

## ЭКСПЕРИМЕНТ «МОНИКА» ПО ИЗУЧЕНИЮ ЯДЕРНОГО, ИЗОТОПНОГО И ИОННОГО СОСТАВА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

А.В. Бакалдин, С.А. Воронов, А.В. Карелин

(НИЯУ МИФИ)

Н.И. Замятин

(ОИЯИ, г. Дубна)

А.Н. Квашнин

(Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН)

*Рассматривается эксперимент «МОНИКА» по исследованию потоков ионов космических лучей (КЛ) от H до Ni в диапазоне энергий 10 – 300 МэВ/н в окрестности Земли. Основной задачей эксперимента является измерение ионного и изотопного состава, а также энергетических спектров СКЛ. Эксперимент «МОНИКА» позволит также исследовать ионный состав аномальных и галактических КЛ. Наблюдения будут проводиться с помощью светосильного полупроводникового спектрометра, установленного на борту малого космического аппарата, разрабатываемого НПО им. С.А. Лавочкина.*

*Ключевые слова:* ионы, солнечные космические лучи, ядерная компонента.

### Введение

В проблеме солнечных космических лучей (СКЛ) по-прежнему наиболее остро стоит вопрос о месте и механизме ускорения частиц, приходящих к наблюдателю после взрывных энерговыделений на Солнце.

Первоначально СКЛ были зарегистрированы на Земле ионизационными камерами в феврале и марте 1942 г. [1] после мощных вспышек на Солнце, и долгое время считалось, что именно вспышки, и только они, ответственны за генерацию энергичных солнечных частиц. В 1993 г. появилась статья Дж. Гослинга «Миф солнечной вспышки» [2], в которой главным солнечным ускорителем выступили ударные волны, инициируемые корональными выбросами массы (КВМ, Coronal mass ejection, CME), которые впервые наблюдались в начале 1970-х г. на американских орбитальных аппаратах OSO-7 и Skylab, а в настоящее время постоянно наблюдаются с космического аппарата SOHO.

Последние высокочувствительные измерения прибором SEPICA на космическом аппарате ACE [3, 4] обнаружили сильную энергетическую зависимость среднего заряда железа в импульсных событиях. Таким образом, ясно, что наблюдаемая энергетическая зависимость зарядовых состояний ионов связана не только с характеристиками плазмы в области ускорения, но также с динамикой механизмов ускорения.

Для детального изучения механизмов ускорения СКЛ в индивидуальных постепенных или импульсных событиях необходимо иметь экспериментальные данные о заряде ионов, и особенно при высоких энергиях. Однако в настоящее время данные по зарядовому состоянию ионов СКЛ высокой энергии фрагментарны. На спутниках ACE и НИТ такие измерения невозможны из-за характеристик орбит. Ранее выполненные измерения на подходящих ор-

битах внутри геомагнитного поля (SAMPEX [5], НИНА [6] и НИНА – 2 [7]) сделаны инструментами с маленьким геометрическим фактором, что не позволяло набрать достаточную статистику в индивидуальных событиях, особенно слабых.

Интерпретация наблюдательных данных о зарядовом состоянии элементов затруднена, так как распространение ионов космических лучей в межпланетном пространстве приводит к изменению зарядовых спектров даже при длинах свободного пробега близких к 1 а. е.

Из вышесказанного становится очевидно, что для полного понимания природы событий СКЛ и механизмов ускорения заряженных частиц во время этих событий необходимы дальнейшие измерения элементного, изотопного и ионного состава СКЛ с помощью спектрометров, обладающих не только высоким массовым и энергетическим разрешением, но также большим геометрическим фактором.

Кроме того, немало нерешённых вопросов связано с аномальными космическими лучами (АКЛ), которые, как известно, представляют собой в основном однократно заряженные ионы атомов с высоким первым ионизационным потенциалом (He, N, O, Ne, Ar и некоторые другие) в интервале энергий от нескольких до десятков МэВ/н [8 – 10].

Необходимо отметить, что, несмотря на серьёзный прогресс в понимании природы АКЛ, в настоящее время нельзя считать, что источник её известен. До конца не ясны процессы, участвующие в ускорении, эффективность ускорения, поведение АКЛ на периферии гелиосферы, влияние на потоки АКЛ поляриности магнитного поля Солнца и т. д.

Необходимо дальнейшее изучение ионного, изотопного и элементного состава АКЛ, энергетического спектра и временной динамики всех этих характеристик.

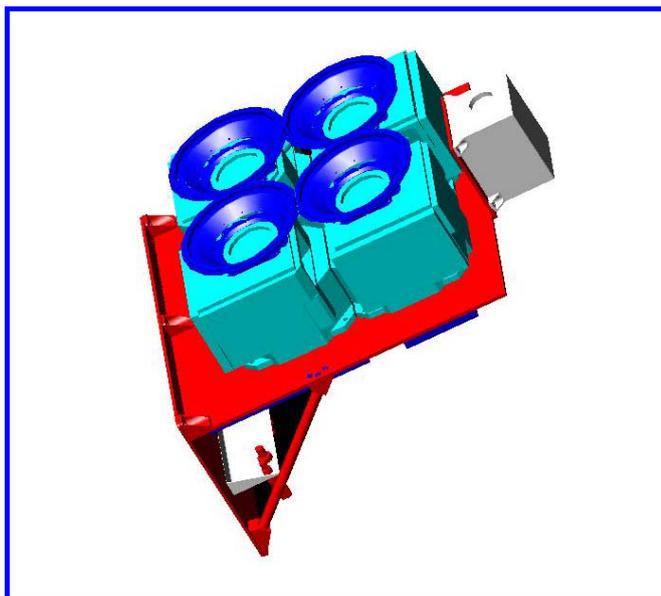


Рис. 1. Спектрометр «МОНИКА»

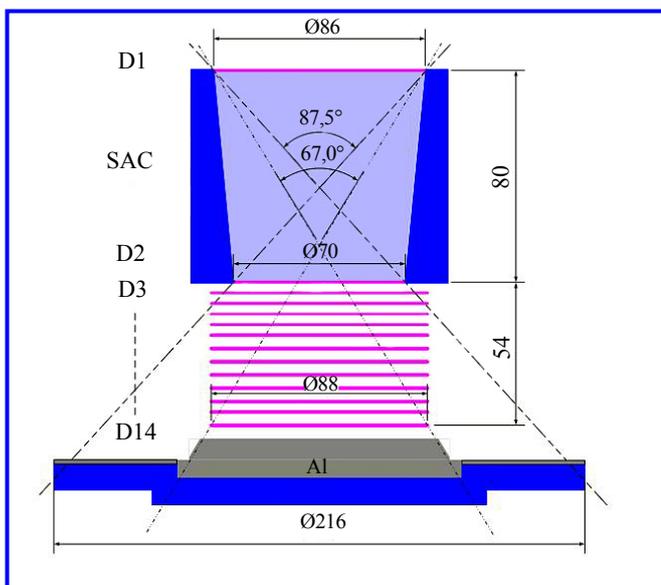


Рис. 2. Схема спектрометра «МОНИКА». Пунктирными линиями обозначены две различные апертуры, соответствующие различным режимам работы спектрометра

Изотоп	Минимальная энергия, МэВ/н	Максимальная энергия, МэВ/н
$^1\text{H}$	5	70
$^4\text{He}$	5	70
$^{16}\text{O}$	10	150
$^{28}\text{Si}$	12	210
$^{40}\text{Ca}$	14	260
$^{56}\text{Fe}$	15	290
$^{59}\text{Ni}$	15	310

Подчеркнём также, что мониторинг космических лучей (КЛ) важен в прикладном аспекте, так как КЛ являются первым фактором, создающим радиационную опасность для экипажей, электронных систем и солнечных батарей на космических аппаратах. Наблюдения КЛ необходимы для мониторинга космической погоды и выработки методов её прогноза.

### Цели и задачи эксперимента «МОНИКА»

В современных космофизических экспериментах для исследования потоков ядер с энергиями от десятков до сотен МэВ/н широко используются прецизионные многослойные кремниевые спектрометры [5 – 7, 11]. Важной задачей при подготовке таких экспериментов является выбор метода идентификации ядер, который для заданной конфигурации прибора характеризуется массовым, зарядовым и энергетическим разрешением. В данной работе проведён анализ и оптимизация идентификаторов для эксперимента «МОНИКА».

Целью эксперимента «МОНИКА» является изучение механизмов генерации КЛ в активных процессах на Солнце и в гелиосфере, мониторинг ядерного, изотопного и ионного состава КЛ в околоземном пространстве. В эксперименте будут изучаться потоки ядер КЛ от Н до Ni в диапазоне энергий от 10 до 300 МэВ/н. Для этих целей в эксперименте будет использован многослойный полупроводниковый спектрометр «МОНИКА», который будет установлен на борту малого космического аппарата (разработчик НПО им. С.А. Лавочкина). Данный эксперимент проводится НИЯУ МИФИ в сотрудничестве с Физическим институтом имени П.Н. Лебедева РАН и ОИЯИ.

Спектрометр «МОНИКА» предназначен для регистрации ядер КЛ с хорошим изотопным, зарядовым и энергетическим разрешением. Диапазоны энергий регистрируемых ядер приведены в таблице. Геометрический фактор прибора равен  $100\text{ см}^2$ .

### Состав спектрометра «МОНИКА»

Спектрометр состоит из четырёх отдельных телескопов. Общий вид спектрометра «МОНИКА» представлен на рис. 1.

В свою очередь каждый телескоп состоит из следующих детектирующих систем.

Полупроводниковый спектрометр-телескоп (рис. 2) состоит из 14 круглых полупроводниковых детекторов D1 – D14. Диаметр D1, D3 – D4 по 90 мм. Диаметр D2 равен 70 мм. Толщина плоскостей D1, D2 составляет 100 мкм, D3 – D5 – 300 мкм, D6 – D14 – 1000 мкм. Таким образом, суммарная толщина полупроводникового спектрометра-телескопа составляет

$1,01 \text{ см} \times 2,33 \text{ г/см}^3 = 2,35 \text{ г/см}^2$ . Детекторы D1, D2 образуют телескоп. Расстояние между ними 80 мм. Детекторы D1, D2 являются двухсторонними стриповыми детекторами (X, Y) и позволяют определять направление прихода частицы. Количество стрипов с каждой стороны плоскостей детекторов D1, D2 составляет 32. Остальные детекторы D3 – D14 являются односторонними и имеют по 8 радиальных стрипов. Все детекторы D1 – D14 позволяют измерять потери энергии частицы с энергетическим разрешением не хуже 1%.

Сцинтилляционный калориметр предназначен для расширения энергетического диапазона регистрируемых ядер (до 300 МэВ/н для железа). Он расположен под полупроводниковым спектрометром-телескопом и представляет собой пластиковый сцинтиллятор S1 толщиной 5 мм и алюминиевый поглотитель А1 толщиной 10 мм. Сцинтиллятор регистрирует факт выхода частицы из полупроводникового спектрометра-телескопа. Поперечные размеры сцинтиллятора подобраны таким образом, чтобы перекрыть апертуру прибора.

Система антисовпадений предназначена для режекции высокоэнергичных ядер, не остановившихся в спектрометре, а также для режекции фоновых ядер, рождающихся в реакциях фрагментации в веществе прибора. Система состоит из нижнего сцинтилляционного детектора антисовпадений АС, расположенного под сцинтилляционным калориметром, и бокового цилиндрического сцинтилляционного детектора антисовпадений SAC, расположенного между детекторами D1, D2. Толщины детекторов антисовпадений составляют 10 мм.

Нижний счётчик антисовпадений даёт возможность регистрировать выходящие из калориметра частицы.

Каждый плоский сцинтиллятор просматривают два фотоумножителя японской фирмы Хамамацу типа R5611A [12]. Цилиндрический сцинтиллятор просматривают два ФЭУ, расположенные равномерно по периметру.

Прибор «МОНИКА» обладает следующими характеристиками:

- энергетические диапазоны: 10 – 300 МэВ на нуклон;
- угловое разрешение – не хуже  $1^\circ$ ;
- энергетическое разрешение – не более 1%;
- светосила –  $100 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ ;
- точность временной привязки – 1 мс;
- апертура –  $\pm 45^\circ$ ;
- масса – не более 65 кг;
- габариты –  $650 \times 650 \times 300 \text{ мм}$ ;
- энергопотребление – не более 80 Вт.

Собственное запоминающее устройство (ЗУ), объёмом 1 Гбайт, обеспечивает накопление

информации в течение суток.

Взаимодействие с МКА обеспечивается по интерфейсам: бортового питания 27 В; релейных команд управления; магистрального последовательного интерфейса, канала передачи научной информации.

Системы электропитания имеют два комплекта – основной и резервный.

Основной триггер прибора имеет вид:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4;$$

$$T_i = D1_i D2_i \text{ANTI}(AC_i) \text{ANTI}(SAC_i),$$

где  $T_i$  – триггер  $i$ -го телескопа.

Для каждого телескопа триггер вырабатывается при совпадении сигналов с первых двух детекторов D1 и D2 и отсутствии сигналов с системы антисовпадений.

### Идентификация заряженных частиц

Для идентификации заряженных частиц используется метод аппроксимации кривой Бете – Блоха. Данный метод заключается в нахождении массы регистрируемого изотопа с заданным  $Z$  путём минимизации следующей квадратичной суммы:

$$D^2 = \sum_{i=1}^{N_{\text{last}}-n} (W_i (\Delta E_i^{\text{real}} - \Delta E_i^{\text{theor}})^2),$$

где  $\Delta E_i^{\text{real}}$  – измеренное энерговыделение в  $i$ -м слое;  $\Delta E_i^{\text{theor}}$  – рассчитанное энерговыделение в  $i$ -м слое;  $W_i$  – статистические веса (в данном случае они выбирались равными  $1 / \Delta E_i^{\text{real}}$ );  $N_{\text{last}}$  – полное число пройденных частицей слоёв;  $n$  – число отброшенных последних сработавших слоёв, в данном случае  $n = 1$ .

Подробное описание методики приведено в работе [13]. На рис. 3 приведено распределение по восстановленным массам изотопов водорода, гелия, кислорода и железа.

Массовое разрешение изменяется в диапазоне от 30 МэВ для лёгких частиц до 200 МэВ для тяжёлых частиц.

Таким образом, изотопы рассматриваемых ядер надёжно разделяются. Все примеры соответствуют оставке частицы в полупроводниковом спектрометре.

Полученные результаты показывают, что среднее значение восстанавливаемой массы практически не зависит от энергии частицы. Незначительное приближение её к реальной массе по мере увеличения энергии частицы связано с уменьшением влияния многократного рассеяния на идентификацию

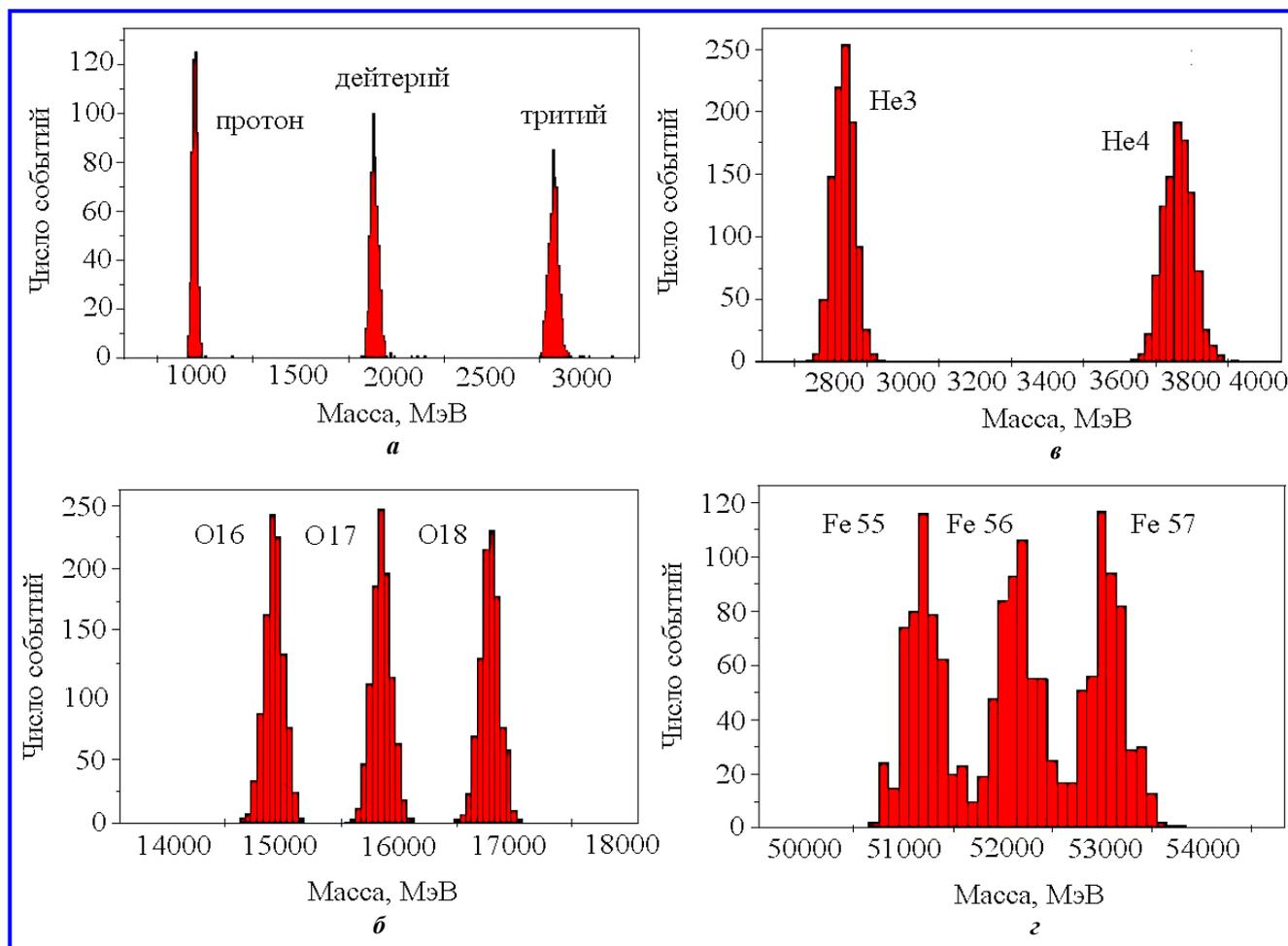


Рис. 3. Восстановленные массы: а – водорода; б – гелия; в – кислорода; з – железа

при увеличении энергии частицы.

### Космический аппарат

Прибор «МОНИКА» будет размещён на унифицированной платформе «КАРАТ» (рис. 4) МКА. Конструкция платформы выполнена без гермоотсека. В состав бортовых систем унифицированной платформы входят все необходимые системы, обеспечивающие работу и контроль служебной и целевой аппаратуры платформы и МКА в целом: энергопитания, радиолинии, телеметрии, двигательной установки, управления движением и навигацией; терморегулирования.

Термостабилизированная панель, на которой установлен прибор «МОНИКА», имеет диапазон рабочих температур  $-10 +40$  °С.

Орбита МКА круговая, высота орбиты 600 – 700 км. Наклонение орбиты не менее 80°. На рабочих витках вертикальная ось «+Z» прибора «МОНИКА» направлена в зенит с точностью не хуже 0,5°, ось «+X» лежит в плоскости орбиты и направлена в ту же сторону, что и вектор скоро-

сти. Оси «X» и «Y» могут менять ориентацию в пространстве, при этом известно их положение в пространстве в каждый момент времени с точностью не хуже 0,5°. Точность знания положения центра масс прибора не хуже 1 км. Срок активного существования МКА не менее трёх лет.

### Принцип работы «МОНИКА»

Заряженные частицы (ядра от водорода до никеля), движущиеся в прямом направлении и попадающие в апертуру прибора, проходят последовательно через детекторы Д1, Д2, Д3 и т. д. (см. п. 1.6.1), теряют энергию и поглощаются в приборе.

Сигналы с детекторов поступают на систему дискриминаторов и на входной каскад электроники, который включает в себя предусилители и формирующие усилители.

Сформированные импульсы со всех детекторных каналов идут на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), где они оцифровываются. Оцифровка сигналов также как и сбор данных запускаются триггером, вырабатываемым триггерной системой.

Блок сбора и обработки научной информации выполняет сжатие данных и первичную обработку в реальном времени. После первичной обработки данные поступают в ЗУ.

Система контроля и мониторинга обеспечивает связь с бортовыми системами спутника и контроль над работой всех систем прибора. Этот модуль получает от служебных систем спутника бортовое время, положение и ориентацию спутника в пространстве и данные о состоянии систем прибора. Информация запаковывается и отсылается в ЗУ, которое имеет память 1,0 Гб. При заполнении ЗУ данные пересылаются в буфер памяти МКА, где эта информация накапливается и затем пересылается на Землю.

### Электроника спектрометра «МОНИКА»

Внешний вид электроники спектрометра в процессе сборки показан на рис. 5.

Основные требования, предъявляемые к электронике считывания:

- шумы детектора и электроники не должны превышать 10 кэВ;
- ширина канала АЦП – не более ~50 – 100 кэВ;
- предполагаемая триггерная нагрузка – до 1 кГц;
- разрешающее время ~50 нс;
- мёртвое время не более 1 мс.

В качестве считывающей электроники были выбраны заказные микросхемы (ASIC – Application Specific Integrated Circuits), выпускаемые компанией IDEAS серий VA и VA – TA. Микросхемы этих серий выполнены по технологии 0,8 мкм и представляют собой малошумящие многоканальные зарядочувствительные усилители с параллельной защёлкой и хранением данных, и с мультиплексированным аналоговым выходом. Серия VA – TA отличается наличием триггерной функции. Данные микросхемы были специально разработаны для детектирования заряженных частиц и фотонов в счётных и спектроскопических исследованиях.

В качестве регистрирующей электроники calorиметрических каналов спектрометра предполагается использовать микросхемы VA32\_HDR14, имеющие 32 входных аналоговых канала и мультиплексированный дифференциальный аналоговый выход.

Для телескопической части спектрометра в качестве регистрирующей и триггерной электроники используются микросхемы VA32TA2 – 2. Каждый канал микросхемы снабжен дополнительным быстрым CR – RC формирователем и следующим за ним дискриминатором. Триггерные сигналы с каждого канала объединяются по схеме проводного ИЛИ в один общий триггерный выход. Для уменьшения разброса по порогам, на каждый дискриминатор

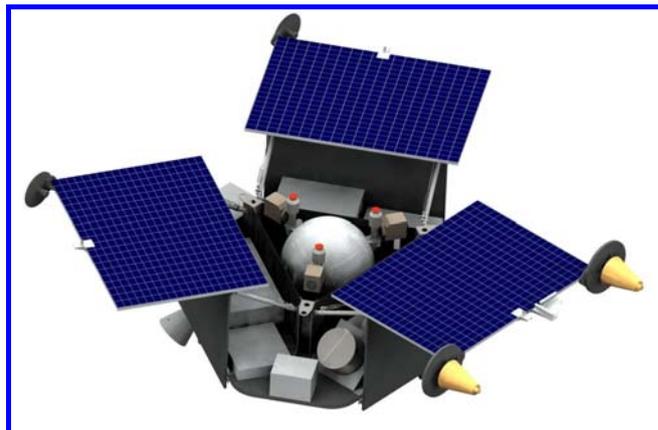


Рис. 4. Платформа «КАРАТ»



Рис. 5. Внешний вид электроники спектрометра в процессе сборки

данной микросхемы установлен дополнительный четырёхбитный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), работающий совместно с базовым 5-разрядным ЦАП. Также предусмотрено тестирование каждого отдельного канала, в то время как остальные продолжают работать в режиме измерения.

VA32TA2 – 2 может быть также использована в SAC-детекторах.

Сигналы с телескопической части спектрометра и боковых детекторов антисовпадений, полученные на триггерных выводах микросхем VA32TA2 – 2, через управляемую задержку поступают на на схему триггерной логики. В зависимости от фоновых условий, которые сильно меняются вдоль траектории спутника и зависят как от типа фоновых частиц, так и от величины их потоков, триггерная логика может быть перепрограммирована. Выходной сигнал с блока триггерной логики поступает на входы «Hold» микросхем электроники считывания и данные запоминаются

на внутренних ёмкостях. После этого сохраненные данные последовательно поканально считываются и поступают на 16-разрядный АЦП, в качестве которого используется микросхема фирмы Analog Device AD7688, откуда полученный цифровой код записывается в память типа FIFO. Для реализации программируемой триггерной логики, управления считыванием данных и записи в память используется микросхема фирмы ACTEL Fusion AFS600 со встроенным 32-разрядным процессором типа RISC и 100 кбит внутренней памяти. Каждое событие записывается в память со своим заголовком, а записи данных предшествует запись адреса считываемого канала. Каждая микросхема считывания нагружается одним АЦП. Из памяти FIFO данные последовательно записываются в буферную память, где формируется пакет на передачу со своим заголовком.

### Заключение

Целью эксперимента «МОНИКА» является изучение механизмов генерации КЛ в активных процессах на Солнце и в гелиосфере, мониторинг ядерного, изотопного и ионного состава КЛ в околоземном пространстве. При исследовании потоков ядер КЛ с энергиями от десятков до нескольких сотен МэВ/н, интенсивность которых отличается на порядки, особенно важной является проблема идентификации частиц. Для рассмотрения возможностей идентификации ядер в спутниковом эксперименте «МОНИКА» с использованием многослойного кремниевого спектрометра был выбран метод аппроксимации кривой Бете – Блоха. Этот метод оптимизирован для случая «пролётных» частиц и позволяет надёжно идентифицировать ядра, прошедшие насквозь полупроводниковый спектрометр и остановившиеся в сцинтилляционном калориметре прибора «МОНИКА», с зарядовым разрешением лучше 0,3 и с энергетическим разрешением лучше 3% во всем рассматриваемом диапазоне энергий.

При проведении эксперимента ожидается зарегистрировать:

- в случае мощного солнечного события:
  - ионов O –  $10^4$ – $10^5$ ;
  - ионов Fe –  $10^3$ – $10^4$ ;
- аномальных КЛ в год (минимум солнечной активности):
  - ионов O –  $10^4$ – $10^5$ ;

- ионов Ne –  $10^3$ – $10^4$ ;
- галактических КЛ в год (минимум солнечной активности):
  - ядер Fe –  $10^3$ .

### Литература

1. Three Unusual Cosmic – Ray Increases Possibly Due to Charged Particles from the Sun / S. E. Forbush // Phys. Rev. – 1946. – Vol. 70. – P. 771 – 772.
2. The solar flare myth / J. T. Gosling // J. Geophys. Res. – 1993. – Vol. 98. – P. 18937 – 18949.
3. Strong Energy Dependence of Ionic Charge States in Impulsive Solar Events / E. Möbius [et al.] // Proc. 28<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. (Tsukuba). – 2003. – Vol. 6. – P. 3273–3277.
4. Observation of energy-dependent ionic charge states in impulsive solar energetic particle events / B. Klecker [et al.] // Adv. Space Res. – 2006. – Vol. 38. – № 3. – P. 493 – 497.
5. A Proton/Electron Telescope for Studies of Magnetospheric, Solar and Galactic Particles / W. R. Cook [et al.] // IEE Trans. GeoSci & Remote Sensing. – 1993. – Vol. 31. – № 3. – P. 557 – 564.
6. The experiment NINA: low energy nuclear flux investigation in near – Earth space / A.V. Bakaldin [et al.] // Astroparticle Phys. – 1997. – Vol. 8. – P. 109.
7. The measurements of light high-energy ions in NINA-2 experiment / A. Leonov [et al.] // Annales Geophysicae. – 2007. – Vol. 25. – P. 2029 – 2036.
8. A new test for solar modulation theory: the 1972 May–July low energy galactic cosmic ray proton and helium spectra / M. Garcia – Munoz, G. M. Mason, J. A. Simpson // Astrophys. J. – 1973. – Vol. 182 – P. 81 – 84.
9. The anomalous He<sub>4</sub> component in the cosmic ray spectrum at 50 MeV per nucleon during 1972 – 1974 // M. Garcia – Munoz, G. M. Mason, J. A. Simpson / Astrophys. J. – 1975. – Vol. 202. – P. 265.
10. The anomalous abundance of cosmic-ray nitrogen and oxygen nuclei at low energies // F. B. McDonald, B. J. Teegarden, J. H. Trainor, W. R. Webber / Astrophys. J. – 1974. – Vol. 187. – P. 105 – 108.
11. Computer simulations for a cosmic ray heavy ion telescope / Kazuoki Munakata, Tsuyoshi Kohno, Takashi Imai, Masaru Matsuoka // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1989. – Vol. A 276. – P. 306 – 316.
12. Direct industry. The online industrial exhibition [Электронный ресурс]. – <http://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/pt100-probe-75541.html>.
13. Методика идентификации ядер в эксперименте «МОНИКА» // А. В. Бакалдин, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, С. В. Колдашов, К. А. Липатов, М. О. Фарбер / ПТЭ. – 2010. – № 4. – С. 27.

Поступила в редакцию 30.04.2013

*Александр Владимирович Карелин, канд. физ.-мат. наук, инженер,  
e-mail: karelin@hotmail.ru, т. 8 (903) 679-90-54.*

*Алексей Викторович Бакалдин, канд. физ.-мат. наук, научн. сотрудник.*

*Сергей Александрович Воронов, д-р физ.-мат. наук, профессор.*

*Александр Никитич Квашинин, канд. физ.-мат. наук, старший научн. сотрудник.*

*Николай Иванович Замятин, канд. техн. наук, начальник отдела.*