

**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Московский инженерно-физический институт)**

3. Результаты научных исследований по завершённым космическим проектам, полученные российскими учеными в 2014-2015 годах

3.1 Эксперимент ПАМЕЛА

В 2014-2016 гг продолжался эксперимент ПАМЕЛА на борту КА «Ресурс-ДК1». Было получено и обработано около 10 Тбайт информации.

Основные направления исследований:

1. Изучено угловое распределение позитронов галактических космических лучей.
2. Исследована модуляция потоков электронов галактических космических лучей в гелиосфере
3. Получены пространственные и временные изменения внутренней зоны радиационного пояса, связанные с глобальной вариацией геомагнитного поля и 11-летним циклом солнечной активности.
4. Измерены спектры электронов, протонов и ядер гелия высоких энергий.
5. Исследование анизотропии космических лучей
6. Изучение спектров дейтронов космических лучей.
7. Измерены спектры ядер бора В и углерода С

Основные результаты:

Угловое распределение позитронов галактических космических лучей по данным эксперимента «ПАМЕЛА» на космическом аппарате «Ресурс-ДК1».

Опубликовано: *Astrophysical Journal* 2015 **811** 21.

По данным эксперимента «ПАМЕЛА» было изучено угловое распределение потока позитронов во всей небесной сфере с целью поиска крупномасштабной анизотропии позитронов галактических космических лучей в энергетическом интервале от 10 до 200 ГэВ.

Показано, что измеренное распределение угловых направлений позитронов соответствует изотропному потоку. Верхний предел дипольной анизотропии не превышает $\delta=0.076$ с 95% доверительной вероятностью. Полученные результаты позволяют исключить локальные источники (до десятков парсек) и свидетельствуют в пользу объяснения избытка позитронов высоких энергий распадом или аннигиляцией гипотетических частиц темной материи.

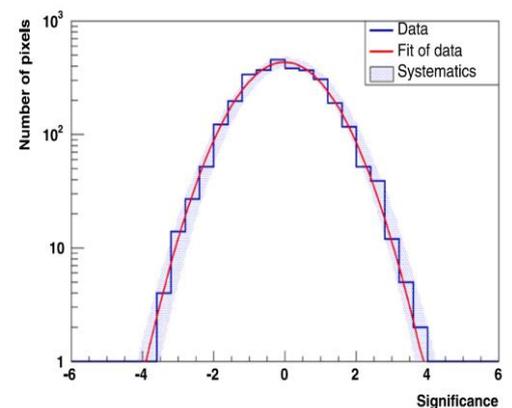
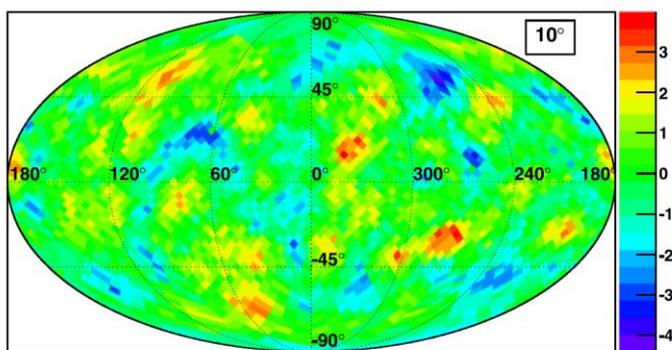


Рис. 1. (слева): карта отклонений (в σ) от изотропного распределения для позитронов 10-200ГэВ в галактической системе координат.

Рис. 2. (справа): гистограмма отклонений (синяя линия) и ожидаемое распределение в случае изотропного потока (красная линия), серая полоса указывает систематические ошибки измерений.

2. Модуляция потоков электронов галактических космических лучей в гелиосфере данным эксперимента «ПАМЕЛА» на космическом аппарате «Ресурс-ДК1»

Опубликовано: *Astrophysical Journal* 2015 **810** 142

В эксперименте ПАМЕЛА проведены прецизионные измерения потоков электронов галактических космических лучей (с энергиями от 70 МэВ до 50 ГэВ) в период аномально низкой солнечной активности в конце 23 цикла (с июля 2006 по декабрь 2009 г.) для полугодовых интервалов. Эффекты модуляции космических лучей в гелиосфере заметно изменяют спектры частиц ниже 30 ГэВ. Сравнение новых результатов измерений с моделями дает уникальную возможность для объяснения механизмов модуляции космических лучей в гелиосфере

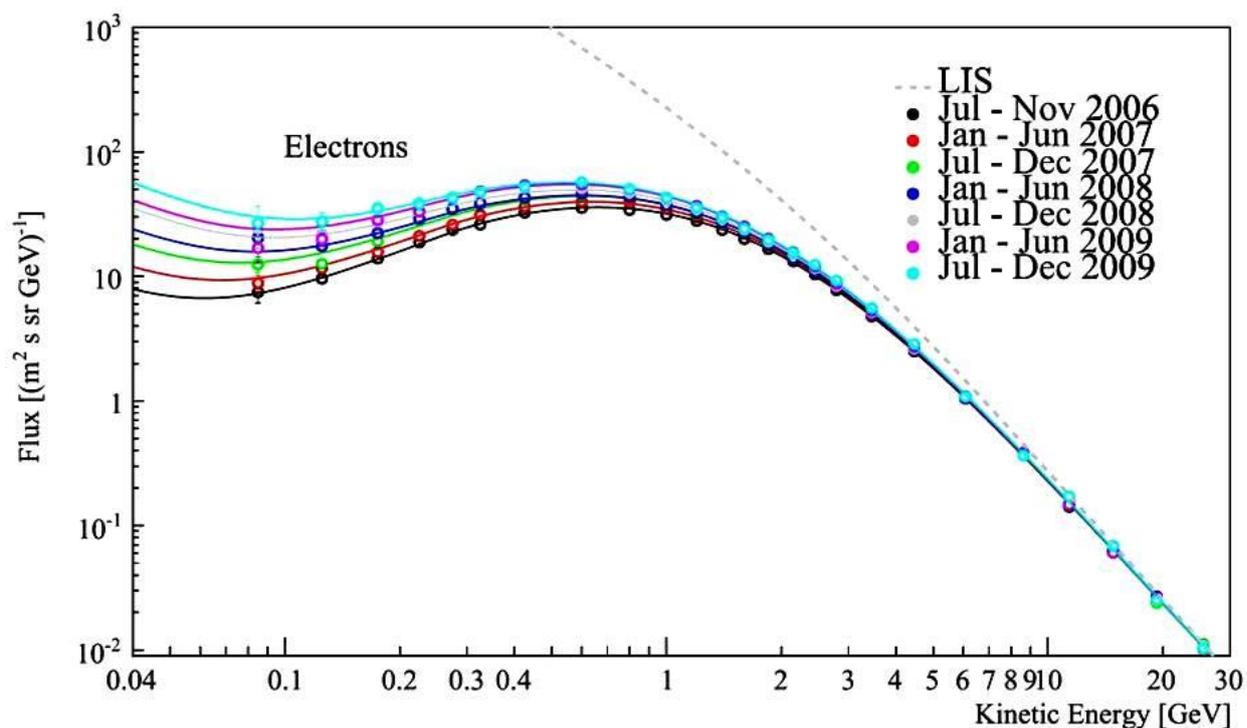


Рис.1. Энергетические спектры электронов космических лучей около Земли в период с июля 2006 по декабрь 2009 в сравнении с результатами модельных расчетов. LIS - локальный межзвездный спектр на границе гелиосферы.

3.2 Спутниковые эксперименты АРИНА и ВСПЛЕСК по изучению вариаций потоков высокоэнергичных протонов и электронов в околоземном космическом пространстве. Основные результаты 2014 – 2015 гг.

1. Описание спутниковых экспериментов АРИНА и ВСПЛЕСК

Радиационная обстановка в околоземном космическом пространстве в стационарных условиях формируется в основном потоками галактических космических лучей, частиц атмосферного альbedo, частиц радиационного пояса. Сегодня актуально изучение изменений радиационных условий, проявляющихся в виде вариаций и всплесков потоков заряженных частиц в широком диапазоне энергий, связанных с солнечно-магнитосферными и геофизическими возмущениями.

Спутниковые низкоорбитальные эксперименты АРИНА (космический аппарат «Ресурс-ДК1», 2006 – 2016 гг.) и ВСПЛЕСК (Международная космическая станция, 2008 – 2013 гг.) были разработаны и проведены НИЯУ МИФИ [1, 2].

Спектрометры АРИНА и ВСПЛЕСК для регистрации вариаций высокоэнергичных электронов и протонов детально описаны в [3]. Приборы полностью идентичны по физической схеме, имеют одинаковые физические параметры (геомфактор, энергетический диапазон, энергетическое и угловое разрешения и др.), регистрируют и идентифицируют электроны (3-30 МэВ) и протоны (30-100 МэВ), измеряют их энергии и позволяют изучать энергетические спектры и временные профили потоков частиц. Многослойный сцинтилляционный детектор (С1, С2,..., С10) является главной частью прибора. Заряженные частицы (электроны, протоны), движущиеся в прямом

направлении («сверху вниз») и попадающие в апертуру прибора, проходят последовательно через детекторы С1, С2 С3 и т.д., теряют энергию и поглощаются в приборе. Частицы обратного направления и частицы прошедшие через весь прибор отсекаются детектором С10, включенным в антисовпадение. Таким образом, остановившиеся в веществе прибора частицы – электроны с энергиями 3-30 МэВ и протоны с энергиями 30-100 МэВ. Частицы идентифицируются по их энерговыделению (амплитуде сигналов с фотоумножителей) в каждом детекторе и пробегу в приборе. Энергия электронов и протонов измеряется по их пробегу в детекторах прибора. Спектрометры позволяют проводить измерения энергетических спектров частиц и их эволюцию, определять временные профили всплесков частиц с высоким временным разрешением ($\sim 1\text{нс}$), могут работать в высокоинтенсивных потоках частиц (время формирования триггерного сигнала $\sim 100\text{нс}$).

Большая статистика частиц, накопленная в период проведения экспериментов (2006 – 2015 гг.), позволила построить детальную карту потоков протонов и электронов в околоземном космическом пространстве (в геомагнитных и географических координатах с учетом питч-углов частиц) отдельно для каждого года измерений. В свою очередь это позволило выявить вариации потоков частиц разного временного масштаба, которые при этом имеют разную физическую природу. Среди них: всплески частиц продолжительностью десятки секунд, связанные с локальными геофизическими возмущениями радиационного пояса (землетрясениями, молниевыми разрядами и др.), вариации продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток, вызванные солнечно-магнитосферными возмущениями, вариации с характерным временем порядка одного года (и более), определяемые 11-летним циклом солнечной активности и глобальными изменениями геомагнитного поля.

Ниже представлены основные результаты, полученные в 2014 – 2015 гг.

2. Динамика потоков высокоэнергичных электронов во внешнем радиационном поясе.

Результаты детально описаны в работе [4].

Были изучены вариации потока высокоэнергичных электронов (более 3 МэВ) в зоне внешнего радиационного пояса ($L=3-8$), связанные с магнитосферными возмущениями во время активных процессов на Солнце (вспышки, корональные выбросы массы и др.). по данным экспериментов АРИНА и ВСПЛЕСК в период 2006 – 2015 гг. Показано, что в периоды сильных солнечно-магнитосферных возмущений может происходить резкое изменение потока высокоэнергичных электронов во внешнем радиационном поясе - как его возрастание, так и убывание вплоть до фоновых величин, типичных для потока электронов атмосферного альбедо.

Типичное поведение высокоэнергичных электронов во внешнем радиационном поясе показано на рисунке 1, где представлены вариации потока электронов (4 – 6 МэВ) на $L=3-3.5$ в течение 2012 г. Периоды значительных изменений (рост и падение) потока электронов отмечены стрелками. Анализ показал, что каждое такое изменение совпало с сильным геомагнитным возмущением (Dst порядка – 100 нТл), вызванным солнечным событием (вспышка, корональный выброс массы).

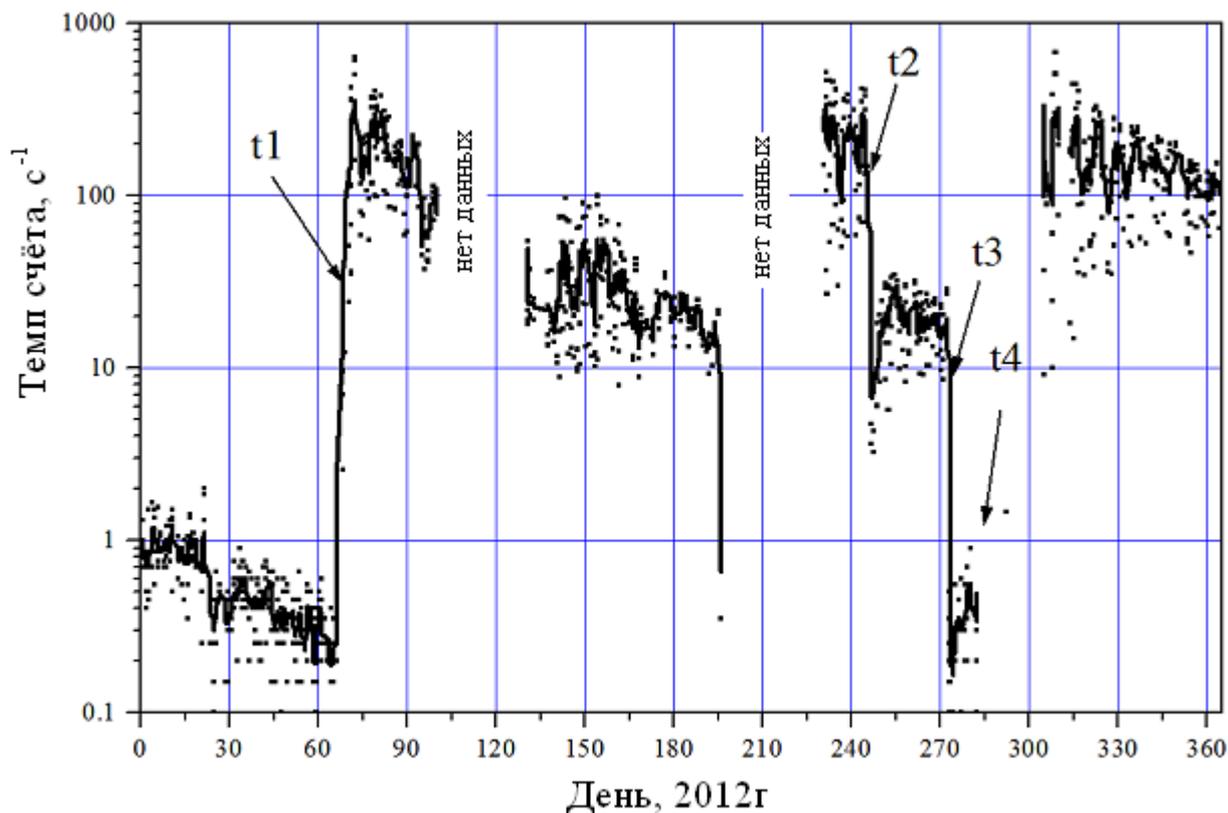


Рис. 1. Вариаций потока электронов (4 – 6 МэВ) на $L=3 - 3.5$, измеренные в 2012 г. Точками показаны средние темпы счета электронов за 20-ти секундный интервал измерений. Кривая аппроксимирует экспериментальные точки. Стрелками (t_1, t_2, t_3, t_4) отмечены периоды сильных геомагнитных возмущений.

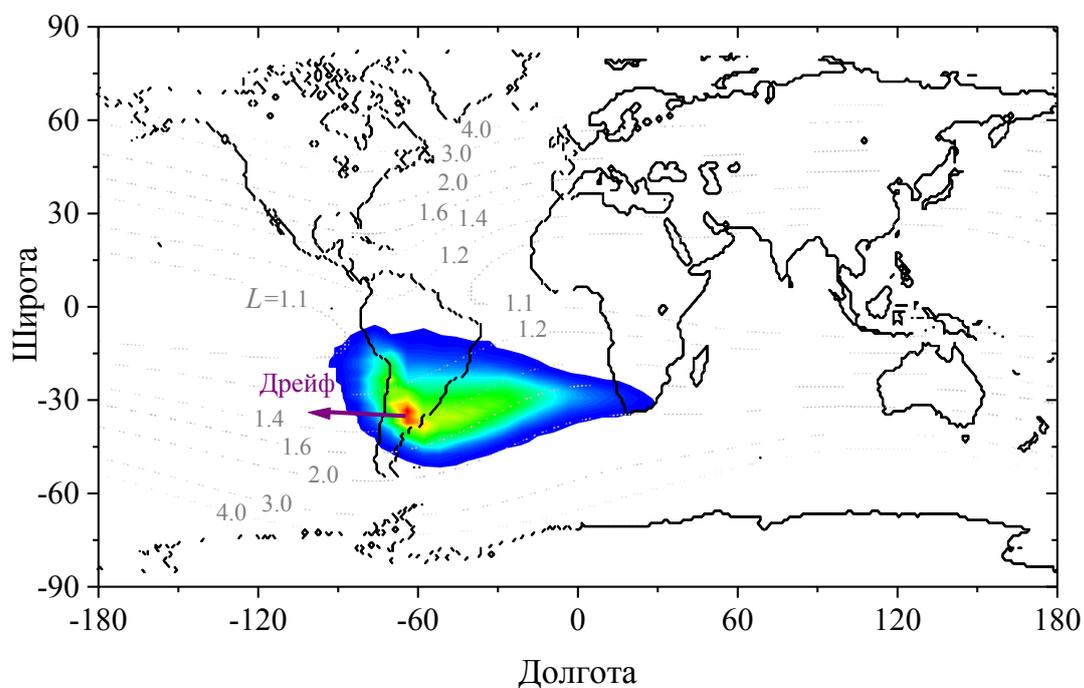
2. Долговременные вариации потока высокоэнергичных протонов во внутреннем радиационном поясе.

Результаты детально описаны в работах [5, 6].

2.1. Дрейф области Южно-Атлантической Аномалии по данным о потоке протонов внутреннего радиационного пояса.

По данным геомагнитных наблюдений известно, что глобальные изменения магнитного поля Земли приводят к перемещению области Южно-Атлантической Магнитной Аномалии (ЮАА) в западном направлении. Проявление этого эффекта в потоках высокоэнергичных протонов радиационного пояса было изучено данным экспериментов АРИНА и ВСПЛЕСК.

Для каждого года в период измерений 2006 – 2015 гг. было определено местоположение (долгота) области максимального потока протонов (с энергией ~ 50 МэВ) в узких интервалах L-оболочек внутреннего радиационного пояса ($L < 2.0$). Это позволило выявить изменение этого местоположение в указанный временной период. В результате была определена скорость перемещения аномалии по данным о потоках частиц радиационного пояса. Было показано скорость перемещения практически не зависит от L-оболочки, равна $0.45^\circ \pm 0.07^\circ$ и направлена на запад (рисунок 2).



Рис, 2. Дрейф области ЮОА по данным о потоках протонов эксперимента АРИНА (2006 – 2015 гг.).

2.2. Вариация потока захваченных протонов, связанная с 11-летним циклом солнечной активности [6].

Непрерывные измерения, выполненные в эксперименте АРИНА в 2006 – 2014 гг., пришлись на разные фазы 11-летнего солнечного цикла (фазы спада и минимума 23 цикла, фазы роста и максимума 24 цикла). Вариация потока высокоэнергичных протонов (~ 100 МэВ) внутреннего радиационного пояса в этот период показана на рисунке 3, из которого следует явная антикорреляция между потоком протонов солнечной активностью. При этом соотношение между интенсивностями в минимуме и максимуме солнечной активности достигает значения ~ 7 .

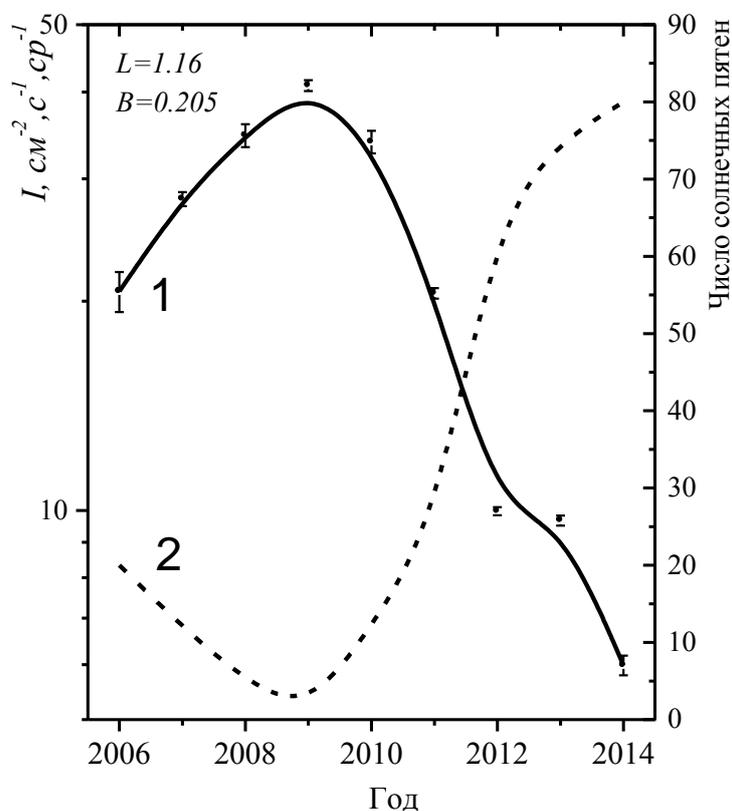


Рис. 3. Вариация потока высокоэнергичных протонов (I) во внутреннем радиационном поясе (кривая 1) в течение цикла солнечной активности (кривая 2 – средняя величина числа солнечных пятен в течение года).

А.М. Гальпер, AMGalper@mephi.ru

С.В. Колдашов, SVKoldashov@mephi.ru

Ссылки

1. A.V. Bakaldin, A.G. Batischev, A.M. Galper et al. Cosmic Research. Vol 45. № 5. p. 471 (2007).
2. S.Yu. Alexandrin, A.V. Bakaldin, A.G. Batischev, A.M. Galper et al. Izvestiya Akademiy Nauk, physics series. Vol 73, № 3, p. 379 (2009).
3. V. Bakaldin, A. G. Batischev, M. A. Bjeumikhova, et. al. Instrumentation for Experimental Recording of Bursts of High-Energy Charged Particles in Near-Earth Space, Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz., 2005, vol. 69, no. 6, p. 918.
4. Koldashov S.V., Aleksandrin S.Yu., Eremina N.D. Dynamics of relativistic electrons in the region of outer radiation belt, caused by solar events. The 34th International Cosmic Ray Conference, 30 July- 6 August, 2015. Proceedings of science. <http://pos.sissa.it/>
5. Aleksandrin S.Yu., Galper A.M., Koldashov S.V., Zharaspayev T.R. The South Atlantic Anomaly drift on the proton flux data of satellite experiments. The 34th International Cosmic Ray Conference, 30 July- 6 August, 2015. Proceedings of science. <http://pos.sissa.it/>
6. V.V. Malakhov. S.V. Koldashov, A.G. Mayorov et al. Time variations of proton flux in Earth inner radiation belt during 23/24 solar cycles based on the PAMELA and the ARINA data. Journal of Physics: Conference Series 632 (2015) 012069.

3.3 Солнечный рентгеновский и гамма-спектрометр ГРИС

Научная аппаратура ГРИС (Гамма и Рентгеновское Излучение Солнца) предназначена для спектрометрии жесткого рентгеновского и гамма-излучения

солнечных вспышек в диапазоне 50 кэВ – 200 МэВ и солнечных нейтронов с энергией >30 МэВ (*Kotov et al., 2015*).

Эксперимент включен в Российскую программу научных экспериментов на борту Российского сегмента Международной Космической Станции (РС МКС) и в настоящее время находится на этапе разработки научной аппаратуры.

Научные задачи эксперимента:

- исследование физических механизмов и условий ускорения и распространения электронов и ионов на различных фазах развития солнечных вспышек;
- исследование элементного состава и других характеристик ускоренных частиц и солнечной плазмы в области генерации гамма-излучения.

Цели эксперимента ГРИС:

- измерение энергетических спектров тормозного излучения и гамма-линий в диапазоне 50 кэВ – 15 МэВ с относительно высоким энергетическим (3,5-4,5% на линии 662 кэВ) и временным (~10 мс) разрешением;
- измерение высокоэнергичной пионной компоненты вспышечных спектров в диапазоне до 200 МэВ;
- измерение потоков и энергетических спектров прямых солнечных нейтронов с энергиями >30 МэВ.

Дополнительными целями ГРИС являются:

- измерение энергетических и временных характеристик фонового космического и локального излучения в окрестностях РС МКС;
- измерение энергетических спектров и временных профилей атмосферных и космических гамма-всплесков с предельным временным разрешением 20 мкс.

Научная аппаратура (НА) ГРИС включает в себя два детектора: спектрометрический канал низких энергий (СКН), на основе быстрого неорганического сцинтиллятора с относительно высоким энергетическим разрешением ($\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ или CeBr_3 , $\varnothing 7,6 \times 7,6$ см) и спектрометрический канал высоких энергий (СКВ), основанный на сцинтилляторе $\text{CsI}(\text{Tl})$ размером $\varnothing 12 \times 15$ см. Благодаря возможности разделения n/γ -сигналов кристаллом $\text{CsI}(\text{Tl})$ в СКВ также реализована регистрация нейтронного излучения. Для подавления фона от заряженных частиц детектор СКВ со всех сторон окружен пластиковыми антисовпадательными защитными (АСЗ) детекторами: верхним, представляющим из себя отдельный детектор, и нижний, составляющим с кристаллом $\text{CsI}(\text{Tl})$ фосвич-детектор. Схема блока детекторов ГРИС приведена на рисунке 1, основные характеристики НА в Таблице 1.

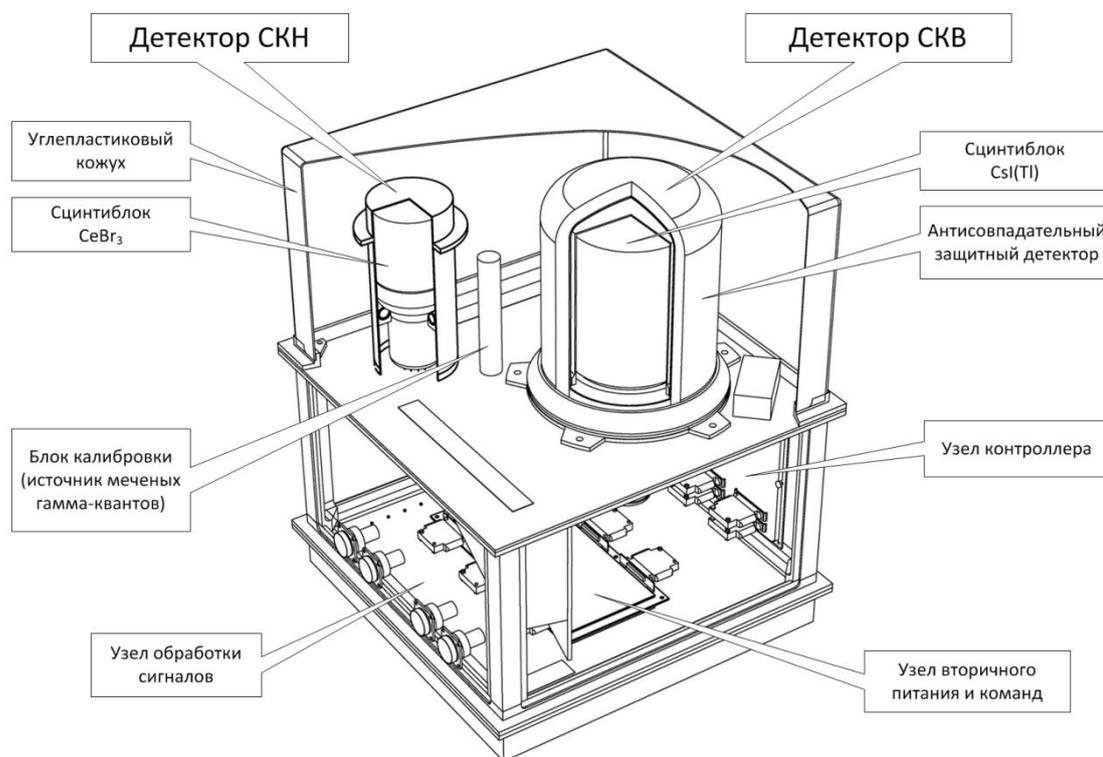


Рис. 1. Блок детекторов ГРИС

Применение двух типов детекторов позволяет обеспечить регистрацию различных компонент спектров солнечных вспышек в широком диапазоне энергий: интенсивные потоки тормозного рентгеновского излучения и ядерные гамма-линии, благодаря высокому быстродействию и энергетическому разрешению детектора СКН, высокоэнергичную пионную компоненту и прямые солнечные нейтроны с помощью детектора СКВ.

Блок детекторов ГРИС планируется расположить на двуосной платформе наведения (ДПН) за бортом модуля «Звезда» РС МКС. Использование ориентируемой платформы позволит увеличить время нахождения Солнца внутри поля зрения детекторов (30°) с 6-7% (в случае неподвижного крепления ГРИС-БД) до 52%.

Измерительные данные НА ГРИС в широком диапазоне энергий электромагнитного и нейтронного излучений совместно с данными других приборов (телескопов в радио-, ультрафиолетовом и рентгеновском (≤ 100 кэВ) диапазонах, детекторов заряженных частиц и т.д.) позволят проследить эволюцию солнечных вспышек на этапах ускорения и распространения энергичных частиц, что может дать ценную информацию для уточнения теоретических моделей вспышек.

Таблица 1 Характеристики НА ГРИС

Масса детекторного блока	30 кг
Потребляемая мощность	30 Вт
<i>Спектрометрический Канал Высоких энергий (СКВ)</i>	
Основной детектор	CsI(Tl) $\varnothing 12 \times 15$ см
Защитный детектор	Полистирольный сцинтиллятор
Диапазон измерения гамма-излучения	200 кэВ – 200 МэВ
Энергетическое разрешение	ПШПВ 8% на линии 662 кэВ
Диапазон измерения нейтронов	>30 МэВ

Качество разделения n/γ	1/1000
<i>Спектрометрический Канал Низких энергий (СКН)</i>	
Основной детектор	LaBr ₃ (Ce) или CeBr ₃ $\phi 7,62 \times 7,62$ см
Диапазон измерений гамма излучения	50 кэВ – 15 МэВ
Энергетическое разрешение	3,5-4,5% ПШПВ на линии 662 кэВ

*Ю.Д. Котов, В.Н. Юров, А.С. Гляненько, Е.Э. Лупарь, Ю.А. Трофимов, Р.М. Фараджаев,
А.В. Кочемасов*

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
kotov@mephi.ru*

Публикации

Kotov Yu.D., Yurov V.N., Trofimov Yu.A. et al. "Solar gamma-ray spectrometer GRIS onboard the International Space Station" // 2015. Adv. Space Res. Vol. 56. P. 1797-1804. DOI: 10.1016/j.asr.2015.07.027