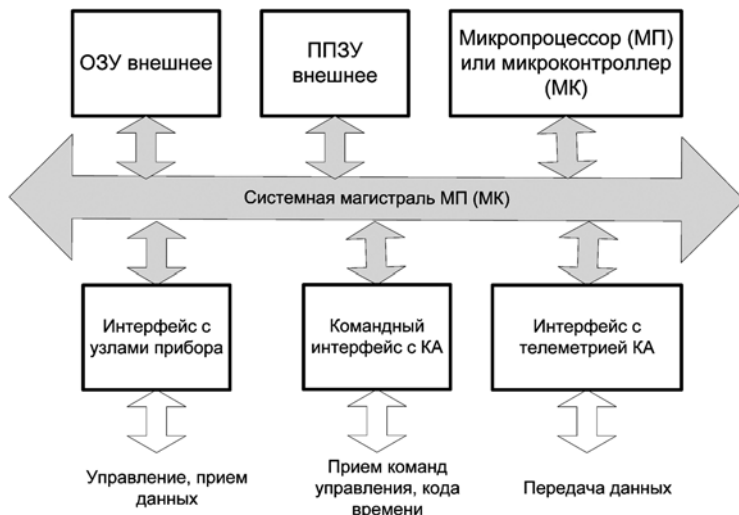


Рис. 1. Структура контроллера

При подобном подходе мы имеем микропроцессор, системную магистраль, соответствующую интерфейсу микропроцессора (микроконтроллера), к которой подключаются внешние микросхемы ОЗУ и ПЗУ, а также специализированные схемы интерфейсов с системами КА и другими узлами прибора. Для создания специализированных интерфейсов можно использовать программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), в которых реализуются аппаратные схемы протоколов обмена данными с системной магистралью микропроцессора и, конечно, с системами КА и узлами прибора.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает всего несколько типов универсальных микропроцессоров (микроконтроллеров) и элементов запоминающих устройств, которые удовлетворяют вышеперечисленным требованиям к элементной базе, прежде всего требованиям повышенной радиационной стойкости. Их разработкой и выпуском занимаются только несколько предприятий и организаций России: Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, г. Москва (см. статью в настоящем сборнике *Осипенко П. Н.* Изделия НИИСИ РАН для аэрокосмических приложений, с. 137); Научно-исследовательский институт электронной техники, г. Воронеж [НИИЭТ, 2012]; компания «Миландр», г. Зеленоград [Миландр, 2012]; Научно-производственный центр «Элвис», г. Зеленоград [Элвис, 2012] а также Научно-производственное объединение «Интеграл», г. Минск, Республика Беларусь [Интеграл, 2012]. Сводные данные о характеристиках микропроцессоров и микроконтроллеров приведены в табл. 1, а характеристики запоминающих устройств – в табл. 2.

**Таблица 1.** Радиационно стойкие микроконтроллеры и микропроцессоры

Тип	Характеристика	Разрядность/частота	$U_{пит}$ / мощн. (ток)	Система команд	Изготовитель
1830BE32У 1830BE32АУ	8-разрядный микроконтроллер	8р./12 МГц	+5В/300 мВт +3,3 В/300 мВт	80С31	НИИЭТ, Воронеж
ОСМ 1880ВЕ31У	Аналог 1830	8р./12 МГц	+5В/300 мВт	80С31	«Интеграл», Минск
1892ВМ8Я (МС-24R)	Многоядерный сигнальный микропроцессор	32р./80 МГц	+3,3 В/ 3,3 Вт	MIPS32	«Элвис», Зеленоград
5890ВЕ1Т	Однокристалльная 32-разрядная вычислительная система	32р./33 МГц	+3,3В/ (640 мА)	RISC	НИИСИ РАН, Москва

**Таблица 2.** Радиационно стойкие микросхемы памяти

Тип	Характеристика	T выб.	$U_{пит}$ /мощн. (ток)	Аналог	Изготовитель
1645РУ2Т	СОЗУ 64 Кбит (8К×8)	55 нс	5В / (160 мА)	IDT7164S45, IDT, США	«Миландр», Зеленоград
1645РТ2У	Однократно программируемое ПЗУ на основе элемента "antifuse" (32К×8)	100 нс (по ОЕ – 30 нс)	+3,3 В/ 330 мВт	UT28F256QLE, Aeroflex, США	«Миландр», Зеленоград
1657РУ1У	Статическое ОЗУ 4 Мбит, (512К×8)	25 нс	(2,5 и 3,3В) / 250 мВт	UT8R512K8 Aeroflex, США	«Элвис», Зеленоград

Оценим один из ключевых параметров для любого устройства, предназначенного для космических применений, – потребляемую мощность. По этому параметру всегда есть существенные ограничения, так для дальних миссий, например, КА «Интергелиозонд», средняя мощность потребления на один эксперимент (прибор) не превышает 5 Вт. Таким образом, если оценить потребляемую мощность только вычислительного ядра контроллера (микропроцессор с ППЗУ и ОЗУ), то даже при минимальной производительности (1830BE32АУ – 8 разрядов, около 1 млн опер./с) получим потребляемую мощность около 1 Вт. С добавлением в систему периферийных устройств и интерфейсов, этот психологически значимый рубеж будет превышен еще больше.

Выход из положения может заключаться в использовании ПЛИС и построении контроллера по идеологии «система на кристалле». В этом случае в одной микросхеме объединяются и большая часть вычислительного ядра и все необходимые для обеспечения работы прибора периферийные устройства и интерфейсы.

Наиболее подходящими для аппаратной реализации бортового контроллера являются микросхемы ПЛИС фирмы Actel (Microsemi), США [Actel, 2012]. Они выполнены по Flash-технологии, допускающей многократное перепрограммирование кристалла, поэтому отсутствует загрузочное ППЗУ, кроме того, контроллер на ПЛИС этого типа готов к работе сразу же после включения питания. Основные характеристики микросхем радиационно стойких ПЛИС семейства ProASIC3 приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Радиационно стойкие микросхемы ПЛИС

Микросхема	RT3PE600L	RT3PE3000L
Ёмкость:		
системные вентили	600 000	3 000 000
модули (логические ячейки)	13 824	75 264
Встроенное ОЗУ/FIFO (без EDAC):		
блоков RAM (размерность — 9 бит)	24	112
ёмкость RAM, Кбит	108 (12 КБ)	504 (56 КБ)
Встроенное Flash ПЗУ:		
ёмкость Flash, бит	1 000	1 000
Входы/выходы:		
количество банков	8	8
пользовательских вводов/выводов (макс.)	270	620
регистров ввода/вывода	810	1 860
Глобальные ресурсы и основные характеристики:		
тактыые сигналы	18	18
узлы ФАПЧ	6	6
быстродействие	Std., –1	Std., –1
виды исполнения (темп. диапазон)	–60...+125 °С	–60...+125 °С
Корпуса:		
CCGA/LGA	484	484, 896
CQFP	256	256

**Примечание:** RT ProASIC3 используют тот же дизайн платин, что и коммерческие ПЛИС серии ProASIC3EL. RT3PE600L аналогична АЗРЕ600L, а RT3PE3000L и отработки – АЗРЕ3000L, что очень удобно в процессе разработки проекта для его прототипирования и отработки.

Дополнительные возможности микросхем:

- обеспечивается работа в широком диапазоне напряжений питания — 1,2; 1,5; 1,8; 2,5 и 3,3 В для одновременной запитки различных фрагментов кристалла ПЛИС;
- предусмотрена раздельная конфигурация банков ввода/вывода для кристалла — до 8 банков на микросхему;
- банки ввода/вывода могут конфигурироваться под односигнальные стандарты сигналов ввода/вывода: LVTTTL, LVCMOS 3,3 В / 2,5 В / 1,8 В / 1,5 В / 1,2 В, 3,3 В PCI, 3,3 В PCI-X и LVCMOS 2,5 В / 5,0 В (вход);
- банки ввода/вывода могут конфигурироваться под дифференциальные стандарты сигналов ввода/вывода: LVPECL, LVDS, B-LVDS и M-LVDS.

Микросхемы обладают высокой радиационной стойкостью: полная доза 30 крад, при допущении потери быстродействия <15 % — 55 крад. Микросхемы ПЛИС имеют высокую стойкость к «одночастичным событиям». На рис. 2 приведены графики зависимости сечений для отказов в зависимости от линейной передачи энергии при изменении различных параметров микросхемы.

Для ПЛИС Actel существует несколько реализаций процессорных ядер. Для нас представляется наиболее интересным ядро Core8051 и его аналог, устойчивый к сбоям под воздействием

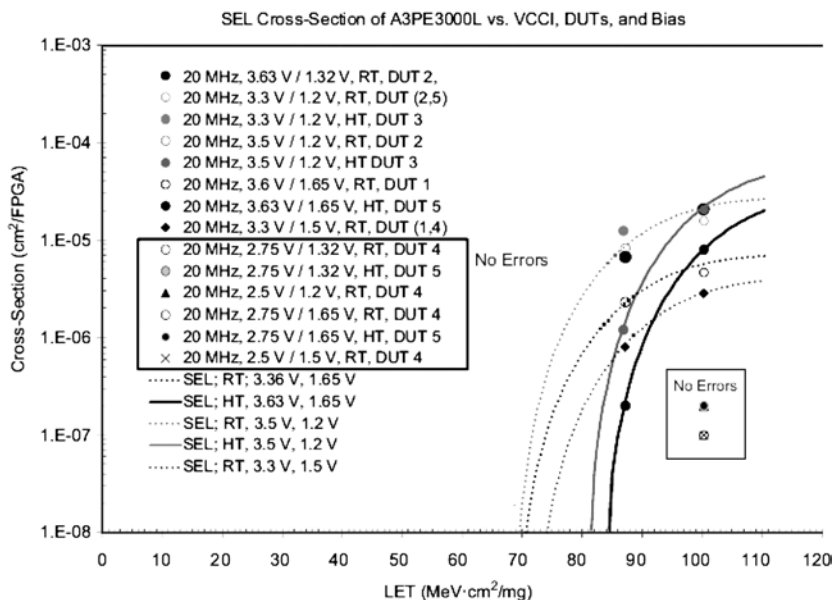


Рис. 2. Экспериментальные зависимости параметров ПЛИС для «одночастичных событий»

частиц с высокой линейной передачей энергии RT51, так как оно имеет систему команд и архитектуру, сходную с отечественными компонентами 1830BE32AY и OCM 1880BE31Y, но в отличие от своих аналогов, требующих 12-24 такта на выполнение команды, имеет RISC систему команд и время выполнения команды 1-2 такта. Это ядро обеспечивает работу ПЛИС с тактовой частотой ядра до 33 МГц, потребляя при этом крайне мало – около 100 мВт! Core8051 — это софт-версия популярного 8-битного микроконтроллера 8051, совместимого по системе команд с ASM51. Ядро Core8051 значительно превосходит свой прототип по быстродействию, поскольку выполняет инструкции за один такт и может работать на более высоких тактовых частотах. Ядро может выполнять программы, созданные для микроконтроллера, без всяких изменений и совместимо с имеющимися средствами разработки для 8051. Core8051 поддерживает до 13 прерываний, включает UART, два таймера/счетчика и четыре 8-битных порта. Шина SFR поддерживается в полном объеме, что позволяет подключать до 101 регистра внешних устройств. Таким образом, используя это ядро в ПЛИС, можно реализовать по концепции «система на кристалле» достаточно мощное вычислительное ядро, а используя его дополнительные ресурсы, создать необходимую аппаратную конфигурацию контроллера. Кроме того в состав стандартных софтверов для ПЛИС входят: контроллеры и оконечные устройства SPI, I<sup>2</sup>C, UART, Ethernet10/100 и многие другие.

Рассмотрим основные особенности контроллеров для различных экспериментов, подготавливаемых в НИЯУ МИФИ.

### **Эксперимент ГРИС-ФКИ-1 на борту МКС**

Структура эксперимента приведена на рис. 3. В блоке ГРИС-БД, размещенном вне гермоотсека одного из модулей МКС, обработка потоков сигналов от детекторов осуществляется тремя независимыми цифровыми системами обработки данных (ЦСОД1-3).

Окончательное формирование выходных потоков данных, управление работой прибора, формирование команд и т.д. осуществляется системой обработки данных блока ГРИС-БЭ, на основе промышленного компьютера, располагающегося в гермоотсеке модуля МКС.

Основное назначение контроллера ГРИС-БД – управление работой, сбор информации от ЦСОД1-3, формирование информационных пакетов и обмен данными с блоком ГРИС-БЭ, контроль внутренних параметров, выделение «вспышечных событий». Для повышения надежности предполагается использование двух контроллеров по схеме с «холодным» резервированием. Структурная схема контроллера БД приведена на рис. 4.

Основой контроллера является ПЛИС RT3PE600L производства Actel, а в качестве процессорного ядра – сбоеустойчивое ядро RT-51. По внутрикристальной системной магистрали к ядру

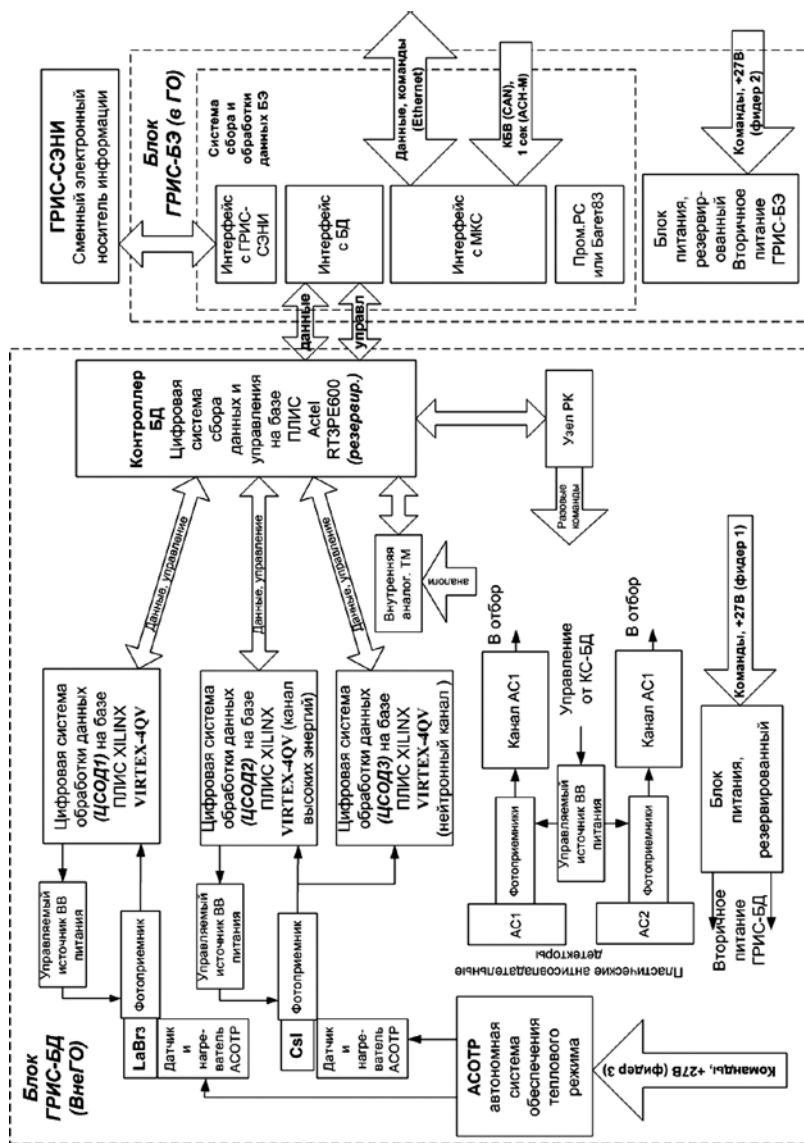


Рис. 3. Структура эксперимента ГРИС-ФКИ-1



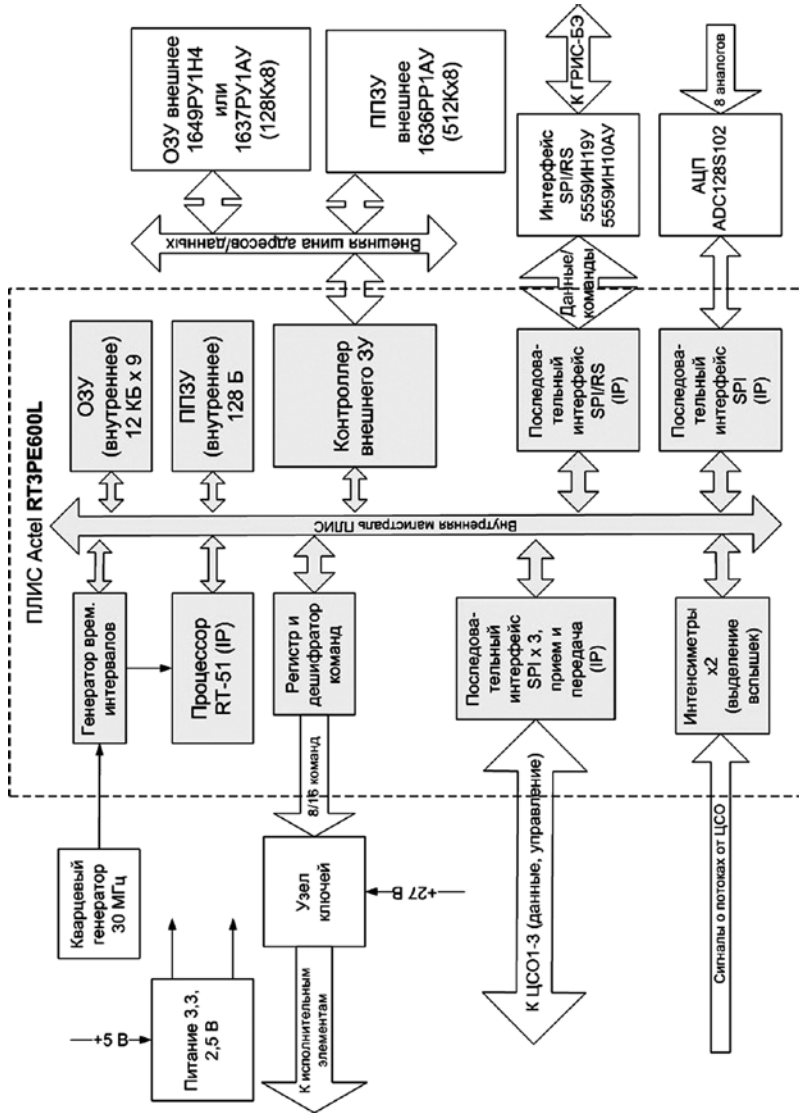


Рис. 4. Структура контроллера БД

подключаются внутреннее ОЗУ, ППЗУ начальных уставок и, через специализированный контроллер внешнего ЗУ, – радиационно стойкие микросхемы ОЗУ и ППЗУ. Связь с блоком ГРИС-БЭ по приему и передаче данных осуществляется через SPI-подобный интерфейс. Считывание внутренних параметров, оцифрованных АЦП ADC128S102, а также информационный обмен с ЦСОД1-3 осуществляется также с использованием интерфейса SPI. Для выделения «вспышечных событий» используются два счетчика («интенсиметры»), а через регистр управления предполагается формировать импульсные команды для изменения режимов работы узлов блока ГРИС-БД.

### **Эксперимент ГИДРОМЕТ**

В контроллере для эксперимента ГИДРОМЕТ (структура системы сбора и обработки приведена на рис. 5) многие функции контроллера аналогичны вышеописанным.

Основные отличия: организация связи с системами КА (вывод данных, прием цифровых команд) осуществляется через интерфейс RS-485, прием первично оцифрованных данных производится не от ЦСОД, а непосредственно от АЦП, в связи с чем в функции контроллера входит накопление спектральных данных, формирование в цифровом виде «энергетических окон» для выделения «вспышечных» событий.

### **Эксперимент «ПИНГ-М» на борту КА «Интергелиозонд»**

Более сложным по своей реализации является эксперимент «ПИНГ-М», структура которого приведена на рис. 6.

Особенность этого эксперимента — наличие двух детекторов в блоке ПИНГ-ПИРС (сцинтилляционного на основе  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и полупроводникового — кремниевого дрейфового диода SDD) и размещаемый отдельно блок поляриметрии (блок ПИНГ-П). Каждый из установленных детекторов обслуживает самостоятельная цифровая система обработки данных (ЦСОД), которая по своей структуре и назначению близка к контроллеру «Гидромет». Структура ЦСОД для канала SDD приведена на рис. 7.

Основными отличиями ЦСОД1 от контроллера «Гидромет» является увеличение количества интенсиметров, появление аппаратных средств для управления работой коллиматора и изменение типа интерфейса для связи с контроллером БД (вместо RS-485 – SPI-подобный интерфейс). Ближе к контроллеру «Гидромет» — ЦСОД2, предназначенная для работы со сцинтилляционным детектором  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ . Ее отличие от ЦСОД1 состоит в отсутствии коллиматора, т.е. она является, по сути, упрощенной версией ЦСОД1.

Управляет работой всех составных частей в эксперименте «ПИНГ-М» контроллер БД (контроллер ПИНГ-ПИРС). Его структура приведена на рис. 8.

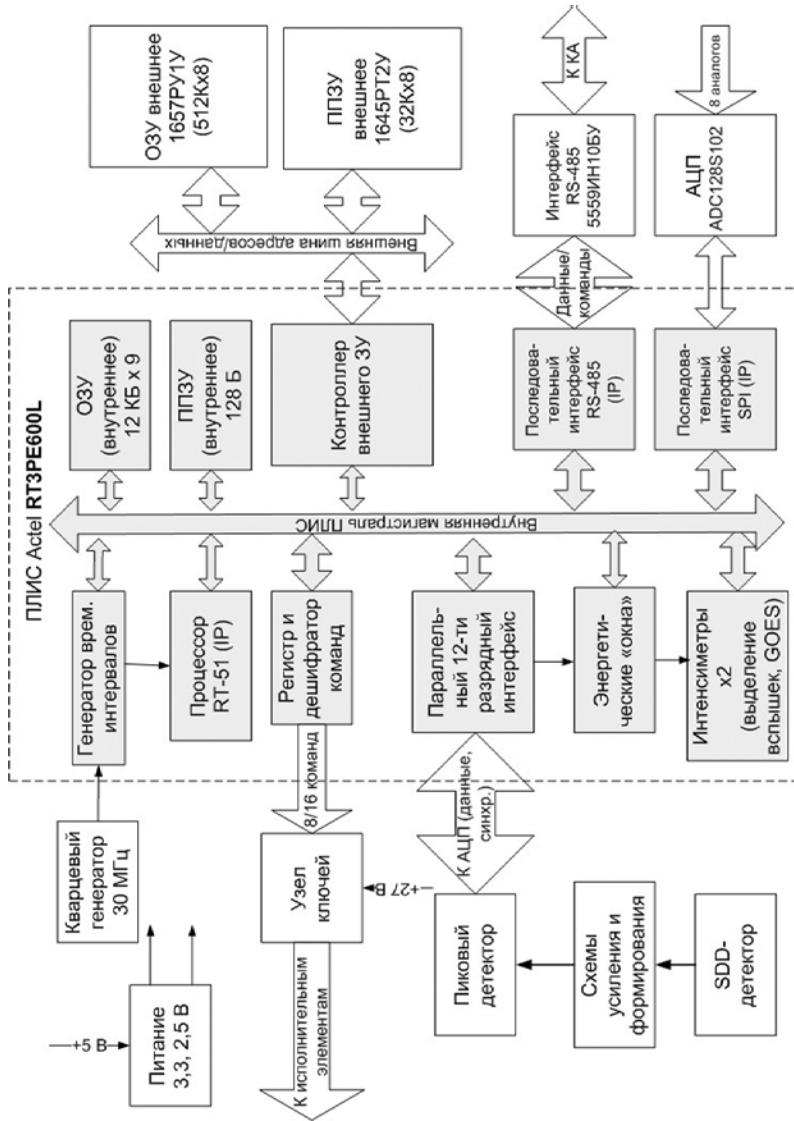


Рис. 5. Структура контроллера «Гидромет»

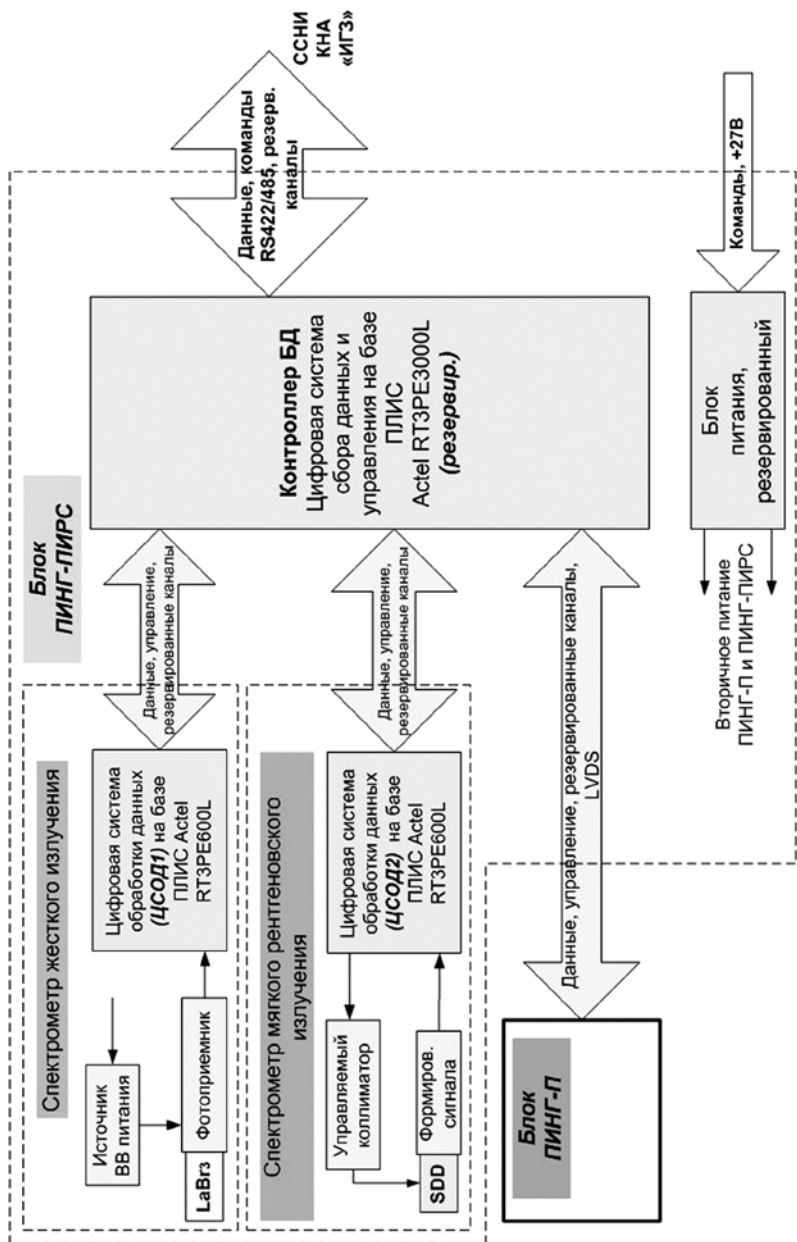


Рис. 6. Структура эксперимента «ПИНГ-М»

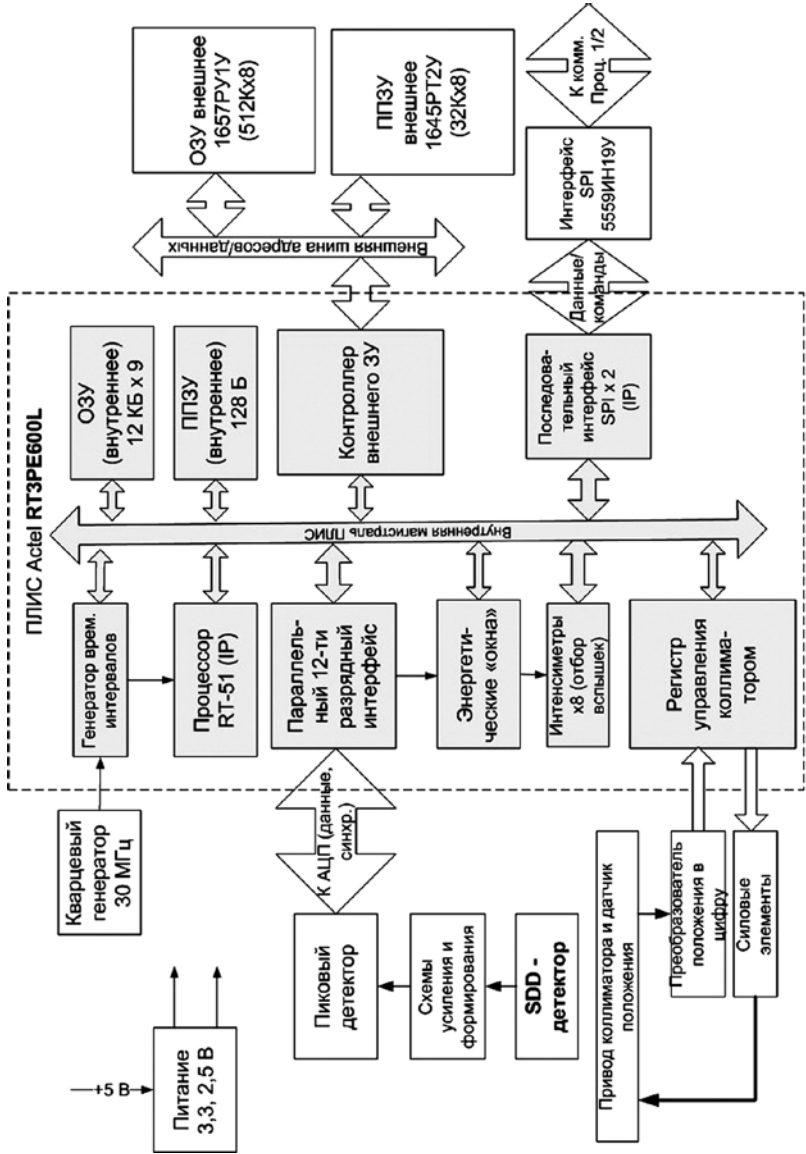


Рис. 7. Структура ЦСОД1 прибора «ПИНГ-М»

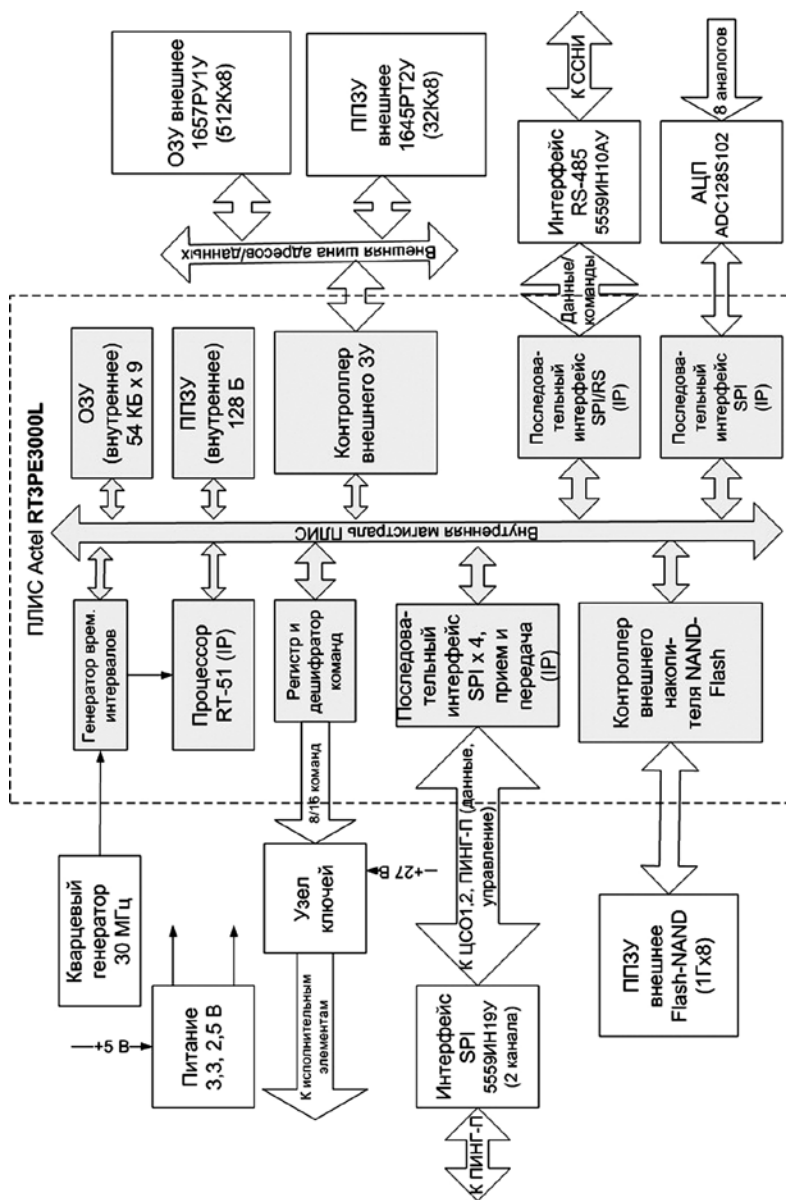


Рис. 8. Структура контроллера ПИНГ-ПИРС прибора «ПИНГ-М»

**Контроллеры научных приборов для космических экспериментов ГРИС-ФКИ-1 и «ПИНГ-М»**

**Таблица 4.** Сводные характеристики контроллеров

Параметр\контроллер	ГРИС-БД	«Гидро-мет»	ПИНГ-ПИРС	ПИНГ-ЦСОД2	ПИНГ-ЦСОД1
Тип ПЛИС	RT3PE600L	RT3PE600L	RT3PE3000L	RT3PE600L	RT3PE600L
Ядро	RT-51	RT-51	RT-51	RT-51	RT-51
ОЗУ внутр., КБ	12	12	54	12	12
Параметр\контроллер	ГРИС-БД	«Гидро-мет»	ПИНГ-ПИРС	ПИНГ-ЦСОД2	ПИНГ-ЦСОД1
ППЗУ внутр., Б	128	128	128	128	128
ОЗУ внеш., КБ	512	512	512	512	512
ППЗУ внеш., КБ	32	32	32	32	32
Таймеры	+	+	+	+	+
Контр. внеш. ЗУ	+	+	+	+	+
Интенсиметры, кан.,	2	2	–	8	8
в т.ч. с «окнами»	2	2	–	До 8	До 8
Интерфейсы SPI,	6 (2?)	1	5	2	2
в т.ч. TM-AЦП (SPI)	1	1	1	–	–
Интерфейсы RS	2 (0?)	2	2	–	–
Дешифратор команд	8-16	8-16	8-16	–	–
Парал. порт 12 р. (для АЦП)	–	1	–	1	1
Контроллер Flash	–	–	1	–	–
Управление коллиматором	–	–	–	–	1

Примечание: в таблице со знаком вопроса даны параметры, не согласованные к настоящему времени.

Помимо уже описывавшихся ранее каналов внутренней аналоговой телеметрии (АЦП), интерфейсов с системой сбора научной информации (ССНИ), внутреннего регистра и генератора импульсных команд в состав контроллера входят 3 SPI-подобных канала обмена данными с ЦСОД1,2 и с блоком ПИНГ-П. Особенность данного контроллера — появление дополнительного Flash-ППЗУ емкостью 1 Гб, обусловленное траекторными особенностями эксперимента ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, когда на длительный срок (порядка двух недель) будет отсутствовать связь с Землей. Поэтому для сохранения основных данных в период радиомолчания вводится дополнительное ППЗУ.

Таким образом, коротко рассмотрев возможности построения контроллеров приборов и систем на основе ПЛИС RT ProASIC3, мы видим, что при небольшом энергопотреблении на этих ПЛИС можно реализовать большое число устройств для различных экспериментов. В табл. 4 приведены сводные данные по контроллерам, темным выделены общие для группы контроллеров свойства, светлым — индивидуальные.

Как следует из данных табл. 4, большинство технических решений является общим для рассматриваемых контроллеров.

## **Выводы**

Несмотря на различия в конфигурации приборов представляется возможным максимально унифицировать технические решения, используемые при создании аппаратуры и, как следствие, оптимизировать расходы, связанные с разработкой аппаратных и программных средств электронных систем. Подобная унификация, несомненно, положительно отразится на качестве отработки аппаратуры, когда уже проверенные и верифицированные решения будут мигрировать из одного проекта в другой.

## **Литература**

[Гляненко и др., 2012] *Гляненко А. С., Котов Ю. Д., Юров В. Н., Луларь Е. Э., Трофимов Ю. А., Рубцов И. В., Жучкова Е. А., Кочемасов А. В.* Прецизионная спектрометрия мягкого и жесткого рентгеновского излучения Солнца прибором ПИНГ-М в проекте ИНТЕРГЕЛИОЗОНД // Труды рабочего совещания по проекту ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, Таруса, 11–13 мая 2011. Троицк, Моск. обл.: ИЗМИРАН, 2012. С. 65–75. Серия «Механика, управление и информатика».

[Котов и др., 2012а] *Котов Ю. Д., Гляненко А. С., Юров В. Н., Жучкова Е. А., Умнова О. Н., Дергачев В. А., Круглов Е. М., Матвеев Г. А., Лазутков В. П., Скородумов Д. В., Савченко М. И.* Поляриметрия жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек // Труды рабочего совещания по проекту ИНТЕРГЕЛИОЗОНД, Таруса, 11–13 мая 2011. Троицк, Моск. обл.: ИЗМИРАН, 2012. С. 76–87. Серия «Механика, управление и информатика».

[Котов и др., 2012б] *Котов Ю. Д., Юров В. Н., Гляненко А. С., Кочемасов А. В., Луларь Е. Э., Трофимов Ю. А., Рубцов И. В., Жучкова Е. А., Тышкевич В. Г., Орешников Е. М., Туманов А. В., Лягушин В. И.* Рентгеновский



и гамма-спектрометр «ГРИС-ФКИ-1» на Российском сегменте Международной космической станции // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2012. Т. 1. № 2. С. 139–145.

[НИИЭТ, 2012] Информационно-справочные материалы с сайта НИИЭТ. URL: <http://www.niiet.ru/>.

[Миландр, 2012] Информационно-справочные материалы с сайта компании ЗАО ПКК «Миландр». URL: <http://www.milandr.ru/>.

[Элвис, 2012] Информационно-справочные материалы с сайта компании ОАО НПЦ «Элвис». URL: <http://multicore.ru/>.

[Интеграл, 2012] Информационно-справочные материалы с сайта компании ОАО «Интеграл». URL: <http://www.integral.by/>.

[Actel, 2012] Информационно-справочные материалы с сайта компании Actel. URL: <http://www.actel.com/>.

## **CONTROLLERS FOR SCIENTIFIC INSTRUMENTS FOR SPACE EXPERIMENTS GRIS-FKI-1 AND «PING M»**

**A. S. Glyanenko**

***National Research Nuclear University “MEPhI” (NRNU MEPhI),  
Moscow***

In this paper is discussed the structure of controllers for some of scientific instruments, the choice of an element base and possibility of unification of technical solutions when creating controllers of the scientific equipment for space experiments, prepared by the National Research Nuclear University “MEPhI”.

**Keywords:** controller of scientific instrument, microelectronic element base, microcontrollers, programmable logic integrated circuit, space experiment, radiation resistance, unification.

---

***Glyanenko Alexander Stepanovich*** – Head of the Scientific Group NRNU MEPhI, PhD, [asgl2005@rambler.ru](mailto:asgl2005@rambler.ru).

# ОРГАНИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ, СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПРОЕКТА РЕЗОНАНС

*А. В. Семенов, А. В. Никифоров, Д. Г. Тимонин,  
К. В. Ануфрейчик, И. В. Чулков*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт космических исследований  
Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва*

В данной статье рассматривается вариант организации хранения данных, применяемый в системе управления, сбора и передачи информации (СУСПИ) проекта РЕЗОНАНС.

Рассматриваются типы информации, ее распределение на дисках, возможные варианты скоростей записи-чтения.

Приводятся варианты по увеличению скоростей записи-чтения в несколько раз при минимальных доработках программно-аппаратной части.

**Ключевые слова:** система сбора научной информации, хранение данных, FLASH-память, оптимизация.

Проект РЕЗОНАНС – большой международный проект, участие в котором принимают 6 стран – Россия, Чехия, Польша, Болгария, Словакия, Украина. Помимо международной значимости, проект РЕЗОНАНС – уникален в научном плане, его целями являются:

- изучение взаимодействия волн и частиц во внутренней магнитосфере Земли;
- определение динамических характеристик магнитосферного циклотронного мазера;
- изучение динамики кольцевого тока — его формирования и распада, а также восстановления плазмосферы после геомагнитных возмущений;
- определение роли мелкомасштабных электродинамических структур в глобальной динамике магнитосферной плазмы.

---

*Семенов Александр Викторович* – ведущий программист,  
8-916-528-95-44, asemenov@iki.rssi.ru

*Никифоров Андрей Владимирович* – ведущий инженер,  
8-926-353-80-18, nikiforov@iki.rssi.ru,

*Тимонин Денис Геннадиевич* – главный специалист,  
8-916-924-26-99, timonin@iki.rssi.ru

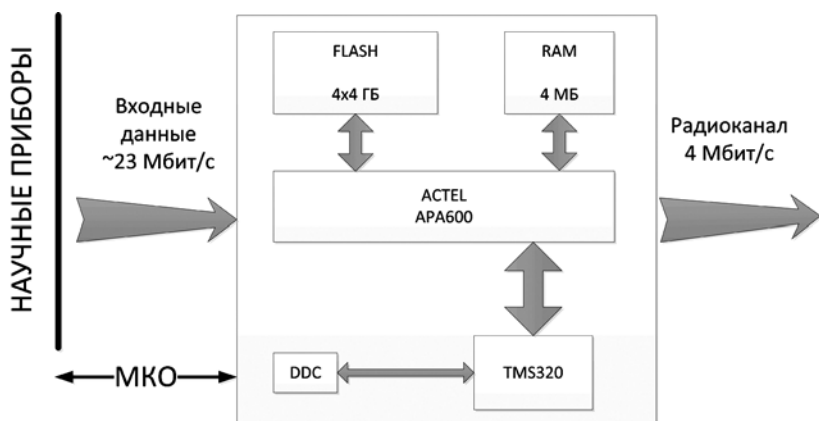
*Ануфрейчик Константин Владимирович* – начальник лаборатории 711,  
8-903-125-76-11, kos@iki.rssi.ru

*Чулков Илья Владиленович* – заместитель директора ИКИ РАН,  
8-916-127-77-19, chulkov@cosmos.ru

При проведении измерений задействование научных приборов осуществляется в зависимости от участка орбиты космического аппарата. За сутки спутники осуществляют три оборота вокруг Земли. Основные измерения комплексом научной аппаратуры производятся в приэкваториальной и авроральной областях.

Вероятность безотказной работы космического аппарата (КА) «Резонанс», без учета комплекса научной аппаратуры в течение 5 лет, должна быть не менее 0,95, такая же вероятность безотказной работы должна обеспечиваться и для комплекса научной аппаратуры проекта РЕЗОНАНС при работе по штатной циклограмме в течение 5 лет.

Система управления, сбора и передачи информации (СУСПИ) является одной из критически важных систем, от функционирования которой зависит научная ценность всего проекта РЕЗОНАНС.



**Рис. 1.** Общая схема работы:

МКО — мультиплексный канал информационного обмена бортовых, цифровых и вычислительных систем,  
DDC — микросхема поддержки МКО

Система управления, сбора и передачи информации осуществляет опрос научных приборов, сбор и сохранение данных в энергонезависимой FLASH-памяти, выдачу управляющих команд в приборы и накопленной информации — в бортовой радиоконплекс (рис. 1).

На аппаратном уровне в СУСПИ применяются сертифицированные микросхемы, разрешенные для использования в космосе:

- ПЛИС APA600 фирмы ACTEL;
- микропроцессор TMS320 фирмы Texas Instruments;
- модуль RAM фирмы Austin Semiconductor;
- микросхема поддержки интерфейса МКО фирмы DDC.

Для обеспечения повышенной надежности в СУСПИ предусмотрено два полноценных комплекта (основной и резервный), работающих в «холодном» резерве.

С программной точки зрения повышенная надежность обеспечивается, помимо проверенных и отлаженных алгоритмов, многократным резервированием программного кода и гибким алгоритмом загрузки программного обеспечения.

Характеристики СУСПИ:

- скорость передачи информации бортовым радиокomплексом – 4 Мбит/с;
- максимальное энергопотребление блока СУСПИ – 7 Вт;
- размер внутренней FLASH-памяти – 16 ГБ;
- «входной» поток данных от научных приборов – не более 23 Мбит/с.

### **Хранение информации и типы кадров**

Для хранения данных используются микросхемы FLASH-памяти фирмы Samsung объемом 4 ГБ. В каждом полукomплекте установлены 4 такие микросхемы, что позволяет сохранять 16 ГБ данных. Эти микросхемы логически объединены в единый объем памяти, образующий кольцевой буфер.

В СУСПИ существует 3 типа кадров данных – научной информации (НИ), служебной информации (СИ), таблицы «плохих» блоков (ТПБ).

В кадрах НИ содержатся данные, передаваемые от научных приборов. У каждого прибора есть идентификатор, позволяющий однозначно определить принадлежность кадра к тому или иному научному прибору.

В кадрах СИ содержатся основные параметры работы системы, такие как текущий код бортового времени (КБВ), последние указатели чтения и записи данных, количество плохих блоков на FLASH-дисках и т.д. Эта информация используется при загрузке системы, для нахождения последнего записанного блока, а также разработчиками СУСПИ для оценки состояния внутренних узлов блока. Кадры СИ хранятся в двух копиях на первой странице каждого блока FLASH-диска.

Кадры ТПБ FLASH-дисков используются для диагностики состояния СУСПИ. Эта таблица используется программным обеспечением блока СУСПИ в процессе работы, а также разработчиками СУСПИ для анализа ситуации с системой хранения данных и принятия необходимых мер в случае нештатных ситуаций, таких как, к примеру, деградация одного или нескольких FLASH-дисков.

Каждый кадр состоит:

- из маркера, позволяющего отличить его от других кадров;
- времени получения данных (в случае кадров НИ), либо времени записи (в случае кадров СИ и ТПБ);

- порядкового номера кадра, для контроля целостности информации на Земле;
- контрольной суммы CRC16-ССИТ.

### Скорость записи и считывания информации

Система хранения данных СУСПИ разработана таким образом, что с помощью небольшого числа параметров можно легко варьировать скорости записи и чтения информации в зависимости от задачи.

Основные параметры, настраиваемые в системе, – это параметры цикла запись-чтение (рис. 2):

- количество записей в одном цикле записи-чтения – обычно от 1 до 2;
- количество считываний в одном цикле записи-чтения – обычно от 1 до 7;
- размер записываемого блока – 2048 или 4096 байт.

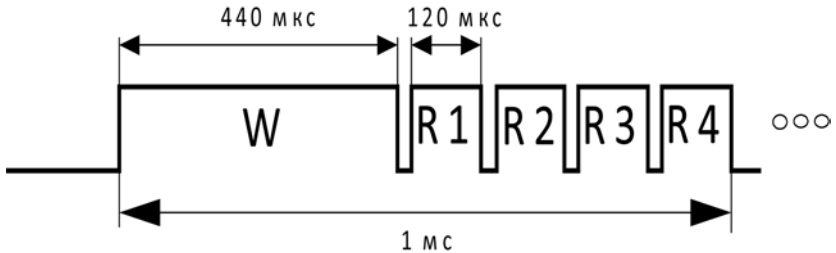


Рис. 2. Цикл запись-чтение

В системах, где необходима большая скорость чтения данных с FLASH-дисков (скорость выдачи в радиоканал), можно увеличивать количество считываний в одном цикле записи-чтения: если необходима большая скорость записи – можно увеличить количество записей в одном цикле записи-чтения, а также увеличить размер записываемого блока с 2048 до 4096 байт.

Время программирования одной страницы (примерно 240 мкс), без учета дополнительных операций, в этих микросхемах не зависит от объема переданных данных (см. таблицу). Остальное время тратится на пересылку данных и дополнительные, менее ресурсоемкие операции.

Объем данных, байт	Время пересылки в микросхему, мкс	Общее время программирования страницы, мкс
2048	120	490
4096	240	660

Для исследования возможностей системы был построен график зависимости скоростей записи-чтения от размера блока и количества считываний в одном цикле записи-чтения (рис. 3).

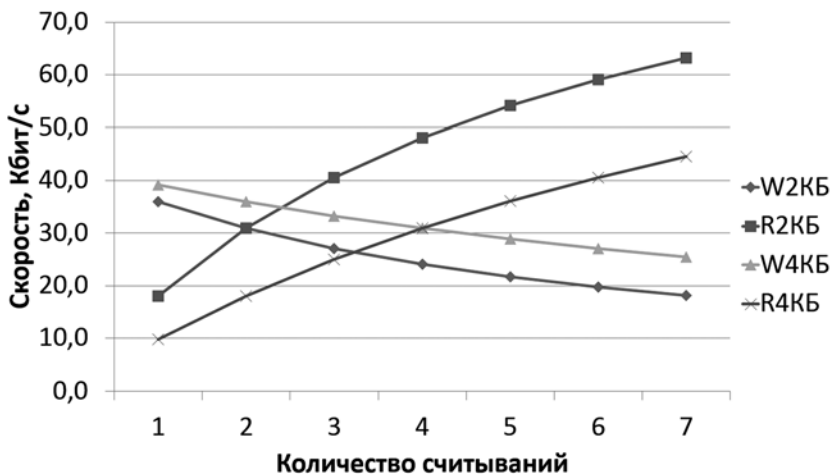


Рис.3. Зависимость скорости записи–чтения от количества считываний

По данным рис. 3 можно наглядно оценить, какие оптимальные параметры необходимо установить в системе для достижения необходимого результата. На графике представлены кривые для различных режимов работы системы:

- кривая W2KB — описывает зависимость скорости записи от количества считываний при записи блока в 2048 байт;
- кривая R2KB — описывает зависимость скорости чтения при записи блока в 2048 байт;
- кривые W4KB и R4KB — аналогично, но при записи блока размером 4096 байт.

К примеру, если необходимо построить систему, которая должна записывать и считывать (выдавать) поток данных в радиоканал со скоростью примерно 30 Мбит/с, можно выбрать следующие параметры системы — записывать блок размером 4 КБ и считывать 5 блоков по 2048 байт (кривые W4KB и R4KB, рис. 3).

## Заключение

В итоге, благодаря гибкой системе настроек модуля хранения информации, в СУСПИ удалось добиться оптимальных характеристик для решения текущих задач, а также использовать этот модуль в других высоконагруженных проектах.

На данный момент эта система работает в проекте, где входной поток (запись) информации составляет 20 Мбит/с, а выходной (чтение) — 70 Мбит/с. При этом запись и чтение происходят одновременно. Для увеличения производительности в разы необходимы минимальные аппаратные и программные доработки. К примеру, если сейчас все FLASH-диски используют один интерфейс передачи

данных, то распараллеливание интерфейсов приведет к пропорциональному росту производительности системы.

Благодаря гибкому управлению работающими чипами памяти удалось создать энергоэффективную и надежную систему, позволяющую отключать неиспользуемые микросхемы либо блокировать их использование в случае выхода из строя.

## **DATA STORING IN CONTROL, ACQUISITION AND TRANSMISSION SYSTEM OF RESONANSE PROJECT**

***A. V. Semenov, A. V. Nikiforov, D. G. Timonin, K. V. Anufreychik,  
I. V. Chulkov.***

***Space Research Institute Russian Academy of Science,  
Moscow, Russian Federation***

This article discusses the option of data storage used in control, acquisition and transmission system (SUSPI) of RESONANSE project.

Describes the types of information, its distribution on disks, different possible read and write speeds. Provides options to increase the read/write speed in several times by minimal rework of software and hardware parts.

**Keywords:** control, acquisition and transmission system, data storage, FLASH-memory, optimizing.

---

***Semenov Alexander Victorovich*** – lead software engineer [asemenov@iki.rssi.ru](mailto:asemenov@iki.rssi.ru)

***Nikiforov Andrey Vladimirovich*** – lead engineer [nikiforov@iki.rssi.ru](mailto:nikiforov@iki.rssi.ru)

***Timonin Denis Gennadievich*** – chief specialist [timonin@iki.rssi.ru](mailto:timonin@iki.rssi.ru)

***Anufreichik Konstantin Vladimirovich*** — head of laboratory [kos@iki.rssi.ru](mailto:kos@iki.rssi.ru)

***Chulkov Ilya Vladilenovich*** — deputy director [chulkov@iki.rssi.ru](mailto:chulkov@iki.rssi.ru)

# СТРУКТУРА ДАННЫХ И ВЫРАБОТКА ТРИГГЕРОВ В АППАРАТУРЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

*В. В. Богомолов, С. И. Свертилов, Дж. Ф. Смут-III,  
А. М. Амелюшкин, Н. Н. Веденькин, А. Г. Рудницкий,  
Е. А. Шилова*

*Московского государственного университета  
имени М. В. Ломоносова Научно-исследовательский  
институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
(НИИЯФ МГУ), Физический факультет, Лаборатория  
экстремальной Вселенной*

В гамма-спектрометрах для исследования всплесков гамма-излучения, разрабатываемых в НИИЯФ МГУ, используются фосвич-детекторы на основе комбинации кристаллов NaI(Tl) и CsI(Tl) различной толщины. Электронные схемы спектрометра реализуют раздельное интегрирование начальной и конечной части импульса фотоэлектронного умножителя и последующую оцифровку соответствующих сигналов для цифровой обработки. Сравнение этих сигналов позволяет обеспечить надёжное разделение событий в сцинтилляторах от 10 кэВ. Для определения энергии используется квадратичное суммирование. Информационный узел прибора формирует несколько типов выходных кадров: временные ряды, амплитудные спектры и подробную запись отклика детектора для определенного числа событий. Кроме того, информационный узел вырабатывает триггер всплеска путём сравнения измеренного числа событий определенного типа с ожидаемым в случае его превышения на заданное число стандартных отклонений, вычисленных по предшествующему ряду. Границы энергетических интервалов, уровни значимости для всплеска и другие настраиваемые параметры могут быть скорректированы цифровыми командами в ходе космического эксперимента. Информативность прибора составляет ~34 МБ в сутки постоянно и ~2 МБ на каждый всплеск.

**Ключевые слова:** гамма-всплеск, космический эксперимент, фосвич-детектор, калибровка, схема разделения, триггер всплеска, структура информации.

---

*Богомолов Виталий Владимирович* – старший научный сотрудник,  
vit\_bogom@nm.ru

*Свертилов Сергей Игоревич* – ведущий научный сотрудник, sis@coronas.ru

*Джордж Фицджеральд Смут-III* – зав. лабораторией, gfsmoot@lbl.gov

*Амелюшкин Александр Михайлович* – ведущий электроник, ptlink@gmail.com

*Веденькин Николай Николаевич* – старший научный сотрудник,  
vnn.space@gmail.com

*Рудницкий Алексей Георгиевич* – студент, almax1024@gmail.com

*Шилова Елена Александровна* – студент, fakil313@yandex.ru



## **Введение**

В НИИЯФ МГУ ведется подготовка ряда космических экспериментов по исследованию всплесков жесткого рентгеновского и гамма-излучения различной природы. Один из основных космических проектов МГУ – спутник «Михайло Ломоносов», который предназначен для проведения исследований в области астрофизики высоких энергий, в том числе для изучения космических лучей сверхвысоких энергий, а также для изучения астрофизических гамма-всплесков. Для обнаружения гамма-всплесков и определения их спектральных и временных характеристик в гамма-диапазоне разработан гамма-спектрометр БДРГ (Блоки Детектирования Рентгеновского и Гамма-излучения). Этот спектрометр имеет три блока детектирования площадью  $\sim 130 \text{ см}^2$  каждый, оси которых отстоят на  $90^\circ$  друг от друга, что дает возможность оценить положение источника гамма-всплеска на небе с точностью в несколько градусов. Рабочий диапазон энергий спектрометра БДРГ составляет от 10 кэВ до 3 МэВ.

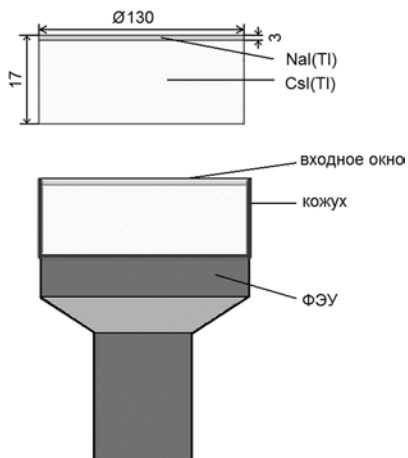
Ещё один комплекс приборов, разработанных сотрудниками НИИЯФ МГУ, — научная аппаратура «РЭЛЕК», — предназначена для изучения всплесков жёсткого излучения, связанных с грозовой активностью, а также возможной связи высотной грозовой активности с высыпаниями релятивистских электронов. В состав комплекса входит прибор ДРГЭ (Детектора Рентгеновского, Гамма-излучения и Электронов), использующий детекторы гамма-излучения, аналогичные описанным выше. Этот комплекс аппаратуры будет установлен на космическом аппарате МКА ФКИ №2.

Задачи каждого из перечисленных приборов включают в себя постоянный мониторинг потоков жесткого рентгеновского и мягкого гамма-излучения, обнаружение всплесковых событий, отбор всплесков исследуемой природы, быстрый тайминг в жестком диапазоне, передачу триггера всплеска на другие научные приборы, установленные на космическом аппарате.

## **Устройство и принцип работы гамма-спектрометра**

Для оптимизации чувствительности детектора при выполнении описанных задач было решено использовать составные детекторы на основе сцинтилляционных кристаллов различного типа, находящихся в оптическом контакте друг с другом и просматриваемых одним фотоэлектронным умножителем. Сцинтиллятор, с которым произошло взаимодействие, может быть определен путём анализа формы выходного импульса ФЭУ. Детекторы, построенные на подобном принципе, называются фосвич-детекторами.

Каждый из детекторов, использованных в приборах НИИЯФ МГУ, перечисленных выше, представляет собой сборку тонкого (3 мм) кристалла  $\text{NaI(Tl)}$  и относительно толстого (17 мм) кристалла  $\text{CsI(Tl)}$  (рис.1). Толщина  $\text{NaI(Tl)}$  оптимальна для мягкой части энергетического диапазона. Кристалл  $\text{CsI(Tl)}$  играет роль активной защиты, понижающей фон, для мягкого излучения, являясь в то



**Рис. 1.** Детектор гамма-излучения

же время основным детектором для более жёстких гамма-квантов. Диаметр детектора, равный 130 мм, позволяет обеспечить достаточную площадь, определяющую чувствительность прибора при регистрации всплесков.

Электроника прибора позволяет определять слой детектора, с которым произошло взаимодействие, по форме импульса ФЭУ, измерять энерговыделение в каждом событии и формировать выходные массивы научной информации. Блок-схема, иллюстрирующая работу прибора, показана на рис. 2.

Для надёжного разделения случаев взаимодействия в кристаллах NaI(Tl) и CsI(Tl) в широком диапазоне энергий (для  $E > 10$  кэВ) в электронной плате узла оцифровки события используется раздельное интегрирование сигнала с выхода ФЭУ за время начальной части импульса тока и последующей части, реализованное с помощью активных КМОП-ключей. Сформированные электрические сигналы, имеющие амплитуду, пропорциональную сигналу ФЭУ, собранному за начало импульса (~800 нс) и за его последующую часть («быстрая компонента» и «медленная компонента»), оцифровываются АЦП последовательных приближений.

Параллельные коды соответствующих компонент приходят на «Узел информации» одновременно с «Запросом на обработку». Входящая в состав этого узла «Схема обработки события» на основе считанных кодов определяет амплитуду и место взаимодействия, которые передаёт на «Схему формирования выходной информации», формирующую выходные кадры, идущие с прибора в бортовые системы для последующей передачи на Землю.

Следует отметить, что «Узел информации» может быть выполнен как в корпусе детекторного блока, так и в виде отдельного блока электроники. Кроме передачи выходной информации этот узел осуществляет управление питанием и отработку команд. В частности, с помощью набора цифровых команд могут корректироваться пороговые значения энергетических интервалов, используемых при формировании мониторинговых временных рядов.

Процессор блока анализа, считывая по прерыванию от каждого из трёх детекторных блоков данные о зарегистрированных событиях, формирует кадры научной информации и вырабатывает триггер гамма-всплеска. Кадры научной информации представляют

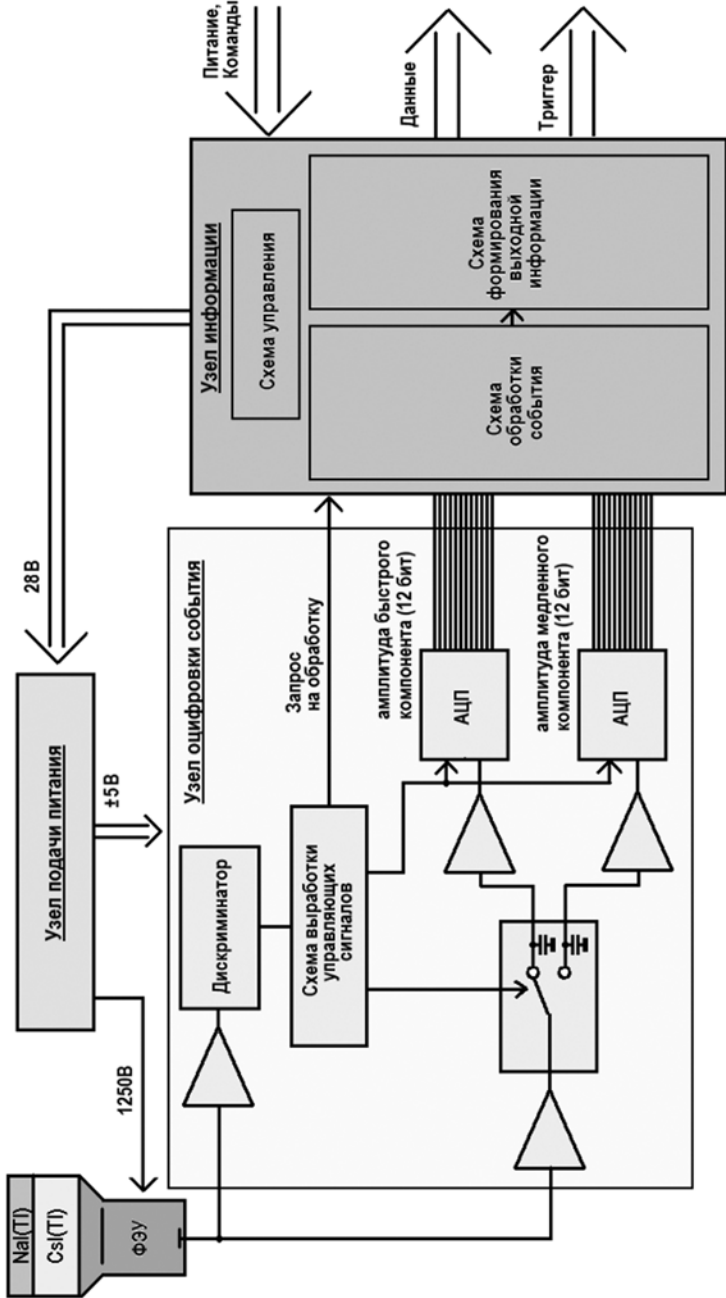
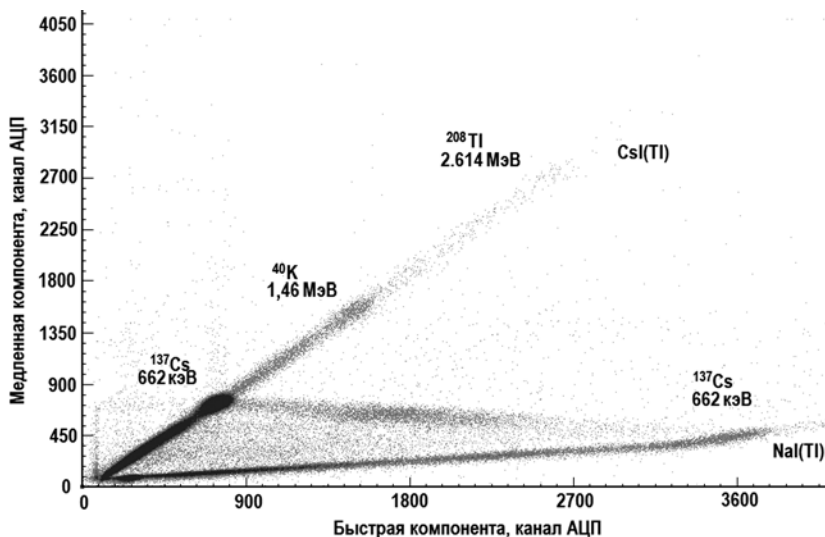


Рис. 2. Блок-схема функционирования прибора

собой упакованные определенным образом массивы данных нескольких типов. Данные типа «Мониторинг» представляют собой временные ряды, составленные из числа событий с определенным энерговыделением в заданной части детектора (NaI(Tl) или CsI(Tl)). Другой тип данных – кадр «Спектр» – содержит подробные энергетические спектры для каждого из детекторных блоков.

### **Принцип определения энерговыделения и калибровка фосвич-детектора**

Для описания процедуры определения энергии по показаниям прибора представим выходные данные узла оцифровки события в виде двумерной диаграммы, на которой точками отображаются события с определенными кодами быстрого компонента (откладывается по оси X) и медленного компонента (откладывается по оси Y). Пример такой диаграммы для измерения с изотопом  $^{137}\text{Cs}$  приведен на рис. 3. На диаграмме видны нижняя ветвь, соответствующая событиям в NaI(Tl), и верхняя, соответствующая событиям в CsI(Tl). Область между ветвями заполнена событиями с энерговыделением в обоих детекторах, возникающими при комптоновском взаимодействии гамма-квантов. Кроме линии 662 кэВ от изотопа  $^{137}\text{Cs}$  на диаграмме хорошо прослеживается пятно от фонового излучения изотопа  $^{40}\text{K}$  (1,46 МэВ) и слабо выраженное пятно от изотопа  $^{208}\text{Tl}$  (2,614 МэВ), являющегося одним из дочерних изотопов при распаде  $^{232}\text{Th}$ .



**Рис. 3.** Двумерная диаграмма, на которой точками отображаются события с определенными кодами быстрого компонента (откладывается по оси X) и медленного компонента (откладывается по оси Y), полученная для измерения с изотопом  $^{137}\text{Cs}$

При обработке каждого из событий по соотношению быстрого и медленного компонентов определяется место взаимодействия. Для определения энергии вычисляется расстояние от нулевой точки, т.е. точки пересечения ветвей диаграммы, до точки, на которой отмечено событие. Для каждого события вычисляется эффективный номер канала  $N$  по формуле

$$N = \sqrt{(B - B_0)^2 + (M - M_0)^2}$$
, где  $B$  и  $M$  – амплитуды быстрого и медленного компонентов, а  $B_0$  и  $M_0$  – координаты нулевой точки. После этого значение  $N$  проверяется на принадлежность одному из энергетических интервалов, из которых формируются временные ряды.

Пороговые значения для энергетических интервалов мониторинговых кадров определяются по результатам калибровки, цель которой – найти величину  $N$  для определенных значений энергии. Рассмотрим подробно процесс калибровки на примере прибора БДРГ, разработанного для проведения эксперимента по исследованию космических гамма-всплесков на борту космического аппарата «Михайло Ломоносов». В состав прибора входят три одинаковых детекторных блока описанной выше конфигурации.

Для проведения калибровок были набраны массивы пар кодов быстрой и медленной компонент при регистрации гамма-излучения от радиоактивных источников, перечисленных в табл. 1.

**Таблица 1.** Список калибровочных изотопов

Изотоп	Энергия, кэВ	Изотоп	Энергия, кэВ
<sup>241</sup> Am	26,34	<sup>60</sup> Co	1173
	59,54		1333
<sup>181</sup> Hf	57	<sup>207</sup> Pb	74
	133		569,7
	345,9		1063,7
	482,2		1770
<sup>137</sup> Cs	32	<sup>40</sup> K (фон)	1460
	661,7	<sup>208</sup> Tl (фон)	2614

Для каждой калибровочной линии гамма-излучения была определена величина эффективного номера канала  $N$ . Предварительно была определена нулевая точка (точка с координатами  $(B_0, M_0)$ , соответствующая местоположению точки пересечения линий NaI(Tl) и CsI(Tl) на двумерной диаграмме. Заметим, что эта точка определяется не характеристиками измеряемого излучения, а электроникой. На рис. 4 приведена двумерная диаграмма для <sup>137</sup>Cs в области малых энерговыделений. Нулевая точка на этом рисунке отмечена крестом. Пятно на линии NaI(Tl), соответствующее рентгеновскому излучению с энергией 32 кэВ, показывает, что разделение событий в сцинтилляторах может надёжно осуществляться начиная с  $E \approx 10$  кэВ.

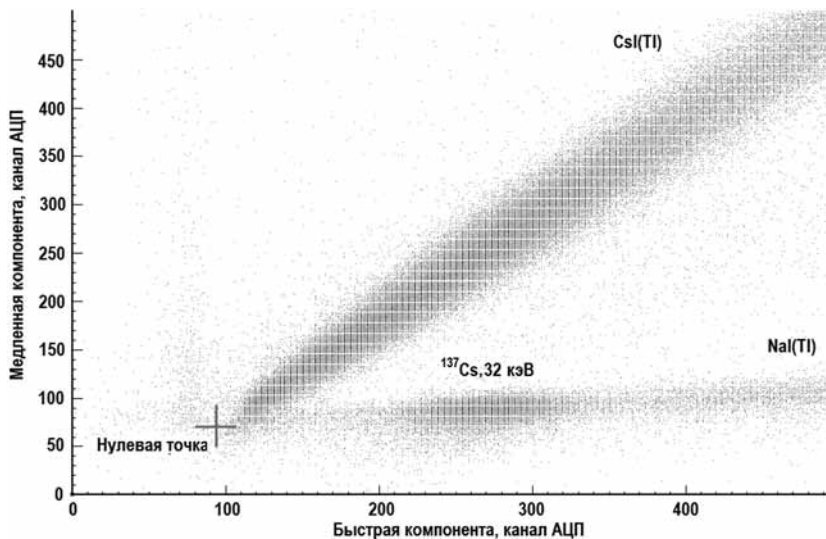


Рис. 4. Двумерная диаграмма для  $^{137}\text{Cs}$  в области малых энерговыделений

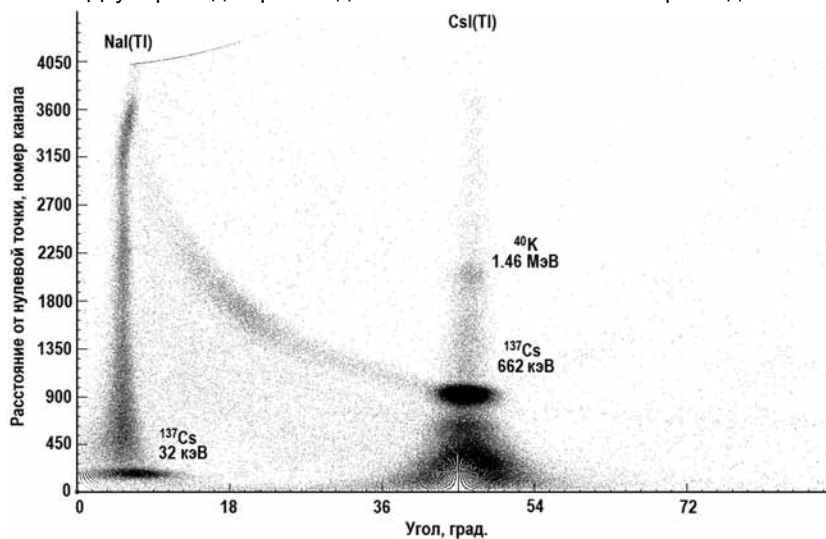
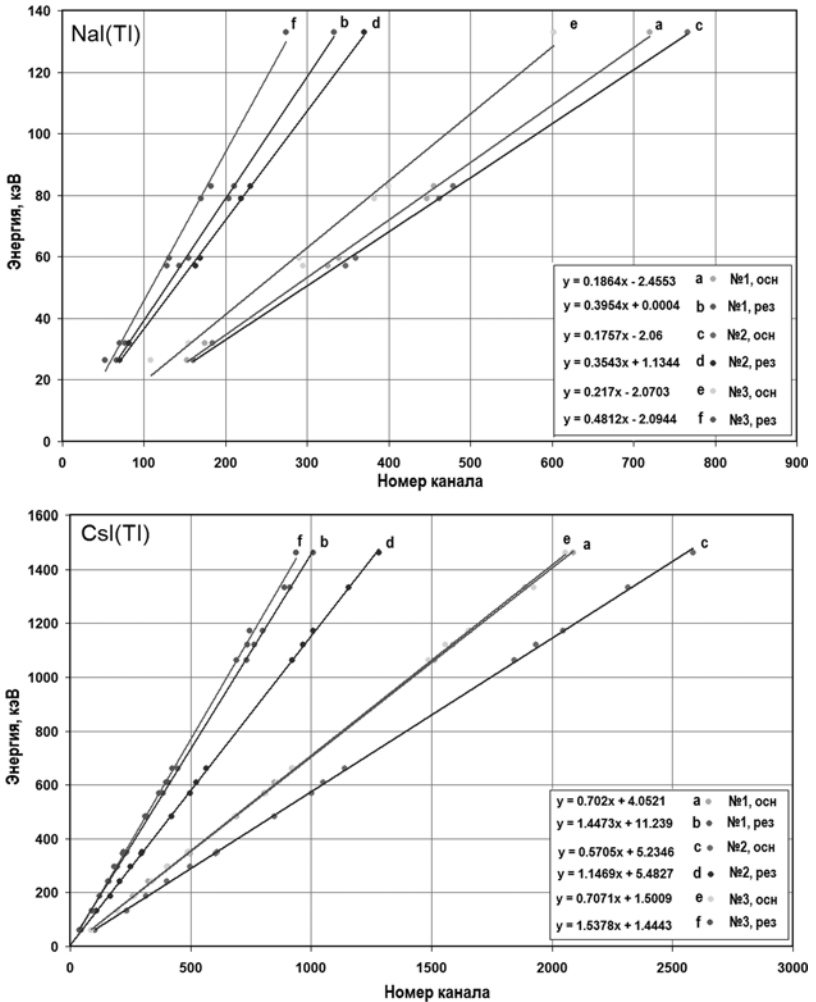


Рис. 5. Двумерная диаграмма в полярных координатах: по оси абсцисс откладывается угол наклона прямой, а по оси ординат – расстояние от нулевой точки

На рис. 5 представлена двумерная диаграмма в полярных координатах, на которой по оси абсцисс откладывается угол наклона прямой, а по оси ординат – расстояние от нулевой точки. Значение

## Структура данных и выработка триггеров в аппаратуре для исследования гамма-всплесков



**Рис. 6.** Графики калибровочных линейных зависимостей для трёх детекторных блоков прибора БДРГ для событий в NaI(Tl) и в CsI(Tl), а также для основного и резервного полуккомплектов источника питания ФЭУ

амплитуды, пропорциональной энергосвободению, на такой диаграмме соответствует величине ординаты и описывается простой линейной зависимостью. В результате калибровки детекторного блока сводится к определению методом наименьших квадратов коэффициентов в уравнении прямой линии  $E(N) = A \cdot N + B$ , где  $N$  — номер канала;  $E$  — энергия. Обратная линейная зависимость  $N(E) = A' \cdot E + B'$  удобна для расчёта значений пороговой энергии.

На рис. 6 показаны графики калибровочных линейных зависимостей для трёх детекторных блоков. Они рассчитаны отдельно для событий в кристаллах NaI(Tl) и в CsI(Tl), а также для основного и резервного полукомплектов источника питания ФЭУ, различающихся по величине выходного напряжения.

### **Алгоритм выработки триггера гамма-всплеска**

Узел информации генерирует триггер всплеска, анализируя данные, поступающие с каждого детекторного блока независимо, согласно описанному ниже алгоритму. Анализ производится независимо на нескольких временных масштабах. Для эксперимента по поиску космических гамма-всплесков были выбраны три характерных времени, связанных с физическими особенностями явления: 20 мс, 1 с и 20 с.

Алгоритм, вырабатывающий переход на режим записи всплеска, отличается для этих типов всплесков значениями времени и уровнем значимости (см. ниже). Этот алгоритм состоит в следующих проверках:

- проверка наличия роста показаний в выбранном канале нейтрального излучения;
- проверка отсутствия перегрузки;
- проверка, не вызван ли рост показаний тормозным излучением электронов.

После генерации триггера определенного типа в течение некоторого интервала времени, зависящего от типа триггера, происходит накопление всплесковых данных. Новый триггер всплеска того же типа может быть сформирован не раньше, чем закончится этот интервал времени. При этом накопление регулярно формируемых массивов, а также массивов данных для всплесков другого типа не прерывается, и формирование триггеров всплеска другого типа остаётся возможным.

#### **1. Проверка наличия роста показаний в канале нейтрального излучения**

В узле информации предусматривается кольцевая память, в которой хранится предыстория показаний общей скорости счёта детекторного блока в выбранном энергетическом интервале в виде набора коротких кадров с временным разрешением  $\Delta T$ , время хранения предыстории равно  $T_{\text{ист}} = 20 \cdot k \cdot \Delta T$ . Величина  $k$ , определяющая, во сколько раз лучше временное разрешение требуется при передаче данных по сравнению с проверкой критерия всплеска, принята равной  $k=20$ .

Каждый раз при наступлении следующего момента (прошло  $\Delta T$  с) определяются (рис. 7):

- число событий в выбранном канале за  $k \cdot \Delta T$ ; обозначим это число  $N_k$ ;



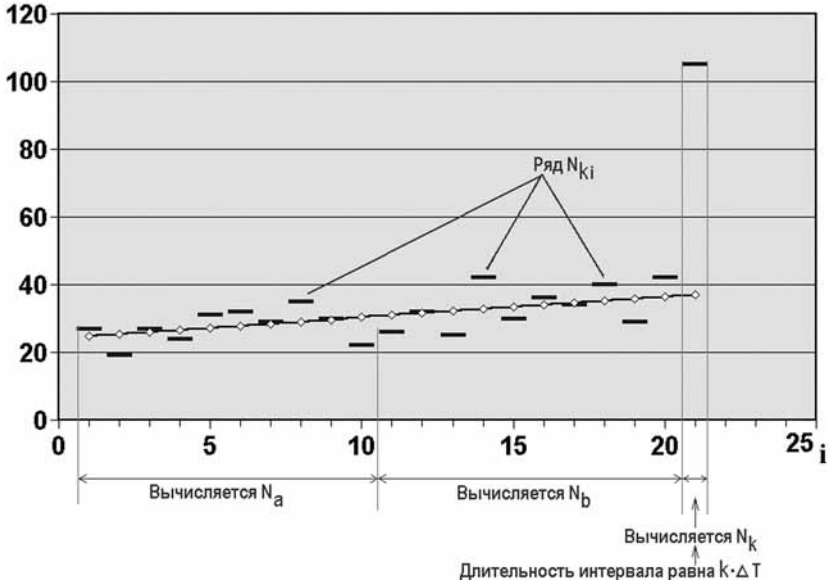


Рис. 7. Иллюстрация к алгоритму проверки наличия роста показаний в канале нейтрального излучения

- число событий в выбранном канале за предыдущий интервал  $10 \times k \times \Delta T$ ; обозначим это число  $N_b$ ;
- число событий в выбранном канале за предшествующий этому интервал длительностью  $10 \times k \times \Delta T$ ; обозначим это число  $N_a$ ;
- ряд, который составляют величины, аналогичные  $N_k$ , на всём интервале времени длиной  $20 \times k \times \Delta T$  перед интервалом вычисления  $N_k$  (это объединение двух предыдущих интервалов); обозначим ряд  $N_{ki}$  (всего 20 значений).

На основании этих величин вычисляется ожидаемое число событий за  $k \times \Delta T$ . Обозначим его как  $N_{k \text{ exp}}$ . Оно равно:

$$N_{k \text{ exp}} = \left\{ \begin{array}{l} N_b / 10, \text{ если } N_b \leq 30, \\ (N_b + N_a) / 20 + 10,5(N_b - N_a) / 10, \text{ если } N_b > 30 \end{array} \right\}.$$

Вычисляется величина  $\sigma$ , представляющая собой стандартное отклонение ряда  $N_{ki}$  от ожидаемых значений. Для этого вычисляется ряд ожидаемых значений  $N_{ki \text{ exp}}$  по формуле:

$$N_{ki \text{ exp}} = \left\{ \begin{array}{l} (N_b + N_a) / 20, \text{ если } N_b \leq 30, \\ (N_b + N_a) / 20 - (10,5 - i) \times (N_b - N_a) / 10, \text{ если } N_b > 30 \end{array} \right\}.$$

Величина стандартного отклонения вычисляется как

$$\sigma = \sqrt{(\sum (N_{ki} - N_{ki \text{ exp}})^2) / 20}.$$

Сравниваются значения  $N_k$  и  $N_{k \text{ exp}}$ . Критерием формирования кадра «всплеск» служит следующее условие:

$$\left. \begin{array}{l} N_k > N_{k \text{ exp}} + N \times \sigma, \\ N_k > 2. \end{array} \right\}$$

Величина  $N$  представляет собой число стандартных отклонений, на которое должен резко возрасти измеряемый поток нейтрального излучения, чтобы был выработан триггер.

## **2. Проверка отсутствия перегрузки**

Условие отсутствия перегрузки состоит в том, что при средней за время  $10 \cdot k \cdot \Delta T$  (перед предполагаемым всплеском) скорости счета в выбранном канале более  $I_{\text{max}}$  имп/с переход на всплесковый режим не производится.

## **3. Проверка, не вызван ли рост показаний тормозным излучением быстрых электронов**

С целью проверки для двух энергетических интервалов определяется отношение скоростей счета в кристаллах  $\text{NaI(Tl)}$  и  $\text{CsI(Tl)}$ , составляющих активную защиту. Для гамма-всплесков и имитаций всплесков потоками электронов это соотношение будет различным, что обусловлено различием распределений падающего излучения по углу прихода.

Критерием гамма-всплеска может служить условие:

$$J_{\text{CsI(Tl), E1}} / J_{\text{NaI(Tl), E1}} > K \cdot J_{\text{CsI(Tl), E2}} / J_{\text{NaI(Tl), E2}}$$

где  $J_{\text{CsI(Tl), E1}}$ ,  $J_{\text{NaI(Tl), E1}}$ ,  $J_{\text{CsI(Tl), E2}}$  и  $J_{\text{NaI(Tl), E2}}$  — скорость счета в соответствующих кристаллах при энергиях  $E_1$  и  $E_2$ , предполагая  $E_2 > E_1$ . В реальном эксперименте для сравнения выбираются не отдельные значения  $E_1$  и  $E_2$ , а некоторые энергетические интервалы, и проверяемое условие принимает вид сравнения отношений числа событий с энерговыделением в этих интервалах, произошедших в различных частях детектора.

Если в комплекс бортовой аппаратуры входит отдельный детектор заряженных частиц, то его показания могут быть дополнительно использованы для наложения запрета на выдачу триггера гамма-всплеска при возрастании потоков электронов.

## **Структура информации, передаваемой на Землю**

Рассмотрим программное обеспечение, формирующее регулярные выходные информационные массивы, на примере прибора БДРГ. Оно включает три основные программы:

- 1) ежесекундного мониторинга;
- 2) формирования двумерных диаграмм;
- 3) сбора амплитудных спектров для событий в  $\text{NaI(Tl)}$  и в  $\text{CsI(Tl)}$ .

Каждая из этих программ через определенный интервал времени, равный 1с для программы мониторинга и 1мин для программ формирования двумерных диаграмм и спектров, дописывает в выходной файл, хранящийся в памяти информационного узла, очередную порцию данных в двоичном формате, которую мы будем далее называть информационным кадром. Каждый час выходные файлы закрываются и открываются новые. Имя открываемых файлов генерируется автоматически, представляя собой выраженное в шестнадцатеричной форме время создания этого файла в стандарте UNIX Time. Каждая программа записывает свои выходные файлы в соответствующий раздел памяти.

При разработке гамма-спектрометра БДРГ были разработаны и реализованы следующие алгоритмы работы программ и форматы выходных двоичных массивов.

**1. Кадр «Мониторинг»**

Программа мониторинга записывает выходную информацию кадрами, содержащими число событий за интервал времени в 16 каналов для каждого блока: в восьми энергетических интервалах для NaI(Tl) и в восьми энергетических интервалах для CsI(Tl). Номер энергетического интервала определяется из амплитуд «быстрого» и «медленного» компонентов, считываемых для каждого события, согласно следующему алгоритму:

1. Из считанных кодов АЦПБ и АЦПМ вычитаются пьедесталы – некоторые значения  $B_0$  и  $M_0$ , соответствующие нулевым амплитудам. Результат вычитания обозначим  $B_1$  и  $M_1$ .

2. Вычисляется сумма квадратов  $S = B_1^2 + M_1^2$ .

3. Значение  $S$  сравнивается с хранящимися в памяти границами интервалов. Число событий в том интервале, в границах которого лежит  $S$ , увеличивается на 1.

Программа, используемая в приборе БДРГ, позволяет работать с тремя детекторными блоками. Размер кадра в этом случае равен 106 байт. Структура кадров «Мониторинг» приведена в табл. 2.

**Таблица 2.** Структура кадров «Мониторинг»

Размер, байт	Название	Значение
2	Сигнатура	0xAE 0x51
4	Секунды	UT
2	Миллисекунды	0...999
2	NaI(Tl), блок 1, канал 0	0...65535
	...	
2	NaI(Tl), блок 1, канал 7	0...65535
2	NaI(Tl), блок 2, канал 0	0...65535
	...	
2	NaI(Tl), блок 2, канал 7	0...65535

Окончание табл. 2

2	NaI(Tl), блок 3, канал 0	0...65535
	...	
2	NaI(Tl), блок 3, канал 7	0...65535
2	CsI(Tl), блок 1, канал 0	0...65535
	...	
2	CsI(Tl), блок 1, канал 7	0...65535
2	CsI(Tl), блок 2, канал 0	0...65535
	...	
2	CsI(Tl), блок 2, канал 7	0...65535
2	CsI(Tl), блок 3, канал 0	0...65535
	...	
2	CsI(Tl), блок 3, канал 7	0...65535
2	CRC16	Контрольная сумма

## **2. Кадр «Двумерная диаграмма»**

Этот кадр представляет собой двумерную диаграмму, по осям которой отложены амплитуды быстрого и медленного компонентов. Каждое событие в детекторе на этой диаграмме отображается точкой. Анализ подобных диаграмм позволяет детально анализировать природу наблюдаемых возрастных показаний прибора, а также проводить калибровки в процессе реализации эксперимента.

В условиях ограничения объёма информации, передаваемой на Землю, рационально использовать в качестве «Двумерной диаграммы» коды амплитуды быстрого и медленного компонентов для определенного числа событий, из которых такая диаграмма может быть составлена. Кроме кодов амплитуды кадр «Двумерная диаграмма» должен содержать метки времени, позволяющие соотносить изменения на этой диаграмме с моментами изменения измеренного потока излучения, зафиксированными в кадрах «Мониторинг». С учетом этого был разработан и реализован следующий алгоритм (вариант для трёх блоков).

4. В начале кадра записываются метка и время начала в секундах и миллисекундах.

5. Внутри информативной части кадра последовательно располагаются три массива данных, каждый из которых относится к определенному детекторному блоку. Длина этих массивов кратна трём байтам, по умолчанию её можно считать равной 3000 байт на каждый массив (можно предусмотреть изменение длины массивов по команде с Земли).

6. Массив, относящийся к определенному блоку, состоит из последовательности трёхбайтных записей, содержащих либо коды АЦП быстрого и медленного компонентов зарегистрированного гамма-кванта ( $12 + 12 = 24$  бита), либо трёхбайтный маркер времени.

7. При регистрации гамма-кванта генерируется трёхбайтная запись, имеющая такую последовательность битов, составляющих коды АЦП «быстрого» и «медленного» компонентов: Q1-0, Q1-1, Q1-2...Q1-11, Q2-0, Q2-1...Q2-11

8. Маркер времени добавляется в последовательность с интервалом 100 мс. Он представляет собой стандартные три байта, значения которых практически никогда не совпадают с кодами для гамма-квантов (использовались значения 0x04 0x08 0x00).

9. Массивы для детекторов формируются независимо. Окончание их формирования определяется исчерпанием отведённого объёма памяти. Оно может быть не одновременным.

10. Если пришло время генерировать новый кадр, а какие-либо массивы ещё не набраны, то все недостающие значения заполняются нулями, старый кадр закрывается и начинается новый.

11. В конце добавляется контрольная сумма.

### **3. Кадр «Спектр»**

Кадры типа «спектр» представляют собой амплитудные спектры событий, произошедших за определенный интервал времени в заданной части детектора (NaI(Tl) или CsI(Tl)). Спектры формируются из амплитуд «быстрого» и «медленного» компонентов, считываемых для каждого события, согласно следующему алгоритму:

1. Из считанных кодов АЦПБ и АЦПМ вычитаются пьедесталы – значения  $B_0$  и  $M_0$ , соответствующие нулевым амплитудам. Результат вычитания обозначим  $B_1$  и  $M_1$ .

2. Для определения номера канала вычисляется сумма квадратов  $B_1$  и  $M_1$  из которой извлекается квадратный корень:  $N = \sqrt{B_1^2 + M_1^2}$ . Для 12-разрядных АЦП величина  $N$  может лежать в пределах от 0 до  $4096\sqrt{2}$ .

3. Учитывая сравнительно невысокое разрешение детектора с целью уменьшения объёма информации из «точного» номера канала  $N$  вычисляется «окончательный» номер канала  $N^*$  путём деления  $N$  на 8. Именно этот номер канала используется для набора спектра.  $N^*$  может принимать значения в интервале от 0 до 723.

4. Определяется, где было взаимодействие — в NaI(Tl) или в CsI(Tl), по критерию: если  $B_1 > 2M_1$ , считается, что в NaI(Tl), иначе — в CsI(Tl).

5. Добавляется 1 к каналу с номером  $N^*$  спектра, соответствующего NaI(Tl) или CsI(Tl).

Структура кадров «Спектр» приведена в табл. 3. Тестовая реализация программы, позволяющая работать с тремя блоками, генерирует кадры «Спектр» размером 8698 байт.

**Таблица 3.** Структура кадров «Спектр»

<b>Размер, байт</b>	<b>Название</b>	<b>Значение</b>
2	Сигнатура	0xAE 0x50
4	Секунды	UT
2	Миллисекунды	0...999
2	Nal(TI), блок 1, канал 0	0...65535
	...	
2	Nal(TI), блок 1, канал 724	0...65535
2	Nal(TI), блок 2, канал 0	0...65535
	...	
2	Nal(TI), блок 2, канал 724	0...65535
2	Nal(TI), блок 3, канал 0	0...65535
	...	
2	Nal(TI), блок 3, канал 724	0...65535
2	Csl(TI), блок 1, канал 0	0...65535
	...	
2	Csl(TI), блок 1, канал 724	0...65535
2	Csl(TI), блок 2, канал 0	0...65535
	...	
2	Csl(TI), блок 2, канал 724	0...65535
2	Csl(TI), блок 3, канал 0	0...65535
	...	
2	Csl(TI), блок 3, канал 724	0...65535
2	CRC16	контрольная сумма

#### **4. Кадр «Двумерная диаграмма» для всплеска**

При выполнении критерия триггера «быстрого», «медленного» или «очень медленного» всплеска начинает формироваться последовательность информационных кадров тех же трёх основных видов, что и формируемые постоянно, но с более коротким интервалом времени между ними. Отличие во внутренней структуре кадра необходимо только для кадров «Двумерная диаграмма». Причина этого состоит в необходимости более подробной записи времени в течение всплеска. Было принято решение в случае всплеска предусмотреть запись времени прихода каждого гамма-кванта с миллисекундной точностью. Таким образом, формирование кадра «Двумерная диаграмма» в случае всплеска происходит по следующему алгоритму:

6. В начале кадра записывается метка и время начала в секундах и миллисекундах (стандартно, как и в других кадрах). Время

начала кадра – это время триггера всплеска.

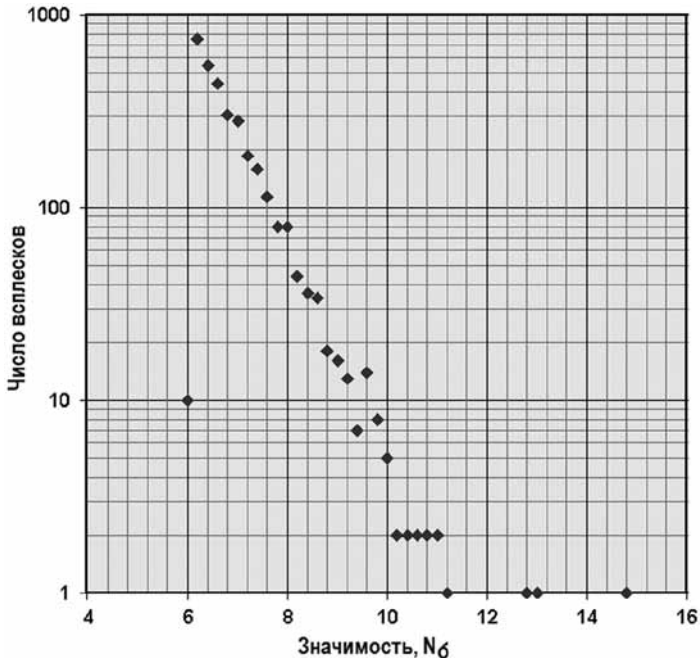
7. Далее записывается длинный массив шестибайтных записей, содержащих данные о каждом гамма-кванте. Формирование массива останавливается по превышении отведённой квоты размера массива, либо по истечении лимита времени на обработку всплеска.

8. Каждая шестибайтная запись состоит из трёхбайтной записи кодов АЦП быстрого и медленного компонентов зарегистрированного гамма-кванта ( $12 + 12 = 24$  бита), номера детектора, с которым было взаимодействие (3 бита), и времени регистрации в миллисекундах от триггера всплеска (21 оставшийся бит).

9. В конце добавляется контрольная сумма.

### **Результаты проверки алгоритма выработки триггера гамма-всплеска**

Главной целью экспериментальной отработки триггера гамма-всплеска являлась проверка статистических факторов, влияющих на выработку триггера в условиях постоянного фона, а также его вариаций, медленных по сравнению со временем гамма-всплеска. Проверка статистических закономерностей необходима прежде всего для оптимизации критерия «быстрого» всплеска, когда



**Рис. 8.** Распределение по значимости быстрых всплесков, выработанных случайным образом при измерениях фона в течение 65 ч

проверка появления роста показаний производится на интервале 20 мс. В этом случае при средней фоновой скорости счета блока ~100 событий в секунду в выбранном энергетическом канале за рассматриваемый интервал в среднем происходит всего 2 события.

Для проверки статистических закономерностей в программу выработки триггера были введены искусственно заниженные значения пороговых уровней. Их величины были выбраны таким образом, чтобы критерий всплеска выполнялся относительно часто и, таким образом, можно было набрать достаточную статистику сравнительно слабых имитаций всплесков. При каждом выполнении критерия программа записывала в отдельный лог-файл набор промежуточных величин, вычисляемых в процессе проверки. Это присутствующие в описании алгоритма выработки триггера величины  $N_k$ ,  $N_a$ ,  $N_b$ ,  $N_{k\text{exp}}$ ,  $\sigma$ . Из этих величин вычислялось значение  $N\sigma = (N_k - N_{k\text{exp}}) / \sigma$ , представляющее собой значимость всплеска.

На графиках рис. 8 представлено распределение числа «быстрых» всплесков по амплитуде. Всего было зарегистрировано 3152 всплеска, имеющих значимость более  $N\sigma > 6$  за время ~65 ч. Из распределения следует, что для того, чтобы происходило не более 10 случайных срабатываний триггера в сутки (это количество ограничивается информационной квотой), необходимо установить пороговый уровень не менее 9,5 стандартных отклонений. Уровень порога 8 стандартных отклонений соответствует ~100 случайным срабатываниям в сутки.

Такое большое суточное число случайных срабатываний связано с очень большим числом проверок выполнения критерия: для «быстрого» всплеска оно составляет  $4,3 \cdot 10^6$  раз. Для более медленных всплесков это количество значительно уменьшается, поэтому установленный пороговый уровень может быть ниже.

Амплитудное распределение «медленных» всплесков (интервал поиска 1 с), полученное за тот же период времени, что и распределение «быстрых», показано на рис. 9. В этом случае был выбран минимальный порог, равный пяти стандартным отклонениям. В течение 65 ч критерий «медленного» всплеска был выполнен 34 раза. Анализ показывает, что уровень срабатывания триггера, равный  $5,5\sigma$ , приводит к примерно четырём случайным срабатываниям в сутки. Порог в шесть стандартных отклонений уменьшает это количество до  $< 1$  случайного «медленного» всплеска в сутки.

На рис. 10 показан в графическом виде пример всплескового временного ряда показаний в двух каналах гамма-спектрометра, полученного из последовательности кадров «Мониторинг», сохранённой в памяти по одному из триггеров медленного всплеска, вызванного быстрым поднесением к детектору радиоактивного изотопа  $^{241}\text{Am}$ , являющегося источником гамма-квантов с энергией 60 кэВ. Информационный блок был запрограммирован на формирование последовательности кадров «Мониторинг» с меняющимся временным интервалом по следующему алгоритму.



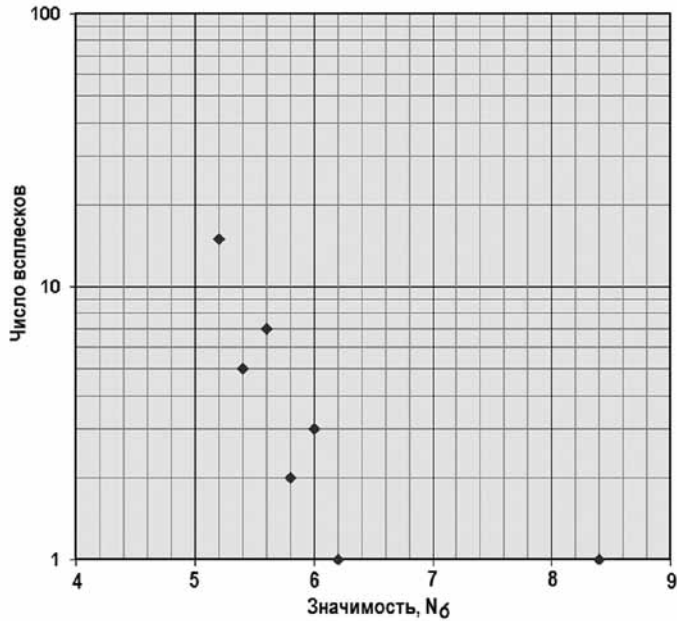


Рис. 9. Распределение медленных всплесков, выработанных случайным образом при измерениях фона в течение 65 ч, по значимости

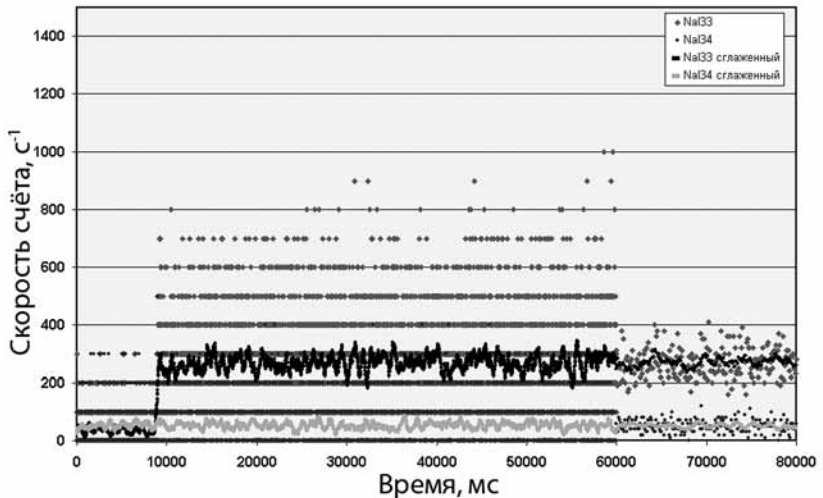


Рис. 10. Временной ряд показаний детекторного блока, восстановленный при обработке последовательности мониторинговых кадров, формируемых после триггера «медленного» всплеска, сгенерированного поднесением изотопа  $^{241}\text{Am}$

1. Записывается предыстория в течение 10 с, предшествующих моменту триггера всплеска, с интервалом 10 мс.
2. Записываются показания в течение первых 50 с всплеска с разрешением 10 мс.
3. Записываются последующие 800 с всплеска с разрешением 100 мс.

Точки на рис. 10 — это показания, представляющие собой число отсчетов в каналах NaI 33 (40...100 кэВ) и NaI 34 (100...200 кэВ), деленное на длительность интервала измерений. Видно, что поднесение изотопа  $^{241}\text{Am}$  изменило скорость счёта в канале NaI 33 с ~30 до ~300 имп/с. Показания в канале NaI 34 не изменились, так как нижняя граница энергии этого канала была выше энергии излучения изотопа.

Кажущееся изменение показаний в момент перехода на другой интервал опроса связано с изменением статистической погрешности определения интенсивности излучения. Это подтверждается колеблющимися возле постоянного уровня значениями сглаженных временных рядов, помещенных на том же рисунке.

### **Информативность эксперимента**

При разработке аппаратуры для проведения космического эксперимента одним из ключевых факторов является количество информации, которое можно передать на Землю. Правильным представляется следующий подход: информативность прибора должна быть не меньше некоторого минимального уровня, обеспечивающего ценность научного результата. При наличии ресурсов информативность может достигать большей величины, ограниченной необходимостью усложнения систем космического аппарата. Конкретная информативность эксперимента может быть скорректирована командами, меняющими частоту формирования информационных кадров, а также пороговые значения в критерии всплеска.

**Таблица 4.** Информация, поступающая регулярно

<b>Тип кадра</b>	<b>Описание</b>	<b>Временной интервал</b>	<b>Суточный объём, МБ</b>
«Мониторинг»	Число событий в кристаллах NaI(Tl) и CsI(Tl) отдельно в широких энергетических интервалах (8 каналов для каждой части детектора)	1 с	9
«Спектр»	734-канальные амплитудные спектры для кристаллов NaI(Tl) и CsI(Tl)	60 с	12
«Двумерная диаграмма»	Амплитуды «быстрой» и «медленной» компонент по 12 бит каждая для 1000 событий в каждом детекторном блоке	60 с	14
			всего: 34

## Структура данных и выработка триггеров в аппаратуре для исследования гамма-всплесков

**Таблица 5.** Всплесковая информация для «быстрого»/«медленного» всплеска

Тип кадра	Описание	Временной интервал	Объём за всплеск, МБ
«Мониторинг»	Число событий в кристаллах NaI(Tl) и CsI(Tl) отдельно в широких энергетических интервалах (8 каналов для каждой части детектора)	1... 10 мс/10... 100 мс	1,4
«Спектр»	734-канальные амплитудные спектры для кристаллов NaI(Tl) и CsI(Tl)	5...10с/20с	0,3
«Двумерная диаграмма»	Амплитуды «быстрой» и «медленной» компонент по 12 бит каждая и время каждого события с точностью 1 мс для 100 000 событий	не регулярно	0,3
			всего: 2

Значения суточных объёмов информации, а также объема и структуры информации за всплеск, которые можно рассматривать как минимальные применительно к прибору для исследования гамма-всплесков и других астрофизических источников, использующему три детекторных блока, приведены в табл. 4 и 5.

Пороговые значения при регистрации всплесков настраиваются достаточно мягко, чтобы не пропустить слабые всплески. Ограничение в этом случае накладывает суточная информационная квота, которая может позволить передать информацию о нескольких десятках астрофизических или имитированных всплесков. Дальнейший отбор полезных событий может быть проведён на Земле по морфологическим, спектральным и другим признакам.

### Заключение

Принципы построения гамма-спектрометра, изложенные выше, позволяют создать сравнительно простыми средствами прибор, имеющий хорошую чувствительность к всплескам, достигаемую путём оптимизации толщины регистрирующего детектора для энергетического диапазона 25...100 кэВ, а также использования второго кристалла в качестве активной защиты от фонового излучения, идущего со стороны космического аппарата. Рассмотренные аналоговые и цифровые электронные схемы позволяют надёжно проводить временные и спектральные измерения в заявленном для прибора диапазоне 10...3000 кэВ. Алгоритмы выработки триггера всплеска и формирования выходных массивов могут быть реализованы с помощью современных микроконтроллеров и ПЛИС средней степени интеграции.

В настоящее время гамма-спектрометры, функционирующие по изложенному выше принципу, изготовлены, настроены и откалиброваны в НИИЯФ МГУ. Тесты показывают готовность аппаратуры к проведению космического эксперимента в 2013 г.

## **DATA STRUCTURE AND BURST TRIGGERING ALGORITHM IN THE INSTRUMENTS FOR STUDY OF GAMMA-RAY BURSTS**

***V. Bogomolov, S. Svertilov, G.F. Smoot-III, A. Amelyushkin,  
N. Vedenkin, A. Rudnitskij, E. Shilova***  
***Lomonosov Moscow state university, Skobeltsyn Institute  
of Nuclear physics, Physical department, Extreme Universe  
Laboratory***

Scintillator gamma-ray spectrometers are designed in SINP MSU for a burst study. These instruments are based on phoswich detectors using combination of NaI(Tl) and CsI(Tl) crystals of different thickness. Electronic circuits realize separate integrating of first and last parts of the PMT pulse as well as the digitizing of correspondent signals for further processing in digital form. Comparison between these two signals allows one to provide reliable separation of the events in scintillators with energy release above 10 keV. The value of energy is measured using the quadratic summing of the signal amplitudes. Information unit of the instrument produce output frames of several type including time sequence, spectra and detailed record of the detector response for a fixed number of events. Also the information unit produce the burst trigger comparing the measured number of events for some time interval with the expected one, calculated from a sequence of previous readings. The burst trigger is produced when the measured value is higher than expected one more than for some threshold number of standard deviations. The limits of energy channels for monitoring, burst trigger threshold and some other values can be changed during the space experiment by a number of digital commands. The data amount coming from the instrument is about 34 MB per day continuously and ~2MB for each detected gamma-ray burst.

**Keywords:** Gamma-ray burst, space experiment, phoswich-detector, calibration, subdividing circuit, burst trigger, information structure.

---

***Bogomolov Vitaly Vladimirovich*** – senior researcher,  
vit\_bogom@nm.ru  
***Svertilov Sergey Igorevich*** – leading researcher,  
sis@coronas.ru

## Структура данных и выработка триггеров в аппаратуре для исследования гамма-всплесков

---

**George Fitzgerald Smoot III** – Head of laboratory,  
gfsmoot@lbl.gov

**Amelyushkin Aleksander Michailovich** – leading electronics designer,  
ptlink@gmail.com

**Vedenkin Nikolay Nikolaevich** – senior researcher,  
vnn.space@gmail.com

**Rudnitsky Alexey Georgievich** – student,  
almax1024@gmail.com

**Shilova Elena Aleksandrovna** – student,  
fakel313@yandex.ru

# ПРОТОТИП УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАТУРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

*Д. Н. Глазкин, К. И. Титов, П. В. Некрасов, О. А. Калашников,  
Г. С. Сорокоумов*

*Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего профессионального  
образования «Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Министерства  
образования и науки РФ, Институт экстремальной  
прикладной электроники (ИЭПЭ), Москва*

В современной космической аппаратуре (КА) широко применяются интегральные схемы (ИС) ПЛИС и памяти. Основные данные о стойкости ИС получают в ходе предварительных наземных испытаний с использованием имитирующих и моделирующих установок, но только натуральный эксперимент позволяет подтвердить истинность полученных результатов. Для данной работы выбраны типовые, широко применяемые ИС : EP2S30, EPF10K50, EPM570, LCMXO1200, K7A163600A. С применением специализированных схемотехнических и программных средств был разработан прототип, позволяющий контролировать работу исследуемых ИС в условиях воздействия радиационных факторов космического пространства.

**Ключевые слова :** натуральный эксперимент, интегральная схема, радиационная стойкость, космическое пространство, тиристорный эффект, одиночные сбои, катастрофический отказ, накопленная доза.

## **Введение**

Современная космическая аппаратура строится на основе радиационно стойких интегральных схем (ИС). Основные данные об их стойкости получают в ходе наземных испытаний с использованием имитирующих (лазеры и рентгеновские имитаторы) и мо-

---

*Глазкин Д. Н.* – студент НИЯУ МИФИ, dm.glaz@gmail.com

*Титов К. И.* – студент НИЯУ МИФИ, ktiitov@yandex.ru

*Некрасов П. В.* – научный сотрудник ИЭПЭ НИЯУ МИФИ, кандидат технических наук, pvnnek@spels.ru

*Калашников О. А.* – доцент, ведущий научный сотрудник ИЭПЭ НИЯУ МИФИ, кандидат технических наук, oakal@spels.ru

*Сорокоумов Г. С.* – студент НИЯУ МИФИ, george\_sorokoum@mail.ru

делирующих (ускорители, реакторы, изотопные источники) установок, но только натуральный эксперимент позволяет подтвердить истинность полученной информации. Для верификации результатов наземных экспериментов была поставлена задача выбрать исследуемые интегральные схемы (ИИС) и разработать аппаратно-программный комплекс (АПК), позволяющий контролировать их работу в условиях воздействия радиационных факторов космического пространства (РФКП). Основными эффектами, возникающими при данном виде воздействия, являются: тиристорный эффект (ТЭ), одиночные сбои (ОС), катастрофический отказ и эффекты накопленной дозы [Чумаков, 2004].

### **Выбор ИИС**

Для проведения эксперимента было необходимо выбрать ИС, которые имеют низкий порог чувствительности к тиристорному эффекту и одиночным сбоям, но в то же время устойчивы к катастрофическому отказу. Количество возникающих ОС пропорционально количеству ячеек памяти, поэтому данный эффект лучше проявляется в ИС с большим объемом памяти. Одним из определяющих факторов также являлся большой объем информации о возникающих эффектах, накопленный при наземных испытаниях. В результате для данного эксперимента выбраны ИС:

- FPGA ПЛИС Altera EP2S30, 33 800 логических вентиляей, 1,4 Мбит блочной памяти, 16 блоков цифрового сигнального процессора(DSP), 6 блоков фазовой автоподстройки частоты(PLL);
- FPGA ПЛИС Altera EPF10K50, 2880 логических вентиляей, 20 кбит блочной памяти;
- CPLD ПЛИС Altera EPM570, 440 логических вентиляей, 8 кбит Flash-памяти;
- CPLD ПЛИС Lattice LCMXO1200, 1200 логических вентиляей, 6,4 кбит блочной памяти, 1 блок фазовой автоподстройки частоты; SSRAM Samsung K7A163600A, 18,9 Мбит блочной памяти.

### **Выбор конфигурации АПК**

К тестирующему АПК с учетом специфики бортовой аппаратуры предъявлялись следующие требования:

- непрерывное проведение функционального и параметрического контроля (ФК и ПК) исследуемых ИС (ИИС) ;
- для каждой ИИС выборка должна составлять не менее двух образцов;
- непрерывный контроль и парирование ТЭ, ОС и других радиационных эффектов в ИИС;
- начальная обработка полученной информации, хранение и последующая ее передача бортовому компьютеру (БК) космического аппарата по интерфейсу CAN (Controller Area Network);

- уровень стойкости элементной базы, позволяющий обеспечить непрерывную работу устройства на солнечно синхронной орбите до 1000 км в течение года;
- потребляемая мощность не более 10 Вт;
- масса не более 10 кг;
- работа при напряжении питания 24...36 В ;
- тестирование не менее 70 % ресурсов ИИС;
- объем передаваемой по космической связи информации не должен превышать 65 КБ/сеанс.

После анализа предъявляемых требований и данных по стойкости элементной базы к радиационным факторам космического пространства был выбран вариант программной реализации устройства с использованием 8-разрядного микроконтроллера (МК) АТmega128А1. Данный МК имеет высокий порог чувствительности к радиационным факторам КП, низкое энергопотребление и обладает достаточными возможностями для выполнения поставленной задачи (максимальная частота 32 МГц, 128 КБ Flash-памяти, 2 КБ EEPROM-памяти, развитая периферия).

### **Аппаратная часть**

Тестирующие МК осуществляют ФК и ПК по единообразной схеме (рис. 1). Каждый тип ИИС контролируется отдельно, что исключает взаимное влияние разных типов ИИС друг на друга и повышает отказоустойчивость. Конфигурационная память, если она необходима для данного типа ИИС, выбирается из условия соответствия величины пороговых линейных потерь энергии возникновения одиночных сбоев и эффектов накопленной дозы параметрам орбиты, что гарантирует сохранность прошивки при заданных условиях.

Контроль функционирования АПК и связь с бортовой аппаратурой осуществляется двумя управляющими МК (УМК). Тестирующие МК каждого типа ИИС по интерфейсу I<sup>2</sup>C передают в оба УМК накопленную в процессе ФК и ПК информацию и данные о своей работе. В начале сеанса связи с БК ТМК и два УМК сравнивают между собой собранные в процессе ФК и ПК данные и выбирают верные по мажоритарному признаку, что обеспечивает защиту от возможных ОС. Один из УМК начинает информационный обмен с БК по интерфейсу CAN, а второй — контролирует обмен, и при неправильной работе первого выключает его и берет на себя его функции до конца сеанса. Таким образом, обеспечивается бесперебойная передача данных между АПК и бортовой аппаратурой (рис. 2).

Кроме того, каждый МК производит параметрический контроль двух других МК для детектирования и парирования возможных тирсторных эффектов (рис. 3).



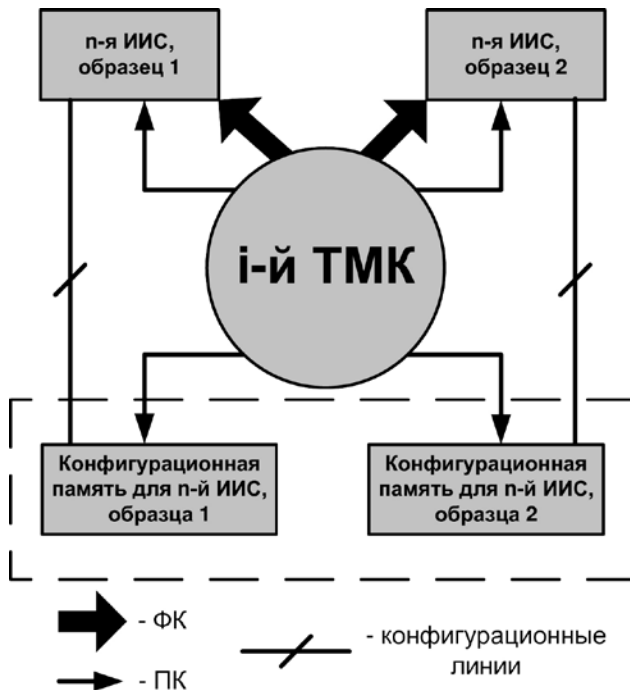


Рис. 1. Схема осуществления функционального и параметрического контроля исследуемых интегральных схем

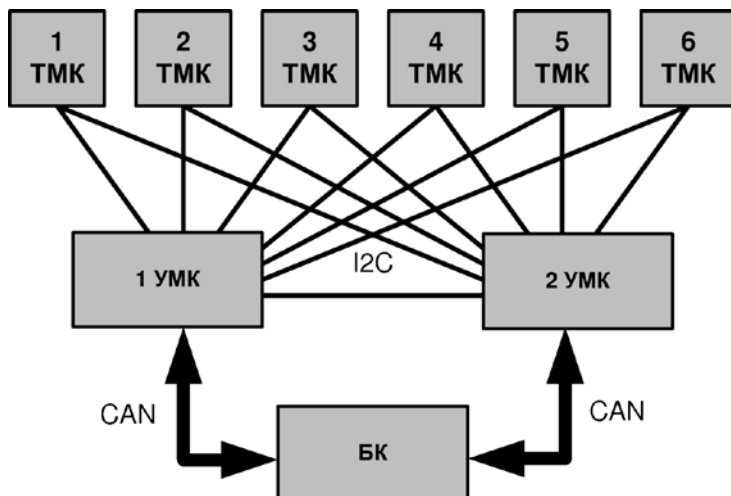
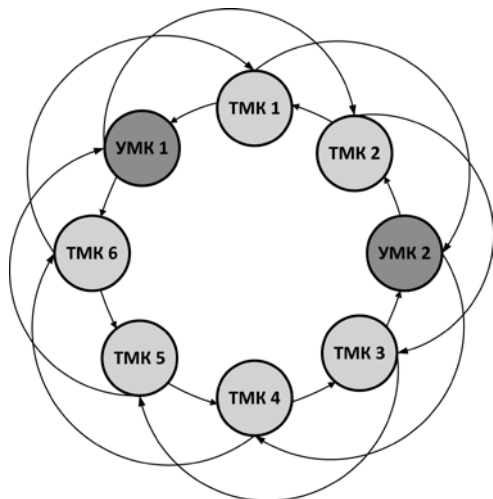
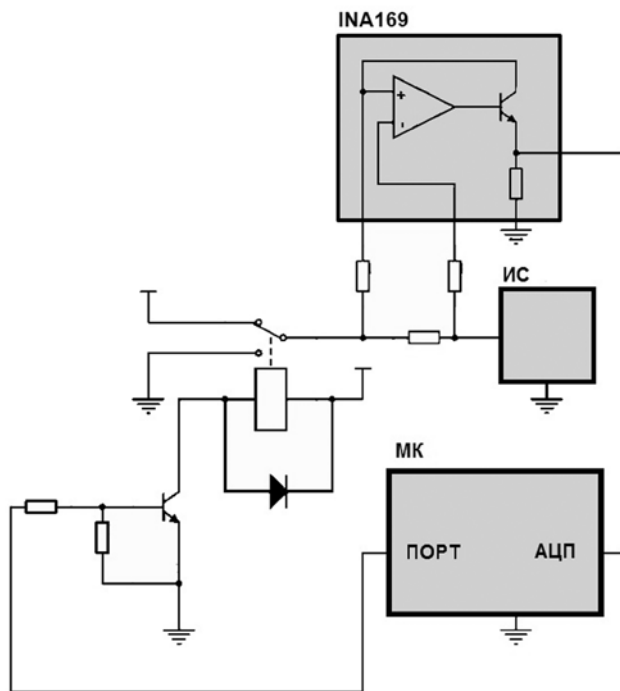


Рис. 2. Схема интерфейсов аппаратно-программного комплекса



**Рис.3.** Схема взаимного параметрического контроля управляющих и тестирующих микроконтроллеров



**Рис. 4.** Упрощенная схема контроля тока и парирования тиристорного эффекта

Схема контроля тока построена на основе изготовленного по биполярной технологии монитора тока INA169, преобразующего величину тока в напряжение, которое измеряется АЦП, встроенным в МК (рис. 4). Парирование ТЭ осуществляется при помощи реле, отключающего ИС от источника напряжения.

В отличие от других блоков АПК, ТЭ в подсистеме питания не допустим, так как отражается на работе всего АПК. Поэтому для данной подсистемы были выбраны ИС, в которых тиристорный эффект, вследствие конструктивно-технических особенностей, не возникает: первичный трансформаторный преобразователь напряжения MFL2805S (входное напряжение до 40 В, входной ток до 2,5 А, гальваническая развязка, КПД до 87 %, выходное напряжение 5 В) и вторичные импульсные преобразователи напряжения LT1965 (регулируемое выходное напряжение 1,2...20 В, выходной ток до 1,1 А).

### **Программная часть**

Программная часть АПК состоит из программ для ПЛИС и МК. Функциональные блоки, реализованные внутри ПЛИС, представлены в табл. 1. ПЛИС конфигурируются таким образом, чтобы использовались все доступные типы внутренних базовых элементов. Для тестирования логических элементов строится блок памяти и кольцевой генератор, блочная и Flash-память контролируется в полном объеме, при наличии блоков PLL и DSP, их работоспособность также проверяется [Бобровский, 2011].

**Таблица 1.** Тестируемые функциональные блоки ПЛИС

ПЛИС	EPF10K50	EPM570	EP2S30	LCMXO1200
Блочная память	+	–	+	+
Память на логических элементах	+	+	+	+
Кольцевой генератор	+	+	+	+
Пользовательская Flash-память	–	+	–	–
PLL	–	–	+	+
DSP	–	–	+	–

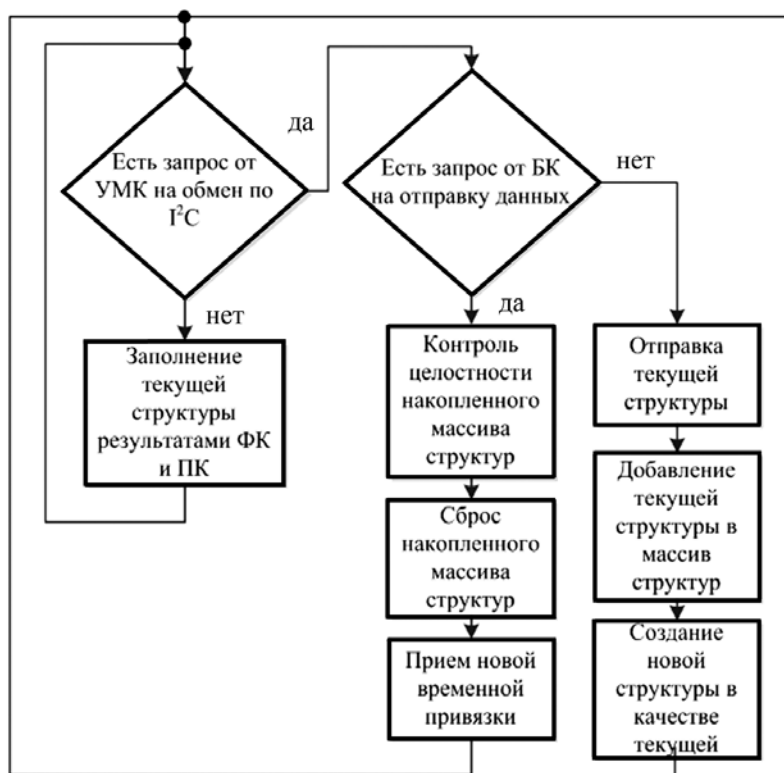
Все данные о результатах параметрического и функционального контроля исследуемых интегральных схем передаются в виде набора структур следующего вида:

- 1 -идентификатор ТМК;
- 2 -временная метка;
- 3 -количество циклов тестирования;
- 4 -температура;
- 5 -i-я ИИС:
- 5.1 -идентификатор ИИС;

- 5.2 -ток потребления;
- 5.3 -количество ТЭ;
- 5.4 -количество ошибочных циклов тестирования;
- 5.5 -количество ОС в блочной памяти;
- 5.6 -количество ОС в памяти, построенной из логических элементов;
- 5.7 -количество ОС в Flash-памяти;
- 5.8 -частота кольцевого генератора;
- 5.9 -частота PLL;
- 6 -контрольная сумма.

Использование единой структуры позволяет упростить хранение, обработку и передачу информации, а контрольная сумма показывает целостность структуры.

Упрощенные алгоритмы работы ТМК и УМК представлены на рис. 5 и 6, соответственно. Контроль токов и парирование ТЭ происходит по прерываниям параллельно с работой основной программы.



**Рис. 5.** Алгоритм работы тестирующего микроконтроллера



Рис 6. Алгоритм работы управляющего микроконтроллера

### Макет

На основе описанных программных и аппаратных решений с применением специализированных схемотехнических и программных средств был разработан прототип АПК, проведена его апробация и отладка (рис. 7).

В качестве имитатора бортового компьютера использовался персональный компьютер с установленной средой программирования LabView. В данной среде разработано тестовое программное обеспечение, которое получает данные от прототипа

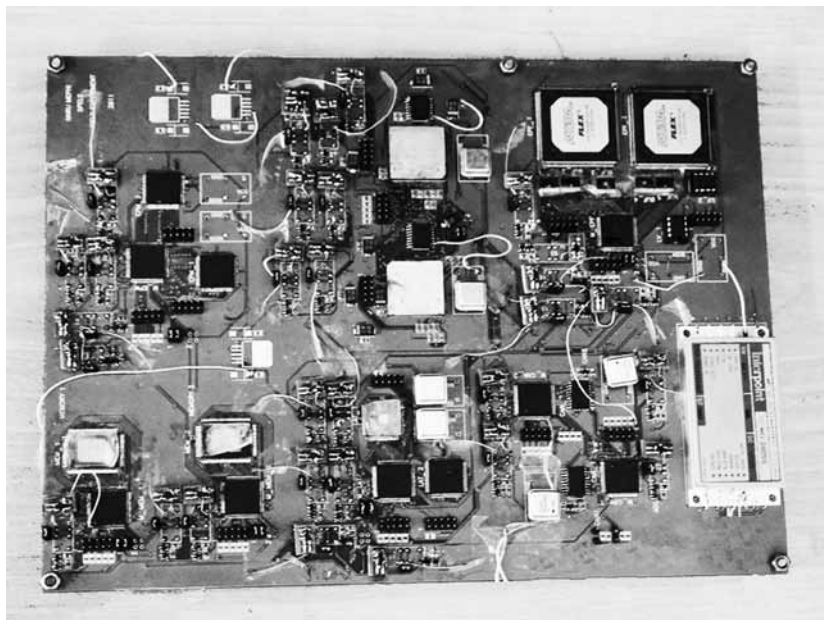


Рис. 7. Плата прототипа

и архивирует их, что позволяет удовлетворить требованию о максимальной величине отправляемого по космической связи пакета, без уменьшения количества и точности информации о функционировании исследуемых интегральных схем. Затем, после имитации сеанса передачи, данные разархивируются и выводятся на экран в удобном для восприятия виде (рис. 8).

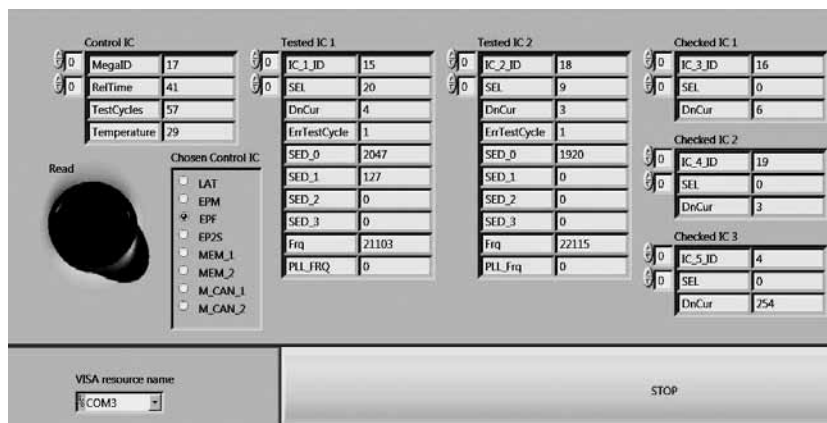


Рис. 8. Фрагмент интерфейса тестовой программы в среде LabView

## Выводы

Разработан прототип аппаратно-программного комплекса для подтверждения адекватности результатов, полученных на наземных установках, проведена отладка всех его функциональных блоков и имитация взаимодействия с бортовой аппаратурой, установлено соответствие прототипа предъявленным требованиям.

## Литература

[Чумаков, 2004] *Чумаков А. И.* Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.

[Бобровский, 2011] *Бобровский Д. В.* Методы и средства прогнозирования стойкости ПЛИС к воздействию радиационных факторов космического пространства: Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. 19 с.

## THE PROTOTYPE OF DEVICE FOR FULL-SCALE RADIATION RESEARCH IN INTEGRATED CIRCUITS UNDER THE SPACE CONDITIONS

*D. N. Glazkin, K. I. Titov, P. V. Nekrasov, O. A. Kalashnikov, G. S. Sorokoumov*

*National Research Nuclear University MEPhI,  
Institute of Extreme Applied Electronics (IEAE), Moscow*

In the space equipment are widely used FPGA and memory. General radiation hardness results of these integrated circuits are obtained under the ground conditions, but only full-scale experiment can confirm these data. For this experiment were chosen widely used in practice: EP2S30, EPF10K50, EPМ570, LCMXO1200, K7A163600A. The developed prototype allows to test these circuits under the space conditions.

**Keywords:** full-scale experiment, integrated circuit, radiation hardness, space, SEL, SEU, catastrophically failure, TID.

---

*Glazkin D. N.* – student of NRNU MEPhI, dm.glaz@gmail.com

*Titov K. I.* – student of NRNU MEPhI, ktitov@yandex.ru

*Nekrasov P. V.* – research associate IEAE NRNU MEPhI, PhD, pvnek@spels.ru

*Kalashnikov O. A.* – Leading Researcher IEAE NRNU MEPhI, PhD, oakal@spels.ru

*Sorokoumov G. S.* – student of NRNU MEPhI, george\_sorokoumov@mail.ru

# РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ В ПОЛЕ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

*М. В. Анохин<sup>1</sup>, В. И. Галкин<sup>2</sup>, В. А. Дитлов<sup>3</sup>, М. Б. Добриян<sup>1</sup>,  
А. Е. Дубов<sup>1</sup>, А. Г. Королев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Российской академии наук Институт космических исследований (ИКИ РАН), Москва*

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва*

<sup>3</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение Государственный научный центр Российской Федерации «Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова», Москва*

Представлены предварительные результаты решения задачи создания стенда для испытаний электронных компонентов космических приборов (ЭК) в поле тяжелых заряженных частиц и проведения теоретических и экспериментальных исследований в данном направлении в рамках концепции применения параметра плотности поглощенной энергии для описания локальных радиационных повреждений. Предложен новый подход к разработке методики испытаний, снижающей частоту некорректных заключений по стойкости ЭК. Рассмотрены вопросы, связанные с созданием испытательных стендов с улучшенными показателями по соотношению цена/качество.

**Ключевые слова:** радиационная стойкость, тяжелые заряженные частицы, плотность поглощенной энергии, локальные радиационные повреждения, испытательный стенд, электронные компоненты космических приборов.

---

*Анохин Михаил Всеволодович* – старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, [anokhin@skbkp.tarusa.ru](mailto:anokhin@skbkp.tarusa.ru)

*Галкин Владимир Игоревич* – профессор, доктор физико-математических наук, [anokhin@skbkp.tarusa.ru](mailto:anokhin@skbkp.tarusa.ru)

*Дитлов Валерий Анатольевич* – ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, [valery.ditlov@itep.ru](mailto:valery.ditlov@itep.ru)

*Добриян Михаил Борисович* – директор, кандидат технических наук, [info@skbkp.tarusa.ru](mailto:info@skbkp.tarusa.ru)

*Дубов Андрей Евгеньевич* – младший научный сотрудник, [anokhin@skbkp.tarusa.ru](mailto:anokhin@skbkp.tarusa.ru)

*Королев Александр Григорьевич* – программист, [anokhin@skbkp.tarusa.ru](mailto:anokhin@skbkp.tarusa.ru)



Дозиметрическое сопровождение экспериментов по оценке радиационной стойкости электронных компонентов космических приборов в настоящее время проводится в соответствии с методиками РДВ 319.03.24 и ОСТ 11 073.013 (часть 10); моделирующие установки: ускорители протонов – метод 1000-11; ускорители ионов – метод 1000-12; установки на основе изотопных источников ядерных частиц – метод 1000-10; имитирующие установки: лазерные установки – метод 1000-9. При этом отсутствуют методики испытания ЭК на стойкость к тяжелым заряженным частицам (ТЗЧ) космического пространства и методики разработки локальной радиационной защиты ЭК, что ограничивает срок активного функционирования космических приборов. Отсутствуют также официально утвержденные параметры и критерии, пригодные для анализа причинно-следственных связей между событиями, вызывающими повреждение ЭК в условиях сложных радиационных полей.

Предлагаемый для испытаний ЭК космических приборов стенд разрабатывается одновременно с методикой сертификации радиационно стойких ЭК. Физическим основанием является известный факт, что ядро кремния с энергией 1...10 МэВ при остановке в кремниевой кристаллической решетке вызывает последовательность событий с линейной передачей энергии (ЛПЭ, LET) в диапазоне 15...50 МэВ·см<sup>2</sup>мг<sup>-1</sup>, что, как минимум, на порядок больше порога возникновения одиночных сбоев в ЭК большинства технологий (кроме КМОП) и в любом случае превышает порог возникновения одиночных сбоев для КМОП. Поскольку ядра отдачи Si при воздействии нейтронов <sup>239</sup>PuBe-источника имеют энергию до 10 МэВ, такой источник с соответствующим конвертером может быть использован для испытаний ЭК по методике, в основу которой положена концепции описания вероятности повреждений ЭК во взаимосвязи с величиной плотности поглощенной энергии.

В настоящее время общепринятого параметра для количественного описания вероятности радиационного повреждения ЭК одиночной частицей не существует. Широко используемая величина ЛПЭ, с одной стороны, заведомо предполагает усреднение по некоторому количеству частиц-снарядов пучка, а с другой стороны, оставляет неопределенным линейный (точнее, объемный) масштаб, по которому усредняется энерговыделение. Таким образом, этот параметр недостаточно точно отражает реальную ситуацию, в которой происходит повреждение ЭК одиночной частицей. Что же касается эффектов «полной поглощенной дозы» (TID), то они, по сути, являются суммой (точнее, суперпозицией) эффектов в треках отдельных частиц-снарядов, проходящих через чувствительный объем ЭК.

При всем многообразии процессов, протекающих в полупроводниковых приборах под воздействием ионизирующих излучений, исходной универсальной физической причиной их возникновения можно считать локализованный в микрообъеме ЭК процесс передачи энергии, для описания которого удобно использовать такой

параметр как плотность поглощенной энергии в треке частицы и ближайшей его окрестности. В качестве реально измеримого параметра логично ввести случайную величину – плотность поглощенной энергии, относящейся к одной частице-снаряду и усредняемой на линейном масштабе (линейная плотность) или в объеме (объемная плотность) керна и ореола трека частицы, проходящей или останавливающейся в функциональном элементе ЭК. Измерению подлежат функция распределения этой величины или ее моменты. В идеале эксперимент должен дать спектр плотностей поглощенной энергии при заданном масштабе усреднения.

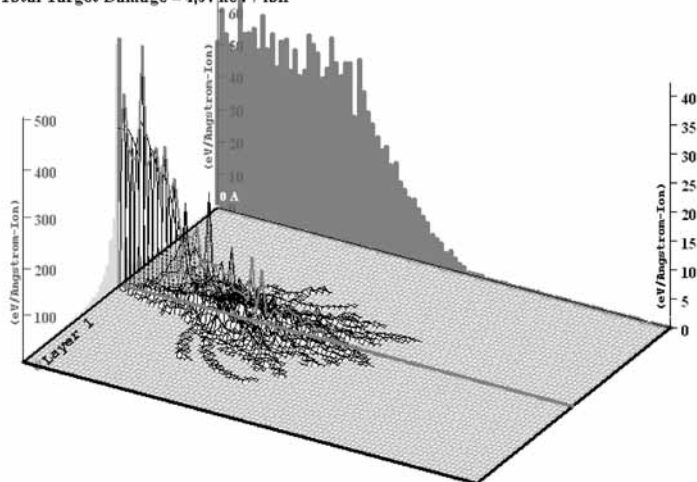
С целью определения параметров радиационного поля, создаваемого источником  $^{239}\text{PuBe}$ , было проведено численное моделирование основных «поражающих» факторов такого поля. На рис. 1, 2, полученных с использованием пакета SRIM-2012, показано пространственное распределение ионизационных потерь энергии ядра кремния с кинетической энергией 300 кэВ в кремниевом кристалле, усредненное по 100 частицам (примерно 2/3 от всех потерь). Двумерное представление этого же распределения представлено на

## Target Ionization

Total Ionization = 213,4 keV / Ion

Total Phonons = 82,0 keV / Ion

Total Target Damage = 4,57 keV / Ion



Plot Window goes from 0 Å to 1 μm; cell width = 100 Å  
Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

**Ion = Si (300, keV)**

**Рис. 1.** Пространственное распределение ионизационных потерь ионов кремния с энергией 300 кэВ в кремниевом кристалле; продольный масштаб рисунка – 1 мкм (для сравнения указаны также суммарные значения тепловых и дислокационных потерь)

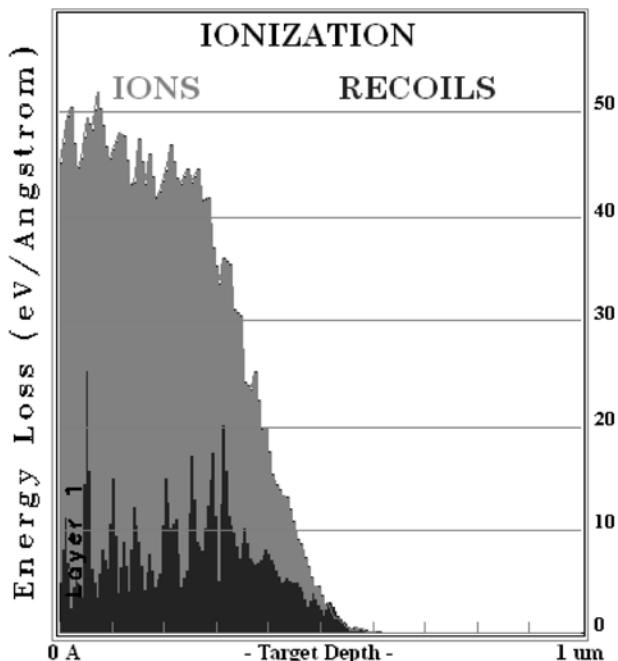


Рис. 2. То же распределение ионизационных потерь, что и на рис. 1, но с разделением на первичные ионы (основная составляющая) и ядра отдачи

рис. 2 с дифференциацией по источнику (первичное ядро – ядра отдачи). Характерный масштаб плотности поглощенной энергии – до  $600 \text{ эВ/нм} \approx 14 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мг}^{-1}$  (т.е.  $21 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мг}^{-1}$  для полных потерь).

Видно, что вклад вторичных ионов является весьма существенным, и поэтому, учитывая, что ядра отдачи Si при воздействии нейтронов  $^{239}\text{PuBe}$ -источника имеют энергию до 10 МэВ, можно ожидать, что такой источник с соответствующим конвертером окажется весьма эффективным средством для испытаний ЭК.

С целью определения функции отклика монитора в зависимости от размера чувствительной области были рассчитаны спектры плотностей поглощенной энергии для налетающих альфа-частиц при разных масштабах усреднения (10, 100, 1000 нм). Результаты представлены на рис. 3.

Как можно видеть, по форме спектры 100-нанометрового детектора и детектора размером 1000 нм демонстрируют значительное сходство. При этом верхняя граница спектра у обоих детекторов заметно ниже верхней границы спектра, рассчитанного для детектора размером 1 нм. Следовательно, использование для наномониторов

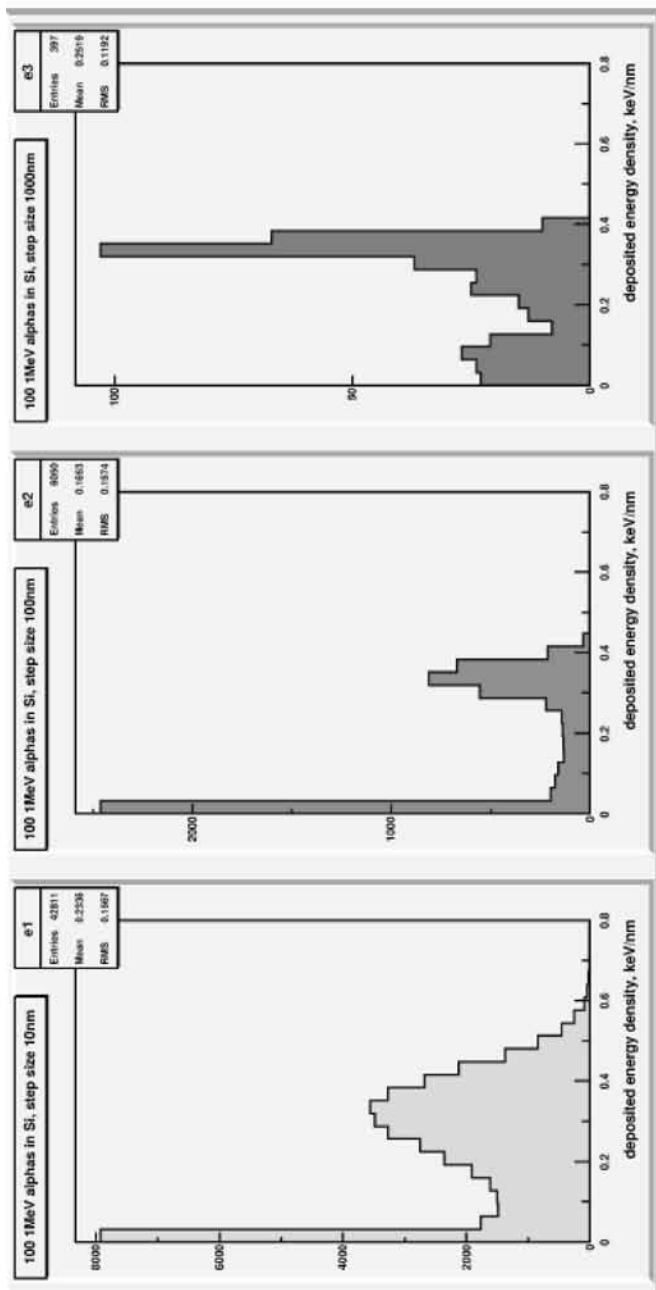


Рис. 3. Профили спектров плотностей поглощенной энергии для альфа-частиц при разных масштабах усреднения (10, 100, 1000 nm); линейный масштаб (nm) указан по вертикали

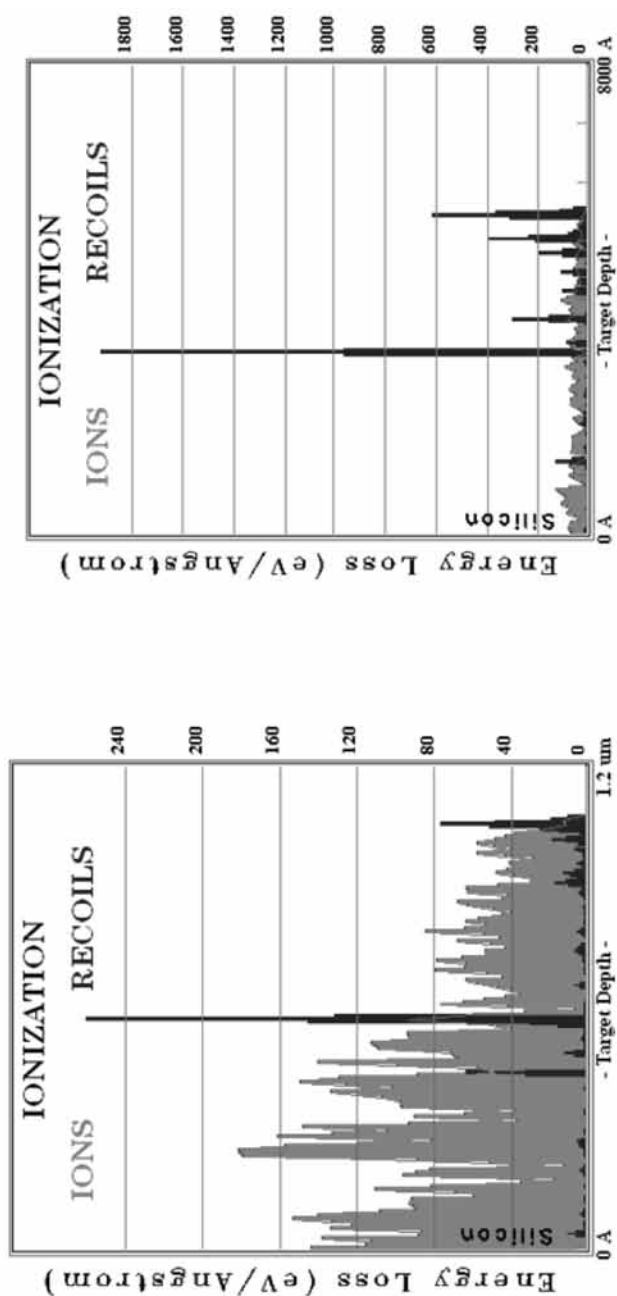


Рис. 4. Профили спектров линейной поглощенной энергии при остановке иона кремния (слева) и иона меди (справа) в кремниевом кристалле; темная часть профилей – ядра отдачи; по горизонтальной оси – линейная шкала в диапазоне 0...1,2 мкм (кремний) и 0...0,8 мкм (медь)

топологии 1000 нм, скорее всего, будет приемлемым при испытаниях ЭК, хотя и потребует корректировки с целью устранения систематических погрешностей, приводящих в некоторых случаях к ложноотрицательным заключениям. Ложноположительные заключения, как нам представляется, будут маловероятными.

Исходя из этого, при создании испытательного стенда в качестве детектора нами использовался КМОП-сенсор с соответствующей топологией. Результаты моделирования линейной плотности поглощенной энергии в таком детекторе для ионов кремния и меди представлены на рис. 4.



**Рис. 5.** Физический макет испытательного стенда



**Рис. 6.** Отображение события с большой плотностью поглощенной энергии

Физический макет испытательного стенда показан на рис. 5 (без компонентов биологической защиты). Радиационное поле в макете создается источником  $\alpha$ -излучения типа АДИ с изотопом  $^{239}\text{Pu}$ . Активность –  $2,1 \cdot 10^7$  Бк, мощность энергии излучения –  $(7,0 \pm 3,5) \cdot 10^{-7}$  Вт.

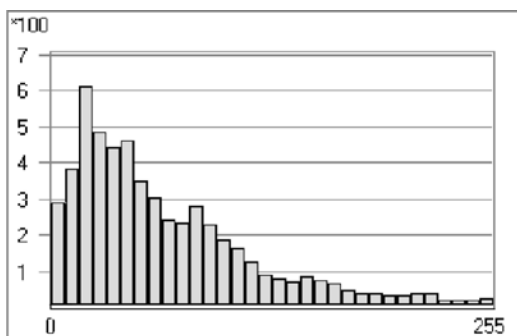
Отображение события с большой плотностью поглощенной энергии, вызванного радиационным полем источника  $^{239}\text{Pu}$  в матрице КМОП, показано на рис. 6.

Представление о временной картине протекания данного события дают рис. 7–9. Покадровый анализ файлов видеорегистрации (формат WMV) проводился при помощи разработанной нами программы VSP Analyzer. Результатом анализа является обнаружение и запись областей с повышенной яркостью точек кадра

(вспышек) и их окрестностей. После считывания очередного кадра происходит сравнение яркости всех пикселей с заранее заданным значением пороговой яркости (обычно устанавливается выше уровня яркости «битых» пикселей). Если яркость достигает пороговой величины или превышает ее, считается, что есть вспышка. Значение координат каждой вспышки заносится в массив, в который также производится запись значений яркости пикселей в квадрате заданного размера, содержащего точку вспышки. Строятся гистограммы с расположением по оси X значений яркости и по оси Y – соответствующего числа точек в диапазоне яркости заданной ширины. При необходимости производится вычитание темнового фона в области вспышки по данным из трех кадров, предшествующих событию.



**Рис. 7.** Спектр яркости пикселей трековой области за 33 мс до прохождения ионизирующей частицы



**Рис. 8.** Спектр яркости пикселей трековой области непосредственно после прохождения ионизирующей частицы

Следует иметь в виду, что в эксперименте фиксируется результат импульсного образования электрического заряда в потенциальной яме фотодиода, находящегося в радиационном поле. Если закрыть источник слоем свинца толщиной 8 мм, подобные явления наблюдаться не будут.

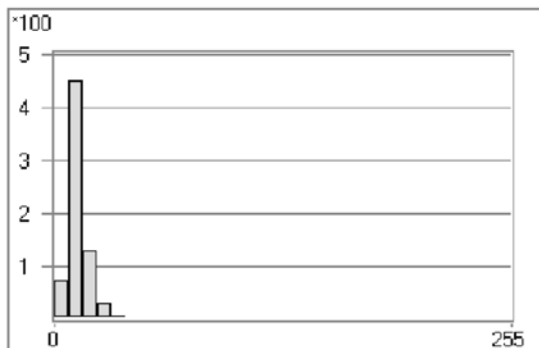


Рис. 9. Спектр яркости пикселей трековой области через 33 мс после прохождения ионизирующей частицы

Основной вопрос, который возникает при анализе полученных данных, – это вопрос о том, какие процессы могут давать остаточный эффект в течение времени порядка десятков миллисекунд и более. Можно предположить, что в данном случае имеют место эффекты, связанные с неионизационными потерями энергии частицы (НИПЭ) – особенно, с учетом результатов моделирования с использованием пакета SRIM (рис. 10), из которых следует, что

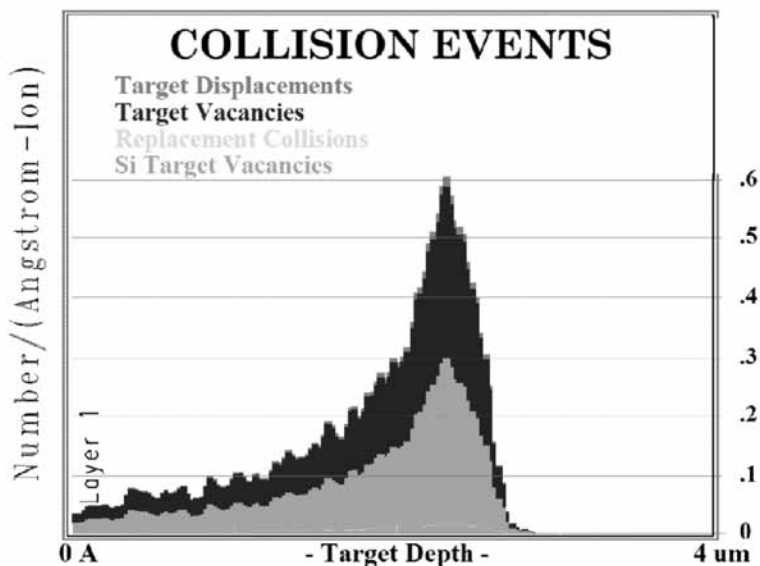


Рис.10. Характерный профиль линейного распределения событий, происходящих при остановке иона кремния в кремниевом кристалле (линейная шкала по горизонтальной оси – в пределах от 0 до 4 мкм)



при каждом одиночном событии можно ожидать порядка  $10^3$  смещений на один остановившийся атом отдачи Si.

Если такое предположение окажется справедливым, то кинетический анализ процесса взаимодействия излучения с ЭК можно будет использовать для мониторинга воздействия на их чувствительные объемы НИПЭ-компоненты сложного радиационного поля, которая, согласно некоторым современным представлениям, является существенным, а, возможно, и доминирующим поражающим фактором в поле ТЗЧ космического пространства.

### **Заключение**

1. Создан физический макет стенда для испытаний ЭК космических приборов в поле тяжелых заряженных частиц, позволяющий достаточно эффективно наблюдать хронологию развития события, вызванного сложным радиационным полем, содержащим тяжелоионную компоненту.

2. Реализованные в программном обеспечении принципы обработки результатов эксперимента могут быть использованы в дальнейших методологических разработках и при исследовании радиационного поля в космических аппаратах.

3. Полученные предварительные экспериментально-расчетные данные указывают на возможность использования относительно недорогой радиационно стойкой матрицы КМОП для создания испытательного стенда, позволяющего повысить достоверность выводов относительно радиационной стойкости ЭК.

## **THE DESIGNING OF TEST FACILITIES FOR SPACECRAFT ELECTRONIC COMPONENTS IN THE FIELD OF HEAVY CHARGED PARTICLES**

*M. V. Anokhin<sup>1</sup>, V. I. Galkin<sup>2</sup>, V. A. Ditlov<sup>3</sup>, M. B. Dobriyan<sup>1</sup>,  
A. E. Dubov<sup>1</sup>, A. G. Korolev<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> Space Research Institute, Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow*

*<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (MSU SINP), Moscow*

*<sup>3</sup> Russian Federation State Scientific Center Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics (ITEP), Moscow*

The preliminary results of making a design of test facilities for spacecraft electronic components (EC) in the field of heavy charged particles are presented, as it has been accomplished in conjunction with

***М. В. Анохин, В. И. Галкин, В. А. Дитлов,  
М. Б. Добриян, А. Е. Дубов, А. Г. Королев***

---

theoretical and experimental research based on the concept of the absorbed energy density parameter application with the characterization of local radiation damages. A new approach for the development of the improved testing methodology is suggested as allowing to reduce the rate of incorrect conclusions regarding ECs radiation hardness. The question of designing of test facilities that provides an improved cost/quality characteristics is under consideration.

**Keywords:** radiation hardness, heavy charged particles, absorbed energy density, local radiation damages, test facility, spacecraft electronic components.

---

***Anokhin Mikhail Vsevolodovich*** – senior researcher, PhD,

anokhin@skbcp.tarusa.ru

***Galkin Vladimir Igorevich*** – professor, PhD,

anokhin@skbcp.tarusa.ru

***Ditlov Valery Anatolievich*** – leading researcher, PhD,

valery.ditlov@itep.ru

***Dobriyan Mikhail Borisovich*** – director, PhD,

info@skbcp.tarusa.ru

***Dubov Andrei Evgenievich*** – researcher,

anokhin@skbcp.tarusa.ru

***Korolev Aleksandr Grigorievich*** – programmer,

anokhin@skbcp.tarusa.ru

# ИЗДЕЛИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

*П. Н. Осипенко*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Научно-исследовательский институт системных  
исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН),  
Москва*

В статье дается краткое описание основных изделий разработки НИИСИ РАН, имеющих повышенную стойкость к ионизирующему излучению космического пространства. Приводятся данные на микросхемы 32-разрядных микропроцессоров, включая систему на кристалле 5890BE1T и микросхему контроллера интерфейса МКО 5890BG1T. Приводятся описания изделий, находящихся в стадии разработки в настоящее время, в том числе многокристального модуля Багет83\_микро, реализующего функции управляющей ЭВМ и перспективной системы на кристалле с контроллером интерфейса SpaceWire.

**Ключевые слова:** ионизирующие излучения космического пространства, микропроцессор, многокристальный модуль, радиационная стойкость.

## **Введение**

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН занимается разработкой вычислительной техники для ответственных применений уже более 20 лет и владеет полным циклом процесса создания сложных систем, включая разработку интегральных микросхем (ИМС), вычислительных модулей и системного программного обеспечения. За прошедшее время созданы и внедрены в серийное производство десятки типов изделий вычислительной техники, применяемых в областях, где требуются высокая надежность, длительные сроки поддержки и обслуживания, информационная безопасность и технологическая независимость.

Более 10 лет назад НИИСИ РАН начал проектирование интегральных микросхем, ориентированных на космические приложения. Особенностью таких приложений является наличие ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП), воздействие которого на электронные радиоизделия (ЭРИ) приводит к изменению их характеристик, вплоть до полного отказа.

**Осипенко Павел Николаевич** — заместитель заведующего отделением разработки вычислительных систем НИИСИ РАН, кандидат технических наук, osipenko@niisi.msk.ru

Соответственно, для обеспечения требуемой стойкости к воздействию ИИ КП необходимы специальные методы проектирования и изготовления ИМС.

Производственной основой достижения требуемых характеристик стойкости к воздействию ИИ КП для изделий НИИСИ РАН является экспериментальный микроэлектронный технологический комплекс, позволяющий изготавливать ограниченные партии ИМС с технологическими нормами 0,5...0,25 мкм. Наличие данного комплекса позволяет осуществлять тонкую настройку технологического процесса изготовления микросхем, что в сочетании с разработанными конструктивными, технологическими и схемотехническими решениями обеспечивает требуемые характеристики по стойкости.

### **Серийные изделия**

Первым в линейке стойких ИМС был разработан комплект из двух микросхем — 5890BE1T и 5890BG1T. Микросхема 5890BE1T представляет собой систему на кристалле, которая содержит 32-разрядное микропроцессорное ядро и набор контроллеров, включающий контроллер оперативной (ОЗУ) и постоянной (ПЗУ) памяти, контроллер последовательных портов RS232 на 3 канала, контроллер сигналов ввода/вывода общего назначения (GPIO), контроллер интерфейса PCI. Микросхема изготавливается по 0,5 мкм КМОП КНИ-технологии, имеет рабочую частоту 33 МГц при напряжении питания 3,3 В. Предельная допустимая накопленная доза от воздействия ионизирующего излучения космического пространства составляет не менее 200 крад ( $\text{SiO}_2$ ). Тиристорный эффект при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) с уровнем линейной передачи энергии (ЛПЭ) до 80 МэВ·см<sup>2</sup>/мг отсутствует. Микросхема выпускается в металлокерамическом 240-выводном корпусе типа QFP. Структурная схема микросхемы 5890BE1T приведена на рис. 1.

Микросхема 5890BG1T представляет собой контроллер мультиплексного канала обмена (МКО) по ГОСТ Р 52070-2003 и реализует функции контроллера канала, оконечного устройства и монитора. Структурная схема микросхемы 5890BG1T приведена на рис. 2. Реализовано два независимых контроллера (ИУМК1 и ИУМК2), каждый из которых поддерживает функцию резервирования и буфер на 8 КБ. Кроме того в кристалле реализованы контроллер сверхоперативного запоминающего устройства (СОЗУ) и блок счетчиков/таймеров (блок С/Т). Микросхема изготавливается по 0,5 мкм КМОП КНИ-технологии, подключается к шине PCI, работающей с частотой до 33 МГц, имеет рабочее напряжение питания 3,3 В. Предельная допустимая накопленная доза от воздействия ионизирующего излучения космического пространства составляет не менее 200 крад ( $\text{SiO}_2$ ). Тиристорный эффект при воздействии ТЗЧ с уровнем ЛПЭ до 80 МэВ·см<sup>2</sup>/мг отсутствует. Микросхема выпускается в металлокерамическом 240-выводном корпусе типа QFP.

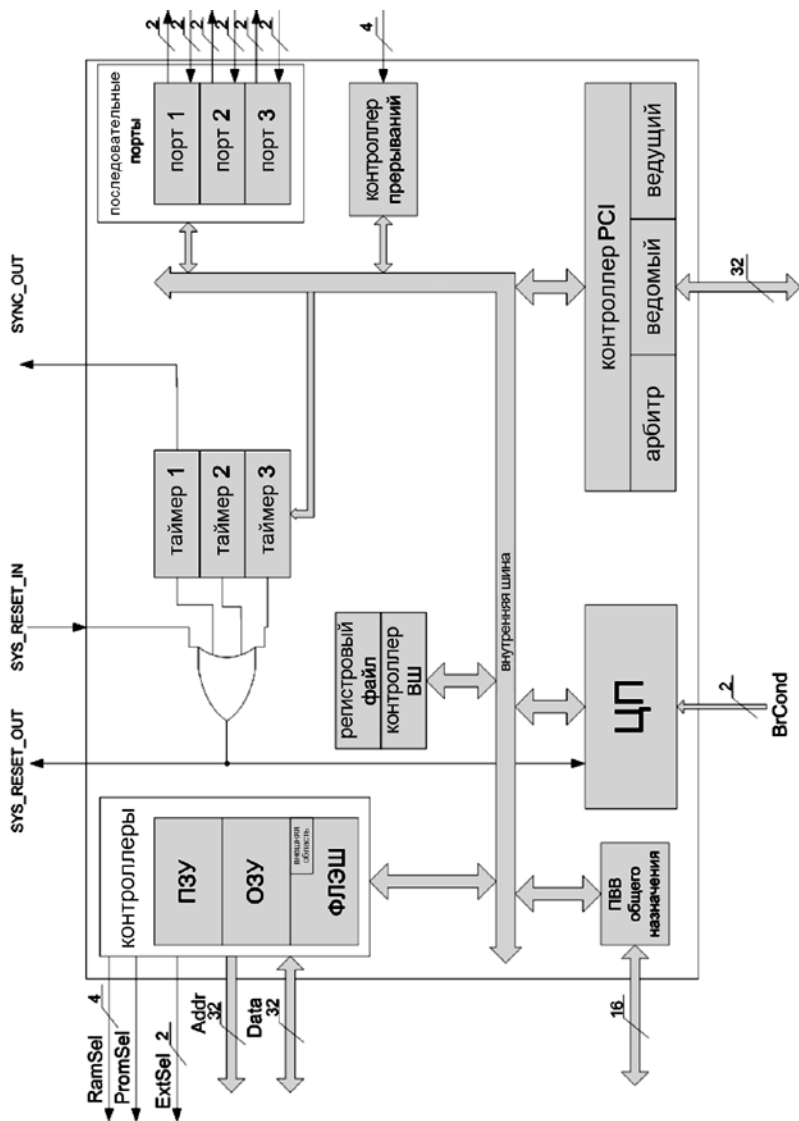


Рис. 1. Структурная схема микросхемы 5890BE1T

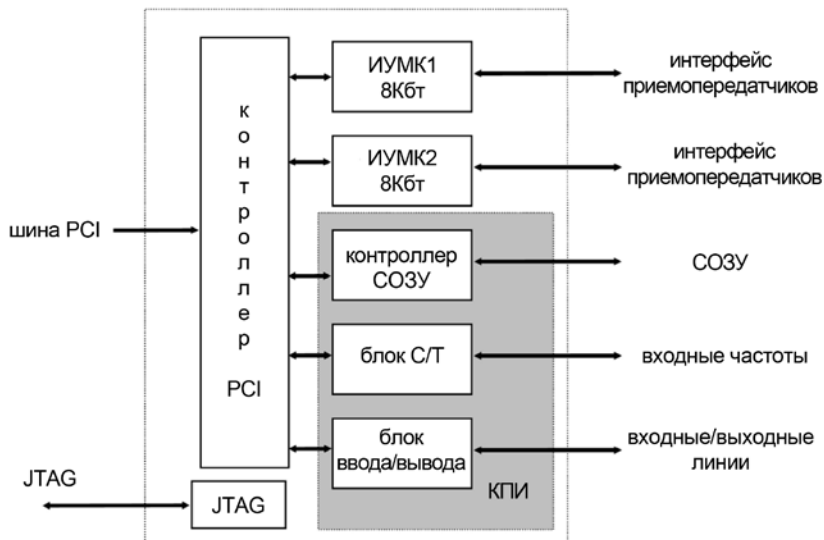
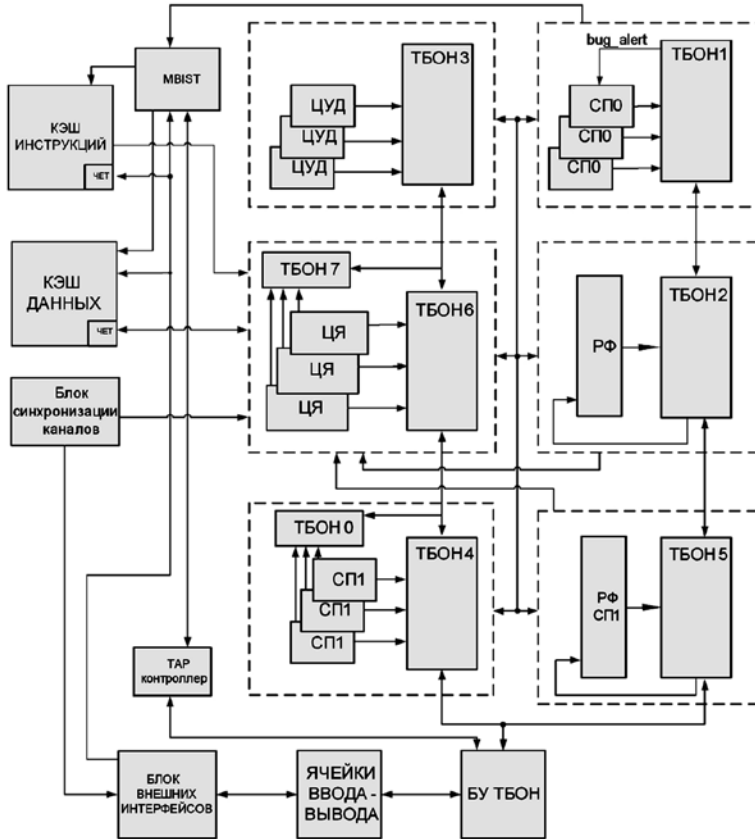


Рис. 2. Блок-схема микросхемы 5890ВГ1Т

Микросхема 5890ВМ1Т является радиационно стойкой версией популярной микросхемы 1890ВМ1Т и обладает программной, электрической и конструктивной совместимостью с ней. В составе микросхемы реализовано ядро 32-разрядной RISC микропроцессора. Микросхема изготавливается по 0,5 мкм КМОП КНИ-технологии, имеет рабочую частоту 33 МГц при напряжении питания 3,3 В. Предельная допустимая накопленная доза от воздействия ионизирующего излучения космического пространства составляет не менее 200 крад ( $\text{SiO}_2$ ). Тиристорный эффект при воздействии ТЗЧ с уровнем ЛПЭ до 80 МэВ·см<sup>2</sup>/мг отсутствует. В микросхеме применены схемотехнические решения по уменьшению частоты одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ. Сечение насыщения одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ – не более  $3 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/бит. Микросхема выпускается в металлокерамическом 108-выводном корпусе типа QFP.

Микросхема 1900ВМ2Т целенаправленно создавалась с целью максимального снижения вероятности одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ. Микросхема реализует функции центрального процессора и имеет программную и конструктивную совместимость с микропроцессорами 1890ВМ2Т. Микросхема изготавливается по 0,35 мкм КМОП КНИ-технологии, имеет рабочую частоту 66 МГц при напряжении питания 3,3В. Предельная допустимая накопленная доза от воздействия ионизирующего излучения космического пространства составляет не менее 200 крад ( $\text{SiO}_2$ ). Тиристорный эффект при воздействии ТЗЧ с уровнем ЛПЭ до 80 МэВ·см<sup>2</sup>/мг отсутствует. В микросхеме применено множество схемотехнических

решений по уменьшению частоты одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ. По оценкам проведенных испытаний\* сечение насыщения одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ составляет не более



**Рис. 3.** Блок-схема микросхемы 1900VM2Т

ЦЯ – целочисленное ядро;

ЦУД – блок целочисленного умножения-деления;

СП0 – системный сопроцессор;

РФ – регистровый файл;

СП1 – сопроцессор вещественной арифметики;

РФ СП1 – регистровый файл сопроцессора СП1;

ТБОН — типовой блок обеспечения надежности;

БУ ТБОН — блок управления типовыми блоками обеспечения надежности.

\* Осипенко П. Н., Чумаков А. И., Василегин В. Б., Васильев А. Л., Антонов А. А., Яненко А. В. Оценка сбоеустойчивости микропроцессора 1900VM2Т, оптимизированного для применения в условиях воздействия факторов космического пространства, при воздействии тяжелых заряженных частиц // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2012»: Научно-технич. сб. Вып. 15. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. С. 111–112.

$2 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/бит и сечение функциональных прерываний составляет не более  $3,3 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/БИС. Микросхема выпускается в металлокерамическом 108-выводном корпусе типа QFP. Структурная схема микросхемы 1900BM2T с учетом разбиения процессора на сложно функциональные модули с троированием и выходным мажорированием в блоках обеспечения надежности приведена на рис. 3.

Для повышения устойчивости к сбоям при проектировании микросхемы предприняты следующие меры:

- регистровые файлы (РФ) выполнены на специальных ячейках, устойчивых к сбоям, и защищены кодами Хемминга;
- внутренняя кэш-память данных и инструкций выполнена на специальных ячейках, устойчивых к сбоям, и защищена дополнительными битами четности (по одному на каждый байт);
- в сопроцессоре (СПО) предусмотрены счётчики ошибок в кэш-памяти данных и инструкций;
- схема процессора разбита на шесть функциональных модулей (ФМ), каждый из которых выполнен в трёх экземплярах с выходным мажорированием;
- мажоритарные схемы на выходах ФМ выполнены в виде интеллектуальных узлов, именуемых далее типовыми блоками обеспечения надежности (ТБОН) и позволяющих собирать статистику ошибок по каждому каналу и выявлять отказавший блок;
- обеспечен доступ к каждому ТБОН как через внешний интерфейс TAP контроллера для обеспечения мониторинга работоспособности процессора, так и со стороны процессора;
- добавлен блок, позволяющий проводить контроль работоспособности всей доступной кэш-памяти средствами MBIST без отрыва процессора от выполнения основной задачи.

### **Разрабатываемые изделия**

В настоящий момент в НИИСИ РАН разрабатывается целый ряд изделий, обладающих требуемыми характеристиками по стойкости к воздействию ИИ КП, из которых в наибольшей степени готовности находятся многокристальный модуль (МКМ) Багет83\_микро и микросхема 1907BE1T.

Многокристальный модуль Багет83\_микро реализует функции управляющей ЭВМ и включает в себя процессорное ядро на базе кристалла микросхемы 5890BE1T, контроллер МКО по ГОСТ Р 52070-2003 на базе кристалла микросхемы 5890BG1T и оперативное запоминающее устройство статического типа емкостью 512 КБ на базе 4-х кристаллов микросхемы 1649PU1. Предельно допустимая накопленная доза от воздействия ионизирующих излучений космического пространства составляет не менее 200 крад (SiO<sub>2</sub>). Тиристорный эффект при воздействии ТЗЧ с уровнем ЛПЭ до 80 МэВ·см<sup>2</sup>/мг отсутствует. МКМ выпускается в металлокерамическом 304-выводном корпусе типа QFP. Структурная схема МКМ Багет83\_микро приведена на рис. 4, внешний вид МКМ изображен на рис. 5.



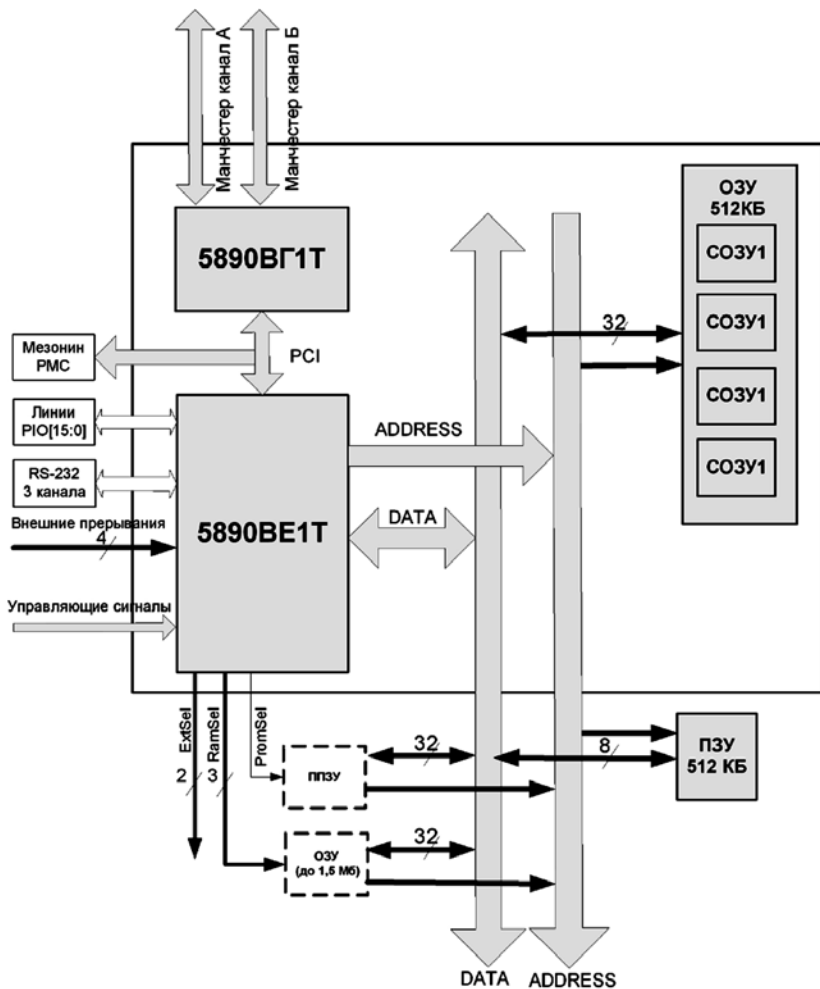


Рис. 4. Структурная схема МКМ Багет83\_микро

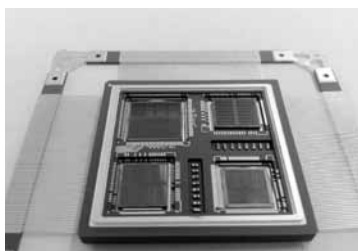


Рис. 5. Внешний вид МКМ Багет83\_микро

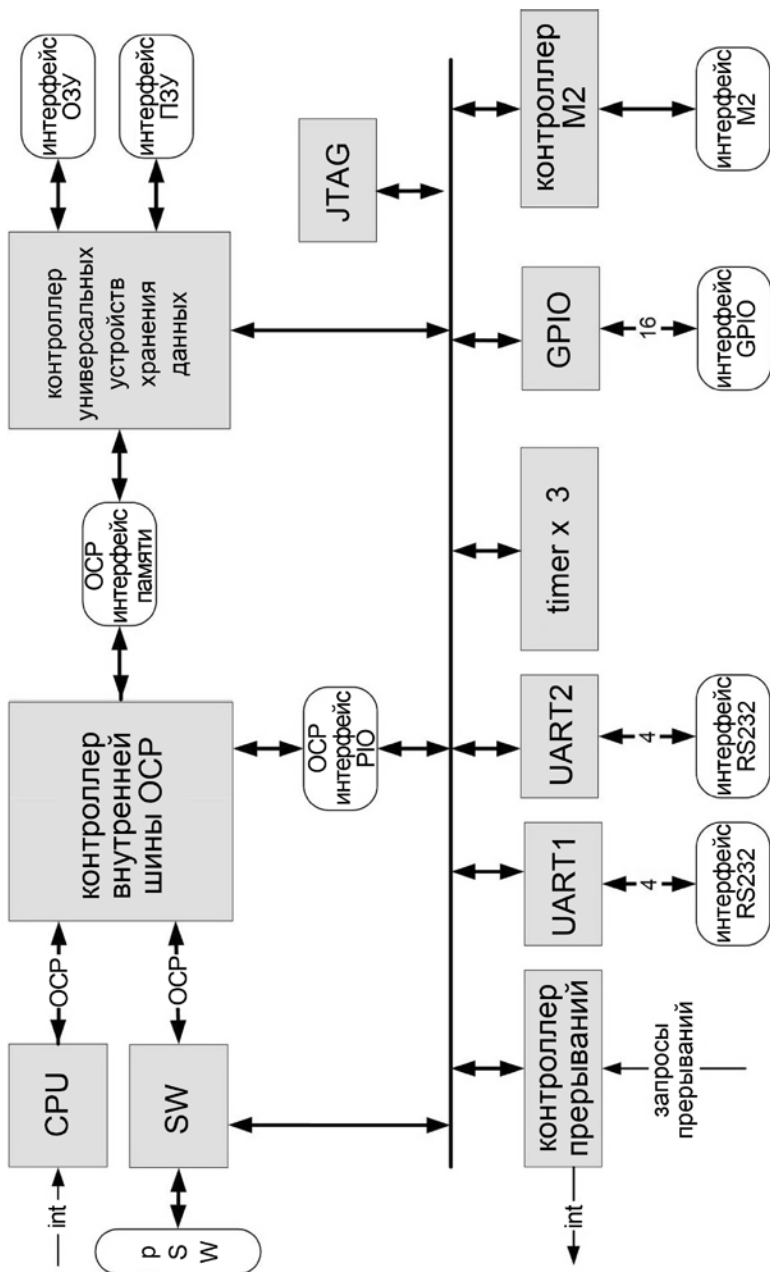


Рис. 6. Структурная схема микросхемы 1907BM1Т

Микросхема 1907BM1T является первым представителем широкого семейства разрабатываемых в НИИСИ РАН микросхем с изготовлением по технологии 0,25 КМОП КНИ. Микросхема представляет систему на кристалле и содержит, помимо процессорного ядра, богатый набор периферийных контроллеров, в том числе контроллер интерфейса SpaceWire. Процессорное ядро имеет рабочую частоту 100 МГц, напряжение питания 3,3 В для периферийных ячеек и 2,5 В для ядра. Предельно допустимая накопленная доза от воздействия ионизирующего излучения космического пространства составляет не менее 200 крад (SiO<sub>2</sub>). Тиристорный эффект при воздействии ТЗЧ с уровнем ЛПЭ до 80 МэВ·см<sup>2</sup>/мг отсутствует. Микросхема планируется к выпуску в металлокерамическом 240 выводном корпусе типа QFP. Макетные образцы получены в 2012 г., образцы для поставки потребителям планируется получить в 2013 г. Структурная схема микросхемы 1907BM1T приведена на рис. 6.

В приведенной ниже таблице дается сравнение микросхем НИИСИ РАН для космических приложений с лучшими зарубежными аналогами.

**Сравнение микропроцессоров НИИСИ РАН для космических приложений с лучшими зарубежными аналогами**

Микро-про-цессор	RAD750	UT699	RAD-Hard BRE440	5890BE1T	1900BM2T	1907BM1T
Компания	BAE Systems	Aeroflex	Broad Reach Engineering	НИИСИ РАН	НИИСИ РАН	НИИСИ РАН
Технология, мкм	0,15	0,25	0,15 КНИ	0,5 КНИ	0,35 КНИ	0,25 КНИ
Частота, МГц	200	66	83	33	66	100
Год начала производства	2010	2010	2010	2009	2012	2014

**Заключение**

Как можно видеть из данных таблицы, вопреки бытующему мнению, что в России ничего не разрабатывается и не производится и нужно все покупать за границей, есть основания считать, что уровень развития цифровой элементной базы для космических приложений в России соответствует мировому и при некоторой поддержке государства может превзойти его. В настоящее время есть возможность полностью удовлетворить потребности разработчиков бортовых космических систем современной, качественной, стойкой к ИИ КП элементной базой.

## **ELECTRONIC COMPONENTS OF SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE FOR SYSTEM ANALYSIS RAS FOR SPACE APPLICATION**

*P. N. Osipenko*

*Scientific Research Institute for System Analysis  
Russian Academy of Sciences (SRISA RAS), Moscow*

The short description of main products tolerated to space ionizing irradiation, developed by SRISA, is presented. 32-bit microprocessors, including System-on-Chip 5890VE1T and 1553 interface controller are described. Products, that already developed and that are being developed are presented, including multichip module Baget83\_micro and perspective System on Chip with embedded SpaceWire controller.

**Keywords:** space ionization irradiation, microprocessor, multichip module.

---

*Osipenko Pavel Nikolaevich* – Deputy head of R&D division Scientific Research Institute for System Analysis Russian Academy of Sciences, PhD, [osipenko@niisi.msk.ru](mailto:osipenko@niisi.msk.ru)

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ D-SUB СОЕДИНИТЕЛЕЙ ПРИ СОЗДАНИИ МАСШТАБИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

***А. А. Коновалов, К. В. Ануфрейчик, М. Е. Лупян,  
М. И. Маркичев, Д. Г. Тимонин, И. В. Чулков, А. А. Шибалкин***  
***Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт космических исследований  
Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва***

В статье рассматривается построение системы управления, сбора и передачи информации (СУСПИ) с использованием внешних блочных прямоугольных соединителей типа D-Subminiature (D-SUB). Сформулированы недостатки применения отечественных миниатюрных соединителей типа РС и МР1, усложняющие процесс сборки и отладки приборов. На примере рамочной конструкции прибора СУСПИ показано применение соединителей D-SUB, определены преимущества использования соединителей с монтажом на печатную плату.

**Ключевые слова:** системы сбора научной информации, блочные соединители, D-Subminiature, жгут, печатная плата, бортовая кабельная сеть, рамочная конструкция.

В последнее время при разработке бортовых приборов особое внимание уделяется уменьшению внешних габаритов и массы. Однако сократить количество проводов в бортовой кабельной сети (соответственно количество контактов и соединителей) удастся не часто – применяются стандартные высокоскоростные интерфейсы с минимальным количеством линий, а также выполняются требования по резервированию цепей питания и ключевых управляющих сигналов. В статье рассматривается решение вопроса миниатюризации с использованием внешних блочных прямоугольных соединителей типа D-Subminiature (D-SUB). Это семейство разъемов характеризуется параллельным расположением контактов в два, три или четыре ряда. Разъемы D-SUB были изобретены

---

***Коновалов Алексей Александрович*** – руководитель группы, [konovalov@iki.rssi.ru](mailto:konovalov@iki.rssi.ru)  
***Ануфрейчик Константин Владимирович*** – начальник лаборатории, [kos@iki.rssi.ru](mailto:kos@iki.rssi.ru)

***Лупян Маргарита Евгеньевна*** – инженер, [lupyn@rssi.ru](mailto:lupyn@rssi.ru)

***Маркичев Максим Игоревич*** – инженер, [markichev@iki.rssi.ru](mailto:markichev@iki.rssi.ru)

***Тимонин Денис Геннадиевич*** – главный специалист, [timonin@iki.rssi.ru](mailto:timonin@iki.rssi.ru)

***Чулков Илья Владиленович*** – заместитель директора ИКИ РАН, [chulkov@iki.rssi.ru](mailto:chulkov@iki.rssi.ru)

***Шибалкин Андрей Алексеевич*** – ведущий конструктор, [shibalkin@iki.rssi.ru](mailto:shibalkin@iki.rssi.ru)



**Рис. 1.** Внешний вид соединителей D-Subminiature

и введены в употребление фирмой ITT Cannon, подразделением ITT Corporation в 1952 году. Внешний вид этих соединителей представлен на рис. 1.

В настоящее время кроме применения в компьютерной технике производителями предлагаются высоконадежные семейства соединителей, по геометрическим параметрам повторяющие стандарт D-SUB — DIN 41652. Военные США используют стандарт MIL-DTL-24308. Однако, в отличие от своих коммерческих предков, эти соединители имеют расширенный температурный диапазон применения, а также лучшие параметры по сопротивлению контактов и соединений, различные варианты крепления на панели блоков, облегченные по массе, и другие усовершенствования. Различаются разъемы также по способу монтажа на печатные платы или на жгут. Самые высокие показатели надежности кабельных соединений имеют разъемы со специальными обжимными контактами. При всем многообразии исполнения соединителей военного и космического применения, большинство из них совместимо по габаритам, распиновке, способам сочленения с их коммерческими или промышленными аналогами. Благодаря этому лабораторные, технологические образцы приборов или бортовой кабельной сети, а также наземную кабельную сеть допускается изготавливать, заменив высоконадежные разъемы их более дешевыми аналогами.



**Рис. 2.** Бортовой комплекс управления (БКУСНИ) на основе рамочной конструкции

В данной статье описано построение систем сбора на основе рамочной конструкции, когда печатные платы с электронными компонентами расположены внутри цельнометаллической рамки, по одной или две платы на этаже, в зависимости от выбранной компоновки. Пример блока представлен на рис. 2.

На предыдущее поколение бортовых систем сбора и обработки информации, разрабатываемых в ИКИ РАН, в качестве внешних соединителей устанавливались отечественные разъемы типа РС АВО.364.047.ТУ1 ПО.070.052. и МР1 ГЕО.364.184 ТУ1. У этого решения был ряд недостатков:

- наличие внутренних жгутов усложняет сборку узла – площадь, занимаемая размещением жгутов и мест под их заделку в плате, в 2-3 раза больше, чем посадочное место разъема для пайки под прямым углом;
- размер этажа рамочной конструкции задается высотой соединителя (для РС-50 эта величина равна 33 мм);
- размещение в одном этаже двух плат затрудняет сборку, так как жгуты приходится выкладывать на плате в шахматном порядке, чтобы они не мешали друг другу;
- ограничение по смежному расположению соединителей на этажах – ответные части кабельной сети приходится подстыковывать и закреплять вручную, вращая гайку на соединителе (близко расположенные сверху и снизу подстыкованные кабели мешают правильно закрепить кабельный разъем и это накладывает ограничение на очередность подстыковки кабелей снизу вверх или сверху вниз);
- необходимость герметизировать компаундом всю наземную кабельную сеть – для обеспечения правильного соединения внешнего экрана с кожухами соединителей необходимо использовать специально разработанные в ИКИ РАН штуцеры;

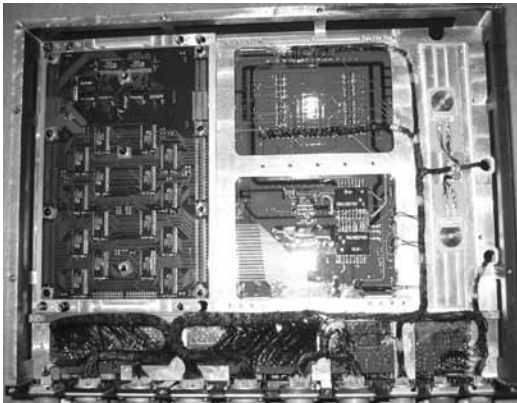


Рис. 3. Жгуты системы ССРНИ

• разрешенные частоты сигналов до 3 МГц; таким образом, для высокоскоростных интерфейсов с бортовым радиокомплексом или с высокоинформативными приборами такие соединители не подходят.

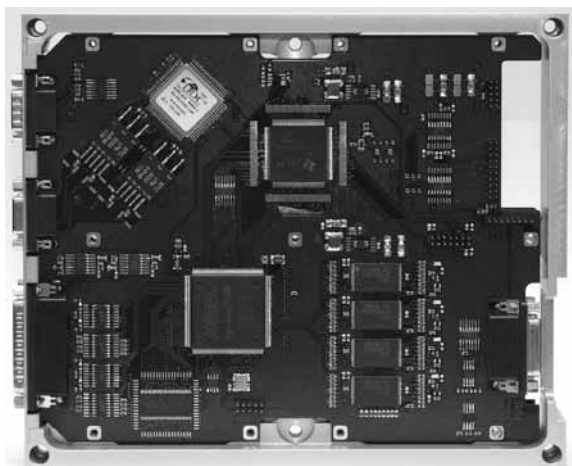
На рис. 3 представлено пример расположения внутри системы сбора и регистрации научной

информации (ССРНИ) жгутов для интерфейсов связи с приборами и радиокомплексом. И это только половина проводов, расположенная с нижней стороны опорной рамы от десяти соединителей, среди которых четыре MP1-76 и два РС-32. С обратной стороны расположено такое же количество жгутов от таких же десяти разъемов. Общее количество проводов в жгутах около одной тысячи, длина среднего отрезка 20 см, таким образом, общая длина провода внутри блока около двухсот метров. Помимо большой трудоемкости создания таких жгутов, внести какое-либо изменение в готовый жгут или устранить неисправность чрезвычайно сложно, и может нарушиться целостность вязки жгута.

Все эти перечисленные недостатки побуждают разработчиков аппаратуры искать альтернативные методы соединения внешних разъемов с электронными печатными платами. Самым простым способом является использование соединителей, которые монтируются прямо на печатную плату. При этом ориентация направления штырей соединителя относительно печатной платы может быть перпендикулярной плате, под прямым углом, или плата монтируется между рядами штырей.

Конкретно в этой статье рассматривается применение семейства D-SUB, хотя существуют и другие схожие по решаемым задачам категории отечественных и зарубежных соединителей (СНЦ, СНП, Micro-D, Nano-D, Centronics). Для рамочной конструкции блоков можно выделить ряд преимуществ применения разъемов D-SUB:

- пайка в плату, отсутствие жгутов, увеличение места под трассировку;
- подстыковка кабелей непосредственно к узлу, возможность отладки в разобранном состоянии;



**Рис. 4.** Пример микропроцессорного узла в рамке



- размещение в стандартном этаже (38 мм) двух плат, удобство сборки;
- стоимость изготовления наземной кабельной сети существенно ниже, нет необходимости герметезировать компаундами (кроме кабелей для термовакуумных испытаний).

На рис. 4 представлена печатная плата микропроцессорного узла SMM блока СУСПИ. Как видно, непосредственно за малогабаритными соединителями, впаянными в плату, расположены электронные компоненты. Плотность монтажа и трассировка существенно повышается. Одним из преимуществ, указанных выше, является возможность отладки отдельных плат или всех плат, разложенных в плоскости на столе, однако с применением штатной кабельной сети от контрольно-испытательной аппаратуры. В случае с соединителями типа MP1 или РС необходимо было расплавлять отладочные временные жгуты, которые дополнительно требовали аккуратного обращения.

В шести новых приборах, разработка которых началась в 2011-2012 гг., установлены соединители типа D-SUB и Micro-D с аналогичными достоинствами. И хотя имеются недостатки применения этих соединителей, такие как отсутствие (на текущий момент) нормативной документации по изготовлению бортовой кабельной сети или большие сроки поставки изделий для космического применения, все преимущества от их использования позволяют существенно экономить время на разработку, изготовление, отладку, сборку и стыковку.

## **FEATURES OF THE USE OF RECTANGULAR D-SUB CONNECTOR TO CREATE SCALABLE CONTROL SYSTEM, DATA ACQUISITION AND TRANSMISSION**

*A. A. Konovalov, K. V. Anufreichik, M. E. Lupyan, M. I. Markichev, D. G. Timonin, I. V. Chulkov, A. A. Shibalkin*

*Space Research Institute Russian Academy of Science (IKI RAN), Moscow*

The article discusses how to make the control systems, data acquisition and transmission using panel mount rectangular connectors type D-Subminiature (D-SUB). Stated disadvantages of Russian miniature connector of the RS and MR1, make it difficult to build and debug devices. Based on the framed instrument design shows the implementation of the connector D-SUB, defined benefits of printed circuit board mounted connectors.

***А. А. Коновалов, К. В. Ануфрейчик, М. Е. Лупян,  
М. И. Маркичев, Д. Г. Тимонин, И. В. Чулков...***

---

**Keywords:** data acquisition and transmission system, panel mounted connectors, D-Subminiature, PCB, cable, flight cables, framed instrument design.

---

***Konovалov Aleksei Aleksandrovich*** – team leader,  
konovалov@iki.rssi.ru

***Anufreichik Konstantin Vladimirovich*** – head of laboratory,  
kos@iki.rssi.ru

***Lupyan Margarita Evgenievna*** – engineer,  
lupyn@rssi.ru

***Markichev Maksim Igorevich*** – engineer,  
markichev@iki.rssi.ru

***Timonin Denis Gennadievich*** – chief specialist,  
timonin@iki.rssi.ru

***Chulkov Ilya Vladilenovich*** – deputy director,  
chulkov@iki.rssi.ru

***Shibalkin Andrey Alekseevich*** – leading designer,  
shibalkin@iki.rssi.ru

# НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСПУТНИКОВ, ПОСТРОЕННЫХ НА БАЗЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ «СИНЕРГИЯ» БЛОЧНО-МОДУЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

*П. Н. Бокучава<sup>1</sup>, А. П. Гусев<sup>1</sup>, Д. Е. Колосов<sup>1</sup>, М. Н. Луттиева<sup>1</sup>,  
Д. В. Малыгин<sup>1</sup>, М. А. Малы́й<sup>1</sup>, Е. П. Сороколетов<sup>1</sup>,  
С. С. Чеусов<sup>1</sup>, А. А. Варенов<sup>2</sup>, Ю. А. Ветринский<sup>2</sup>,  
К. Г. Сивачева<sup>2</sup>, Т. А. Тенищева<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова» (БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова), Санкт-Петербург*

<sup>2</sup> *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский университет «Санкт-Петербургский государственный Политехнический университет» (СПбГПУ), Санкт-Петербург*

---

*Бокучава Петр Нугзариевич* – руководитель отдела САПР, инженер,  
Bokuchava.PN@Astronomikon.ru

*Гусев Антон Павлович* – специалист по лазерным системам.  
Gusev.AP@Astronomikon.ru

*Колосов Дмитрий Евгеньевич* – руководитель отдела ЦУП, инженер.  
Kolosov.DE@Astronomikon.ru

*Луттиева Марина Николаевна* – специалист по КИП, инженер,  
Luttieva.MN@Astronomikon.ru

*Малыгин Денис Владимирович* – заведующий лабораторией проектирования  
МКА «Астрономикон», инженер, Malygin.DV@Astronomikon.ru

*Малый Максим Александрович* – руководитель отдела КИП, инженер,  
Malyu.MA@Astronomikon.ru

*Сороколетов Евгений Павлович* – руководитель отдела аналитики, инженер,  
Sorokoletov.EP@Astronomikon.ru

*Чеусов Сергей Сергеевич* – специалист по радиосвязи,  
Cheusov.SS@Astronomikon.ru

*Варенов Антон Александрович* – специалист по БВК,  
Varenov.AA@Astronomikon.ru

*Ветринский Юрий Анатольевич* – руководитель лаборатории радиотехники,  
кандидат технических наук, Vetrinsky@mail.spbstu.ru

*Сивачева Ксения Геннадьевна* – специалист по радиации,  
Sivacheva.KG@Astronomikon.ru

*Тенищева Татьяна Александровна* – специалист по радиосвязи,  
Tenishcheva.TA@Astronomikon.ru

В работе рассмотрена концепция формирования сверхмалых космических аппаратов (СМКА) — наноспутников — различного назначения, способных адаптироваться под любую полезную нагрузку на базе универсальной платформы «Синергия» блочно-модульного исполнения.

Эта конструкция может рассматриваться как коренная модернизация наноспутника, позволяющая существенно снизить габариты и повысить эффективность использования СМКА типа CubeSat.

**Ключевые слова:** платформа «Синергия», наноспутник, кубсат, персональный спутник, космические эксперименты, CubeSat.

Вступление в третье тысячелетие совпало с новым этапом развития технологий миниатюрных космических аппаратов – микро- и наноспутников.

Малые космические аппараты уже активно используются для дистанционного зондирования Земли, экологического мониторинга, прогноза землетрясений, исследования ионосферы. Основная проблема в освоении космоса заключается в преодолении гравитационного поля Земли, так, стоимость вывода 1 кг полезной нагрузки на круговую орбиту ориентировочно составляет ~10 тыс. дол. Чем легче спутник, тем дешевле обходится его доставка [Бокучава и др., 2012].

Типичный наноспутник представляет собой тело произвольной формы, поскольку запускается попутно с основным грузом ракеты-носителя, где занимает имеющееся свободное место.

Десять лет назад был разработан новый класс космических аппаратов – сверхмалые космические аппараты CubeSat с размерами 100×100×100 мм, массой около 1 кг и объемом 1 литр. Он сделал доступными космические технологии для проведения научных и технологических экспериментов в космосе всем желающим [Малыгин, 2011а].

На сегодняшний день количество коммерческих фирм на мировом рынке, оказывающих услуги по проектированию и продаже спутников этого класса, не более пяти. Однако с каждым годом данный рынок увеличивает объем, что, в конечном счете, приведет к формированию устойчивой ниши коммерческих услуг в отрасли космических технологий.

В российском экономическом пространстве лаборатория «Астрономикон» является первым частным предприятием, которое занимается разработкой СМКА класса CubeSat. Сотрудниками лаборатории разрабатывается платформа «Синергия» блочно-модульного типа, предназначенная для проведения технологических и научных экспериментов в космическом пространстве. Она пред-

ставляет собой универсальный космический аппарат, состоящий только из служебных систем [Малыгин, 2012а; 2011б]. По желанию заказчика платформа может быть доукомплектована научной аппаратурой под конкретные задачи.

Подобное технологическое решение имеет ряд преимуществ:

- высокая взаимозаменяемость элементов платформы как следствие модульного принципа организации систем;
- выполнение разнообразных задач;
- блочно-модульный принцип построения, позволяющий существенно видоизменять форм-фактор СМКА на любых этапах проектирования или сборки.

Широкий спектр выполняемых задач [Малыгин, 2012б] достигается путем реализации возможности максимально простой установки и настройки разнообразных чувствительных элементов, в том числе: датчиков давления, температуры, освещенности, излучений, датчиков Холла и т.д. Простота подключения, в свою очередь, обусловлена разработкой универсальных интерфейсов и использованием многофункционального программного обеспечения.

Изменение форм-фактора СМКА (рис. 1), построенного на базе платформы «Синергия», при добавлении дополнительных модулей существенно расширяет возможности установки полезной нагрузки и, как следствие, области использования космического аппарата. Учитывая данное обстоятельство, коллективом лаборатории «Астрономикон» разрабатываются устанавливаемые на платформу полезные нагрузки для решения ряда прикладных и научных задач, например:

- цифровая фотокамера для дистанционного зондирования Земли;
- система проверки функционирования коммерческих электронных компонентов при воздействии факторов космического пространства (ФКП);
- система исследования космического излучения;
- система дальней космической связи на основе эффекта квантовой запутанности.

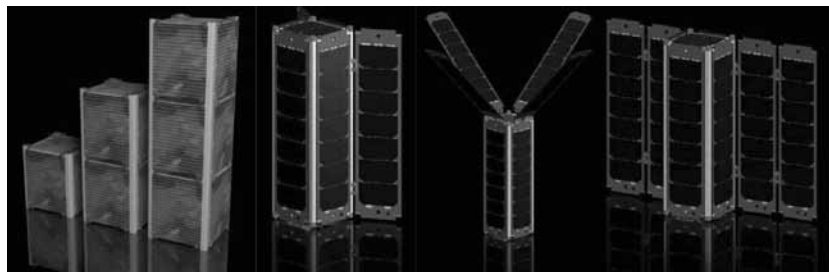
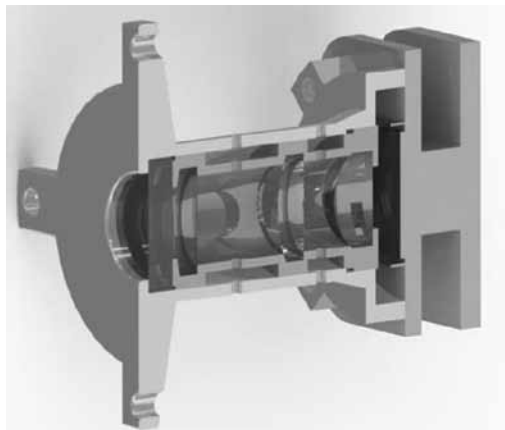


Рис. 1. Пример построение СМКА



**Рис. 2.** Проектируемая цифровая камера в разрезе

Например, космическая миссия по мониторингу поверхности Земли с целью исследования стратов может быть осуществлена с помощью разработанной цифровой камеры (рис. 2), обладающей следующими характеристиками:

- размер матрицы 1/3 дюйма;
- разрешение 752×480;
- скорость съемки — 60 кадров в секунду;
- диапазон рабочих температур  $-30\dots+70$  °С.

Одним из наиболее перспективных направлений исследований является определение воздействий ФКП на электронные компоненты. СМКА сталкивается с двумя типами излучения: ионизирующей радиацией естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ) и солнечными (СКЛ) и галактическими (ГКЛ) космическими лучами. Протоны ЕРПЗ, взаимодействуя с конструкционными материалами спутника путём ядерных реакций, порождают поток нейтронов, который, в свою очередь, может создать тяжёлые заряженные частицы (например,  $\alpha$ -частицы). Тяжёлые заряженные частицы СКЛ и ГКЛ, проникая внутрь чувствительной области полупроводникового материала, создают локальные нарушения электропроводности.

Из вышеописанной проблемы следует сделать вывод, что необходимо проводить тестирование электроники перед её запуском в космическое пространство. Установки для проведения испытаний дороги в производстве и сложны в обслуживании. Эту задачу можно решить с помощью системы контроля функционирования микросэлектронных элементов в условиях их эксплуатации на СМКА. Результаты испытаний будут иметь меньшую погрешность, так как тестирование будет проходить непосредственно в реальных космических условиях, а стоимость проведения такого эксперимента будет ниже.

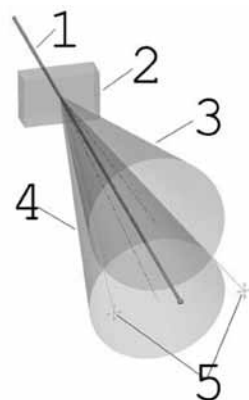
В рамках изучения околоземного космического пространства сотрудниками лаборатории разрабатывается система для исследования космического излучения (СИК). Прибор представляет собой электронное устройство, регистрирующими элементами которого являются датчики, основанные на радиационно-восприимчивых полевых транзисторах (RadFET – Radiation-sensing Field Effect Transistor). Воздействия ионизирующих излучений – гамма-лучей, рентгеновских лучей, свободных электронов и высокоэнергетических протонов и ядер – вызывают предсказуемые изменения выходного напряжения датчика, что делает систему универсальным прибором, способным выполнять широкий спектр задач. Также отметим следующие достоинства датчика:

- оперативное получение информации;
- малые размеры датчика;
- низкие либо нулевые затраты энергии;
- электронный сигнал на выходе;
- низкая стоимость.

Перечень исследований в области космических излучений, которые могут быть проведены на базе платформы «Синергия» с установленной СИК, достаточно широк и может включать следующие направления:

- плазменные процессы в магнитосфере и ионосфере и их взаимосвязи с явлениями на Солнце и в межпланетной среде;
- солнечная активность и динамические процессы в ближней гелиосфере;
- нетепловое ускорение частиц на Солнце, активные процессы в атмосфере Солнца, в гелиосфере и их воздействия на магнитосферу Земли;
- разработка теоретических моделей глобальных электромагнитных процессов в космическом пространстве и нелинейных плазменных систем, определяющих динамику солнечно-земных связей;
- источники природы вариаций земной поверхности.

По данным Федерального космического агентства России 98 % космических аппаратов имеют системы связи на основе электромагнитного излучения (ЭМИ). Однако данный метод, несмотря на широкое распространение, имеет ряд недостатков:



**Рис. 3.** Система по применению квантовой запутанности (1 — лазерный поток, 2 — нелинейный кристалл, 3 — вертикально поляризованные фотоны (V), 4 — горизонтально поляризованные фотоны (H), 5 — запутанные фотоны)

- ограниченная зона приема сигнала для низколетящих аппаратов;
- использование мощных передатчиков, требующих больших энергоресурсов системы, что приводит к увеличению массы аппарата.

Однако система связи, основанная на принципе квантовой запутанности, позволит устанавливать контакт с аппаратом на значительном удалении от наземных пунктов, без задержек и помех, характерных традиционным ЭМИ системам.

Предлагаемая система может состоять из источника потоков запутанных фотонов, в качестве которого выступает определённый нелинейный материал, освещаемый лазерным потоком определённой частоты и интенсивности. В результате спонтанного параметрического рассеяния (СПР) на выходе получаются два конуса поляризации —  $H$  и  $V$ , несущие пары фотонов в запутанном квантовом состоянии (бифотонов) (рис. 3). Выбор конкретного материала зависит от задач эксперимента, используемой частоты и мощности. Для экспериментов можно использовать неорганические нелинейные кристаллы с регулярной доменной структурой, например  $KTiOPO_4$  (титанил фосфат калия) или  $\beta-BaV_2O_4$  (бета-борат бария), которые позволяют производить слабые квантовые измерения.

В данной работе произведен краткий обзор наиболее перспективных исследований, проводимых лабораторией «Астрономикон», и проектов, связанных с применением СМКА, построенных на базе платформы «Синергия».

## **Литература**

[Бокучава и др., 2012] Бокучава П. Н., Колосов Д. Е., Малыгин Д. В. Универсальный адаптер стыковки СМКА с ракетой-носителем // 4-я Общерос. молодежная научно-технич. конф. «Молодежь. Техника. Космос», г. Санкт-Петербург, 14–16 марта 2012 г. СПб.: БГТУ ВОЕНМЕХ, 2012. С. 176–178.

[Малыгин, 2011а] Малыгин Д. В. Универсальная платформа сверхмалого космического аппарата // Материалы 5-го Всерос. форума студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Санкт-Петербург, 28 сентября – 1 октября 2011 г. СПб.: СПбГПУ, 2011. С. 38–40.

[Малыгин, 2011б] Малыгин Д. В. Разработка автоматизированной системы управления двигателем постоянного тока малого космического аппарата // 16-я Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов, г. Санкт-Петербург, 20–29 июня 2011 г. СПб.: СПбГУ, 2011. С. 139–140.

[Малыгин, 2012а] Малыгин Д. В. Бортовой вычислительный комплекс универсальной платформы «Синергия» сверхмалого космического аппарата // 10-я Международ. студенческая школа-семинар, г. Судак, 17–23 мая 2012 г. М.: МИЭМ, 2012. С. 198–200.

[Малыгин, 2012б] Малыгин Д. В. Применение сверхмалых космических аппаратов для исследования стратов // 4-я Общерос. молодежная научно-технич. конф. «Молодежь. Техника. Космос», г. Санкт-Петербург, 14–16 марта 2012 г. СПб.: БГТУ ВОЕНМЕХ, 2012. С. 117–119.



## SEVERAL ASPECTS OF USE EXTRASMALL SATELLITES CONSTRUCTED ON BASIS BLOCK-MODULAR UNIVERSAL PLATFORM «SYNERGY»

*P. N. Bokuchava*<sup>1</sup>, *A. P. Gusev*<sup>1</sup>, *D. E. Kolosov*<sup>1</sup>, *M. N. Luttieva*<sup>1</sup>,  
*D. V. Malygin*<sup>1</sup>, *M. A. Malyy*<sup>1</sup>, *E. P. Sorokoletov*<sup>1</sup>, *S. S. Cheusov*<sup>1</sup>,  
*A. A. Varenov*<sup>2</sup>, *Y. A. Vetrinsky*<sup>2</sup>, *K. G. Sivacheva*<sup>2</sup>,  
*T. A. Tenischeva*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov (BSTU «VOENMEH» named after D. F. Ustinov), St. Petersburg*

<sup>2</sup> *National Research University “St. Petersburg State Polytechnical University” (NRU SPbSPU), St. Petersburg*

In the given work we consider the concept of forming extrasmall satellites (ESS) for various purposes that can adapt to any payload to the base of a universal platform “Synergy” modular implementation. This design can be seen as a radical modernization of the nanosatellite, which allows to significantly reduce size and increase the efficiency of ESS type CubeSat

**Keywords:** the platform “Synergy”, nanosatellite, a personal satellite space experiments, CubeSat.

---

***Bokuchava Peter Nugzarievich*** – head of CAD/CAM/CAE dep., engineer,  
Bokuchav.PN@Astronomikon.ru

***Gusev Anton Pavlovich*** – an expert on laser systems, Gusev.AP@Astronomikon.ru

***Kolosov Dmitry Evgen'evich*** – head of MCC dep., engineer,  
Kolosov.DE@Astronomikon.ru

***Luttieva Marina Nikolaevna*** – an expert on CDM, engineer,  
Luttieva.MN@Astronomikon.ru

***Malygin Denis Vladimirovich*** – head of nanosatellite design laboratory  
«Astronomikon», engineer, Malygin.DV@Astronomikon.ru

***Malyy Maxim Aleksandrovich*** – head of CMD dep., engineer,  
Malyy.MA@Astronomikon.ru

***Sorokoletov Evgeny Pavlovich*** – head of analytics dep., engineer,  
Sorokoletov.EP@Astronomikon.ru

***Cheusov Sergey Sergeevich*** – an expert on radiocommunication,  
Cheusov.SS@Astronomikon.ru

***Varenov Anton Alexandrovich*** – an expert CPU, Varenov.AA@Astronomikon.ru

***Vetrinsky Yuriy Anatol'evich*** – head of electrotechnical laboratory, PhD,  
Vetrinsky@mail.spbstu.ru

***Sivacheva Ksenia Gennad'evna*** – an expert on radiation protection,  
Sivacheva.KG@Astronomikon.ru

***Tenischeva Tatiana Aleksandrovna*** – an expert on radiocommunication,  
Tenischeva.TA@Astronomikon.ru

# **ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ ВЫВОДА НА ОРБИТУ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАЛЫХ И СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПОПУТНЫМ ГРУЗОМ**

*В. И. Костенко<sup>1</sup>, В. И. Майорова<sup>2</sup>, Н. Н. Игнатъев<sup>3</sup>,  
В. В. Понарядов<sup>4</sup>*

*<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва*

*<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана», Москва*

*<sup>3</sup> Ассоциация космонавтики России, Москва*

*<sup>4</sup> Белорусский государственный университет, Минск*

Рассматривается разработка инновационных технологий и организационно-технологических предложений по упрощению работ при проведении запусков в космос малых и сверхмалых полезных нагрузок существующими отечественными ракетами-носителями с использованием автономной адаптивной системы (ААС), позволяющей снизить затраты и время на подготовку к запуску для проведения космического эксперимента. Особенностью автономной адаптивной системы является ее независимость от систем управления и выдачи команд от космического аппарата (КА), а также способ крепления адаптера к КА с помощью клеевых соединений.

**Ключевые слова:** малый космический аппарат, автономный адаптер, автономная адаптивная система, блок управления, устройство отделения, устройство захвата, клеевое соединение.

## **Введение**

Развитие космической техники показывает, что уже в ближайшей перспективе значительное место в космических программах будут занимать микро- и наноспутники массой от 50 до 1 кг

*Костенко Валерий Иванович – заведующий лабораторией, доктор технических наук, vkostenko@iki.rssi.ru.*

*Майорова Вера Ивановна – профессор, доктор технических наук, Victoria.Mayorova@online.ru.*

*Игнатъев Николай Николаевич – ответственный секретарь Ассоциации космонавтики России, ignnn@mail.ru*

*Понарядов Владимир Васильевич – проректор по экономике и инвестициям, доцент, кандидат физико-математических наук, ponariadov@bsu.by*

[Материалы XXXII Академических чтений, 2008; VIII Международного форума, 2009]. Реализация преимуществ таких спутников (малые сроки и стоимость изготовления) всё в большей степени зависит от организации выведения в космос малых и сверхмалых полезных нагрузок. Российская Федерация имеет значительные возможности и уникальный практический опыт запусков в космос космических аппаратов различного назначения и размеров. Запуски малых космических аппаратов отечественными ракетами-носителями, рассчитанными на нагрузки в сотни и тысячи килограммов, реализуются как попутная нагрузка к штатному запуску. Опыт организации попутных запусков малых и сверхмалых полезных нагрузок (МиСМ ПН) показывает, что существующие технологии интеграции полезных нагрузок со средствами выведения требуют проведения значительного объема работ, что увеличивает время подготовки и повышает стоимость запуска.

Реализация перспективных национальных космических проектов с использованием МиСМ ПН, сохранение и упрочнение позиций России на мировом рынке космических запусков требует разработки и внедрения простых и коммерчески выгодных технологий попутных запусков в космос МиСМ ПН с максимально эффективным использованием потенциала отечественных средств выведения.

### **Концепция запусков малых и сверхмалых полезных нагрузок на орбиту функционирования с использованием автономной адаптивной системы**

Существующие технологии запуска в космос полезных нагрузок используют для интеграции полезной нагрузки с ракетой-носителем (РН) специальные устройства (фермы, адаптеры) с системами отделения, обычно являющимися элементами средства выведения, в которых выдача команды на отделение полезной нагрузки обеспечивается от системы управления РН.

Представляемая концепция предполагает использование для выведения малых и сверхмалых полезных нагрузок автономной адаптивной системы (ААС), которая предназначена для выполнения следующих задач:

- Надёжная механическая связь выводимой полезной нагрузки со средством выведения на всех этапах совместной эксплуатации.
- Формирование и выдача команды на отделение полезной нагрузки без электрических связей со средствами выведения.
- Организация отделения полезной нагрузки от средства выведения с заданными параметрами.
- Снижение затрат на организацию запуска со стороны создателей полезной нагрузки
- Возможность отсоединения полезной нагрузки от средств выведения в случае не состоявшегося запуска.

Реализация такой концепции предполагает создание адаптера, автономного от взаимодействия со средствами выведения кроме механической связи с ними. При этом, формирование и выдача

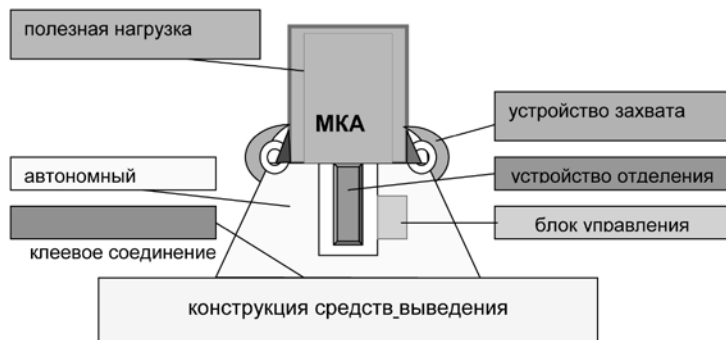
команды на отделение полезной нагрузки с заданными параметрами обеспечиваются системами автономного адаптера.

В общем случае автономная адаптивная система состоит:

- из устройства установки и крепления (захвата) полезной нагрузки;



а



б



в

**Рис. 1.** Структурная схема ААС (а), конструктивная схема ААС до (б) и после (в) отделения МКА от ракеты-носителя

- устройства отделения (отталкивания) полезной нагрузки;
- программного устройства (блока управления), формирующего команду на отделение полезной нагрузки от средства выведения.
- автономного источника питания.

Структурная и конструктивная схемы автономной адаптивной системы представлены на рис.1 (а, б, в).

Макетный вариант адаптивной системы для механических испытаний представлено на рис. 2.



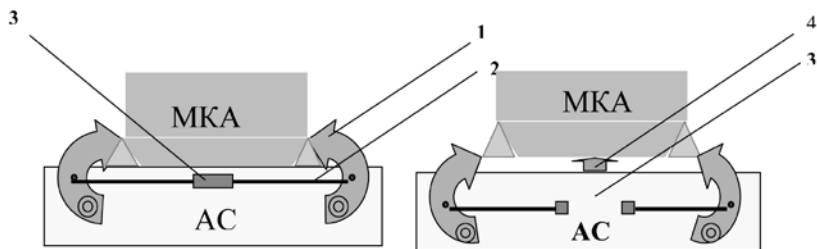
**Рис. 2.** Макетный вариант адаптивной системы для механических испытаний микроспутников различных масс

### **Устройство установки и крепления (захвата) полезной нагрузки (МКА)**

Устройство установки и крепления (захвата) полезной нагрузки (МКА) должно обеспечивать технологически простую установку МКА на автономный адаптер (АА), надежную фиксацию МКА, обеспечивающую все возможные механические воздействия на конструкцию при выведении ракеты-носителя (РН) в космос, надежное разрушение связи АА и МКА по команде отделения полезной нагрузки [Писаренко и др., 1975].

Конструктивное исполнение устройства захвата для предлагаемой концепции может не отличаться от традиционных механических устройств (кольцевых стыков, рычагов, зацепов). Важнейшим элементом устройства захвата является механизм расчеховки (электрозамки), обеспечивающий разрушение механической связи МКА и АА по команде от блока управления. В качестве механизма расчеховки целесообразны электрозамки и электрочеки, обеспечивающие высокую надежность и малые токи потребления

при срабатывании. Принципиальная схема работы устройства установки и отделения МКА приведена на рис. 3.



1. Захваты МКА на АА
2. Натяжное устройство
3. Механизм раскрытия.
4. Устройство отталкивания

**Рис. 3.** Принципиальная схема работы устройства установки и отделения МКА

### **Блок управления автономного адаптера**

Блок управления (БУ) автономной адаптивной системы обеспечивает формирование и выдачу команды на отделение полезной нагрузки от средств выведения без электрической связи с ним.

Блок управления включает:

- электрический источник (аккумулятор);
- датчик вакуума (вакуумное реле);
- датчик перегрузок (акселерометр);
- таймер (реле времени);
- электрические цепи с выходами для подключения к элементам устройства отделения полезной нагрузки.

После запуска РН и достижения высоты полета, где обеспечиваются условия срабатывания датчика вакуума блока управления, источники питания БУ подключаются к электронному модулю. Для запуска таймера на обратный отсчет времени должна пройти вторая команда от акселерометра, фиксирующая работу последней ступени об окончании выхода на расчетную орбиту. По истечении заданного (запрограммированного в таймере) интервала времени микроконтроллер выдает управляющую команду на отделение МКА, при этом источником питания выдается управляющий импульс на электроспуск устройства установки и крепления (захвата) полезной нагрузки (МКА). Происходит пережог нити электрозамка и раскрытие захватов полезной нагрузки, чем обеспечивается программное отделение МКА от РН.

Анализ вариантов построения блока управления автономного адаптера подтверждает возможность формирования и выдачи программной команды на отделение МКА без электрической связи со средствами выведения полезной нагрузки. Проектные про-

работки блока управления показывают возможность компоновки блока электроники в единый корпус с габаритными размерами 70×60×40 мм и массой ~100 г. Расчетная вероятность безотказной работы БУ в условиях штатной эксплуатации составляет 0,995 (при уровне доверия  $Y = 0,8$ ) [Костенко, Майорова, 2011].

### **Устройство отделения (отталкивания) МКА от АА**

Для отталкивания МКА массой менее 20 кг, где потребные усилия не значительны, успешно применяются пружинные толкатели. Примером использования пружинных толкателей может быть механизм выталкивания МКА «Кубсат» [Великобритания].

Для рассматриваемой концепции АС разработана схема отделения МКА с использованием оригинального пневмопрусинного толкателя, состоящего из функционально подобранных сильфона и пружины. Идея пневмопрусинного толкателя заключается в использовании энергетического потенциала замкнутого объема атмосферного воздуха при нормальном давлении в условиях космического вакуума для взвода рабочей пружины толкателя до необходимого усилия отталкивания МКА.

Меняя параметры сильфона и пружины, можно обеспечить как постоянную скорость отделения МКА различных масс (от 1 до 5 кг, от 5 до 20 кг, от 20 до 50 кг), так и различные скорости отделения МКА разной массы при одной пружине. В проекте рассмотрен вариант установки дополнительного рычага между сильфоном и пружины для увеличения рабочего хода на сжатие пружины и соответственно изменения параметров пружины в широком диапазоне. Использование пневмопрусинного толкателя исключает несанкционированное отделение МКА на технической и стартовых позициях, что является дополнительным фактором обеспечения надежности применения автономного адаптера.

### **Клеевые соединения**

При разработке предлагаемой концепции использования автономной адаптивной системы проведены исследования возможности применения для механического крепления автономного адаптера на средстве выведения (РН, РБ, КА) клеевых соединений. Современный уровень развития химии и молекулярной физики обеспечивает создание конструктивных клеев и компаундов для клеевых соединений с широким спектром физических и эксплуатационных свойств, близких, а зачастую превосходящих традиционные механические соединения конструкций. Большой практический опыт использования клеевых соединений накоплен в ракетно-космической технике. Современные клеи обеспечивают для клеевых соединений выполнение специфических требований ракетно-космической техники: большие динамические и тепловые нагрузки, космическая радиация, вакуум и т.д.

Клеевое соединение сборки АА и МКА на средстве выведения (РН) должно обеспечивать:

- абсолютную надежность механического соединения АА и РН на всех этапах совместной эксплуатации;
- высокую технологичность и безопасность проведения операций соединения АА с РН;
- возможность отсоединения АА от РН в случае не состоявшегося запуска.

Выполнение указанных требований клеевыми соединениями может значительно сократить сроки подготовки к запуску, упростить процесс интеграции полезной нагрузки на средство выведения и уменьшить затраты на запуск, что подтверждает практическую реализуемость предлагаемой концепции.

### **Технологический порядок работ при реализации представленной концепции использования автономной адаптивной системы**

Запуски попутных полезных грузов с использованием АС и клеевых соединений для крепления полезной нагрузки на ракету-носителе предполагают выполнение следующих операций:

#### **1. Организационных:**

- определение технической возможности запуска заданной полезной нагрузки (МКА) в качестве попутной нагрузки для конкретного запуска;
- согласование и выполнение всех процедурных вопросов, определяющих возможность запуска полезной нагрузки на данной ракете-носителе при конкретном запуске;
- получение формального разрешения на установку дополнительной нагрузки на РН конкретного запуска;
- согласование порядка и сроков выполнения работ по интеграции (установке) заданной полезной нагрузки с ракетой-носителем.

#### **2. Технологических:**

- изготовление и подготовка полезной нагрузки;
- изготовление автономной адаптивной системы для данной нагрузки;
- интеграция (установка) и испытания полезной нагрузки с АС (может выполняться на территории изготовителя полезной нагрузки);
- поставка сборки на космодром;
- подготовка сборки для установки на ракету-носитель, в том числе ввод в БУ программного времени выдачи команды на отделение полезной нагрузки от РН;
- подготовка клеевого состава и необходимого технологического оборудования для проведения работ;
- получение разрешения на выполнение технологических операций установки полезной нагрузки на ракету-носитель;
- выполнение операций по приклеиванию полезной нагрузки к ракету-носителю, работы выполняются на техническом комплексе (ТК) космодрома;



- проведение сертификации качества выполненных работ и оформление допуска полезной нагрузки для запуска в космос.

**Примечания:**

- все вопросы интеграции конкретной полезной нагрузки с автономным адаптером решаются соответствующими процедурами и оформляются соглашениями (договорами) согласно действующим правовым и техническим нормативам;
- установка дополнительной полезной нагрузки с АС на ракету-носитель осуществляется на техническом комплексе космодрома непосредственно перед запуском РН в космос;
- в случае несостоявшегося запуска АА с МКА может быть снят с РН, путем санкционированного разрушения клеевого соединения.

**Выводы**

1. Выполненные исследования и проектные разработки подтверждают возможность практической реализации предлагаемой концепции, в том числе реальность создания автономных адаптивных систем, обеспечивающих программное отделение МКА, без электрических связей с РН, и использование клеевых соединений для надежного механического крепления полезных нагрузок к средству выведения (РН), с учетом динамических нагрузок, действующих при выведении РН на орбиту функционирования.

2. Реализации представленной концепции запусков на орбиты функционирования малых и сверхмалых полезных нагрузок (МКА) с использованием автономных адаптивных систем и клеевых соединений АА со средством выведения (РН) позволит существенно упростить технологические процессы, сократить сроки выполнения работ по запускам МКА и значительно повысить эффективность использования имеющихся резервов отечественных РН для выведения в космос полезных нагрузок при минимальных экономических и производственных затратах.

3. Использование АС и клеевых соединений для крепления автономной адаптивной системы в сборе с малой полезной нагрузкой на ракете-носителе представляется весьма перспективным, так как при этом практически не требуется доработок средства доставки.

4. Большое разнообразие массогабаритных характеристик полезных нагрузок (МКА) выдвигает задачу разработки конструктивного ряда и унификации автономных адаптивных систем, обеспечивающих оптимальные условия выведения в космос различных полезных нагрузок.

5. Предварительная оценка показала, что при стоимости услуг по стандартному запуску 20 кг полезной нагрузки в 30 млн руб., затрат на изготовление автономной адаптивной системы 5 млн руб. и услуг на запуск в 10 млн руб экономический эффект

от использования предлагаемой концепции составит 15 млн руб., т. е. до 50 % от стандартного запуска попутной полезной нагрузки.

6. Конструктивное решение автономного адаптера защищено заявкой на патент № 2010143398 от 25.10.2010 «Адаптер для соединения малого космического аппарата со средствами выведения его на орбиту функционирования» [Костенко и др., 2012]. Получен патент № 2442728 от 20.02.2012. Опубликовано в Бюллетене изобретений 2012, № 5.

## **Литература**

[Костенко, Майорова, 2011] Костенко В. И., Майорова В. И. Концепция запусков малых и сверхмалых полезных нагрузок с использованием автономного адаптера и клеевых соединений его со средствами выведения // Материалы 5-го Белорусского космич. конгресса, Минск, ОИПИ НАН Беларуси. Минск: ОИПИ, 2011. Т. 1. С. 31–34.

[Костенко и др., 2012] Костенко В. И., Майорова В. И., Игнатьев Н. Н., Безукладов В. И., Шутов В. С. RU. Патент РФ «Адаптер для соединения малого космического аппарата со средствами выведения его на орбиту» № 2442728, 2012. Опубл. в БИ, 2012, № 5.

[Материалы XXXII Академических чтений, 2008] Материалы XXXII Академических чтений по космонавтике, 2008.

[Материалы VIII Международного форума, 2009] Материалы VIII Международного форума «Высокие технологии XXI века», 27 апреля 2007 // Соединения в машиностроении и приборостроении. 2009.

[Писаренко и др., 1975] Писаренко Г. С. и др. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1975. 704 с.

## **INNOVATIVE APPROACH TO PROBLEM OF INSERTION OF SMALL AND EXTREMELY SMALL SPACECRAFT INTO ORBIT OF FUNCTIONING AS A TAIL CARGO**

**V. I. Kostenko<sup>1</sup>, V. I. Maiorova<sup>2</sup>, N. N. Ignatiev<sup>3</sup>, V. V. Ponariadov<sup>4</sup>**

**<sup>1</sup> Space Research Institute Russian Academy of Sciences  
(IKI RAN), Moscow**

**<sup>2</sup> Moscow State Technical University named by N. E. Bauman,  
Moscow**

**<sup>3</sup> Association of Cosmonautics of Russia, Moscow**

**<sup>4</sup> Belarusian State University, Minsk**

Innovative technologies and procedures are proposed in order to simplify insertion of small and extremely small spacecrafts by means of existing boosters manufactured in Russia. The autonomous adaptive system allows one to minimize expenses and time required for a space

experiment to be launched into space. The advantage of the autonomous adaptive system is based on its independency of the spacecraft control system and control instructions supplied by the spacecraft as well as on adhesive bonding of the adapter to the spacecraft.

---

**Kostenko Valery Ivanovich** – head of laboratory, doctor of science,  
vkostenko @ iki.rssi.ru

**Mayorova Vera Ivanovna** – professor, doctor of science,  
Victoria.Mayorova @ online.ru.

**Ignat'ev Nikolay Nikolayevich** – the secretary of the Association  
of Cosmonautics of Russia, ignnn@mail.ru

**Ponariadov Vladimir Vasil'evich** – prorektor of the Belarusian State University, PhD,  
ponariadov@bsu.by.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>С. А. Богачев, С. В. Кузин, А. А. Перцов, С. В. Шестов, Ю. С. Иванов, А. С. Ульянов, А. С. Кириченко, А. А. Реев</b> Техническая концепция и научные задачи КНА «Арка» для МКА-ФКИ № 5 . . . . .	5
<b>А. В. Дудник, М. Прето, Е. В. Курбатов, С. Санчез, Т. Г. Тимакова, К. Г. Титов, П. Парра, А. М. Авилов, Ю. Д. Котов, В. Н. Юров</b> Концепция построения всенаправленной системы регистрации потоков заряженных частиц на малом космическом аппарате. . . . .	21
<b>Ю. Д. Котов, В. Н. Юров, А. С. Глянченко, А. В. Кочемасов, Е. Э. Лупарь, Ю. А. Трофимов, И. В. Рубцов, Е. А. Жучкова, В. Г. Тышкевич, Е. М. Орешников, А. В. Туманов, В. И. Лягушин</b> Рентгеновский и гамма-спектрометр ГРИС . . . . .	48
<b>Ф. П. Олейник, Р. Л. Аптекарь, С. В. Голенецкий, К. С. Грибовский, Е. П. Мазец, В. Д. Пальшин, Д. С. Свинкин, М. В. Уланов, Д. Д. Фредерикс</b> Комплекс научной аппаратуры для наблюдения космических гамма-всплесков в эксперименте КОНУС-УФ . . . . .	66
<b>А. С. Глянченко</b> Контроллеры научных приборов для космических экспериментов ГРИС-ФКИ-1 и «ПИНГ-М» . . . . .	73
<b>А. В. Семенов, А. В. Никифоров, Д. Г. Тимонин, К. В. Ануфрейчик, И. В. Чулков</b> Организация хранения данных в системе управления, сбора и передачи информации (СУСПИ) проекта РЕЗОНАНС . . . . .	90
<b>В. В. Богомолов, С. И. Свертилов, Дж. Ф. Смут-III, А. М. Амелюшкин, Н. Н. Веденькин, А. Г. Рудницкий, Е. А. Шилова</b> Структура данных и выработка триггеров в аппаратуре для исследования гамма-всплесков . . . . .	96
<b>Д. Н. Глазкин, К. И. Титов, П. В. Некрасов, О. А. Калашников, Г. С. Сорокоумов</b> Прототип устройства для натурального исследования радиационных эффектов в интегральных схемах в условиях космического пространства . . . . .	118
<b>М. В. Анохин, В. И. Галкин, В. А. Дитлов, М. Б. Добряин, А. Е. Дубов, А. Г. Королёв</b> Разработка стенда для испытаний электронных компонент космических приборов в поле тяжёлых заряженных частиц. . . . .	128

**П. Н. Осипенко**

Изделия Научно-исследовательского института системных исследований РАН для аэрокосмических приложений . . . . . 139

**А. А. Коновалов, К. В. Ануфрейчик, М. Е. Лупян, М. И. Маркичев, Д. Г. Тимонин, И. В. Чулков, А. А. Шибалкин**

Особенности применения прямоугольных D-SUB соединителей при создании масштабируемой системы управления, сбора и передачи информации . . . . . 149

**П. Н. Бокучава, А. П. Гусев, Д. Е. Колосов, М. Н. Луттиева, Д. В. Малыгин, М. А. Малы́й, Е. П. Сороколетов, С. С. Чеусов, А. А. Варенов, Ю. А. Ветринский, К. Г. Сивачева, Т. А. Тенищева**

Некоторые аспекты применения наноспутников, построенных на базе универсальной платформы «Синергия» блочно-модульного исполнения . . . . . 155

**В. И. Костенко, В. И. Майорова, Н. Н. Игнатьев, В. В. Понарядов**

Инновационный подход к проблеме вывода на орбиту функционирования малых и сверхмалых космических аппаратов попутным грузом . . . . . 162

055(02)2

Ротап rint ИКИ РАН  
117997, Москва, Профсоюзная 84/32

Подписано к печати 18.03.2013

Заказ 3211

Формат 70×108<sup>1/32</sup>

Тираж 100

7,2 уч.-изд. л.