



GAMMA-400

СИСТЕМА АНТИСОВПАДАТЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ТЕЛЕСКОПА ГАММА-400: ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВАНИИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРОТОТИПОМ СИСТЕМЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ И НА ПУЧКЕ ПОЗИТРОНОВ СИНХРОТРОНА С-25Р "ПАХРА"

А. И. Архангельский^{2*}, А. М. Гальпер^{1,2}, И. В. Архангельская², А. В. Бакалдин^{1,3},
О. Д. Далькаров¹, М. Г. Коротков², А. А. Леонов^{1,2}, Н. Ю. Паппе¹, Ю. И. Стожков¹, С. И. Сучков¹,
Н. П. Топчиев¹, Ю. Т. Юркин²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»», Москва

³Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, Москва

*E-mail: Архангельский Андрей Игоревич AIArkhangelskij@mephi.ru, aiangel@lebedev.ru

Skype: <https://join.skype.com/iCeNnbm3t72y>

Космический проект ГАММА-400 относится к новому поколению космических обсерваторий, предназначенных для проведения поиска следов темной материи в космическом гамма-излучении, измерения характеристик диффузного гамма-излучения и гамма-излучения Солнца в периоды солнечной активности, гамма-всплесков, протяженных и точечных гамма-источников, потоков электронов, позитронов, а также ядерной компоненты космических лучей с энергиями вплоть до нескольких ТэВ. Ядром комплекса научной аппаратуры является гамма-телескоп.

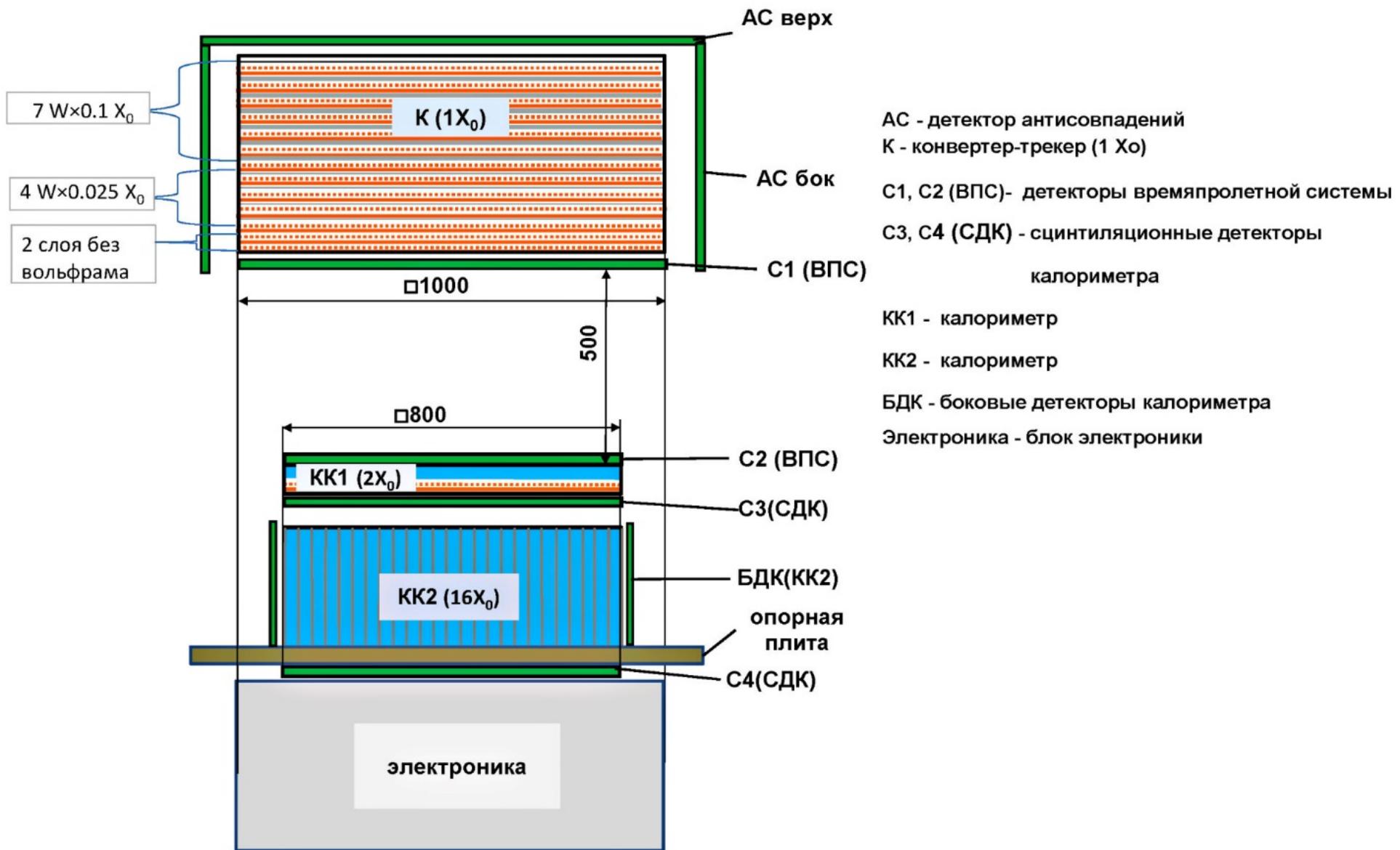
Гамма-телескоп ГАММА-400 предназначен для прецизионного измерения космического гамма-излучения в диапазоне энергий от 20 МэВ до сотен ГэВ; регистрации космического гамма-излучения от активных астрофизических объектов разной природы; поиска особенностей в энергетических спектрах от дискретных и протяженных источников; регистрации гамма-излучения

от переменных дискретных источников с целью выяснения природы ускорительных процессов элементарных частиц в этих источниках; проведения детальных обзоров и картографирования галактической плоскости и центра Галактики с высоким разрешением и высокой чувствительностью [1, 2].

Комплекс научной аппаратуры ГАММА-400 устанавливается на платформе НАВИГАТОР [3], разрабатываемой НПО им. С.А. Лавочкина и выводится на высокоапогейную орбиту со следующими начальными параметрами:

- высота апогея не менее 300000 км;
- высота перигея не менее 500 км;
- наклонение к плоскости экватора $51,4^\circ$;
- период обращения 7 суток.

Физическая схема гамма-телескопа

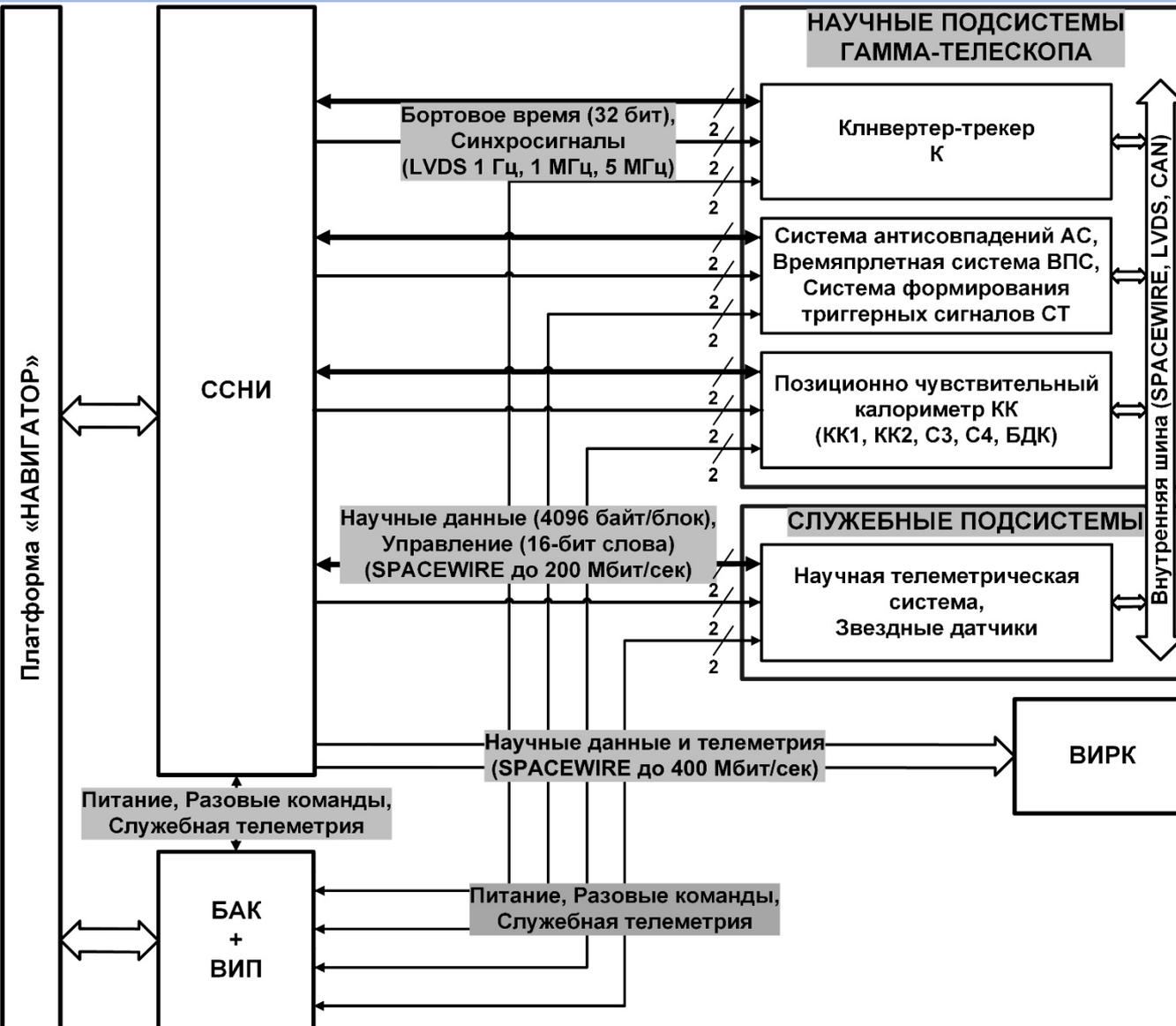


В состав гамма-телескопа входят следующие системы и детекторы:

- **К** – координатно-чувствительный конвертер-трекер;
- **КК1** и **КК2** – спектрометрические блоки координатно-чувствительного калориметра **КК** на основе CsI(Tl);
- **С3** – сцинтилляционный детектор прешауэра (**КК1+С3**) калориметра;
- **С4** – сцинтилляционный детектор утечки;
- **ВПС** – времяпролетная система, состоящая из четырех, ориентированных перпендикулярно плоскостей, состоящих из десяти (восьми) полос сцинтиллятора ВС408 размером 1000 (800) мм × 100 мм × 10 мм каждая, объединенных попарно в детекторы **С1** и **С2**, расположенные на расстоянии 50 см друг от друга;

- $АС_{\text{верх}}$ – верхний антисовпадательный детектор;
- $АС_{\text{бок}}$ – боковые антисовпадательные детекторы;
- **БДК** – боковые антисовпадательные детекторы калориметра (детекторы **С3**, **С4**, **ВПС**, **АС** и **БДК** выполнены из конструктивно и схемотехнически унифицированных модулей и различаются размером и количеством сцинтилляционных полос, а также содержанием блоков фронтальной электроники);
- отсек блоков электроники;
- система формирования триггерных сигналов - отбора событий (**СТ**);
- система управления, сбора и хранения научной информации (**ССНИ**) [4];
- система электропитания (**СЭП**).

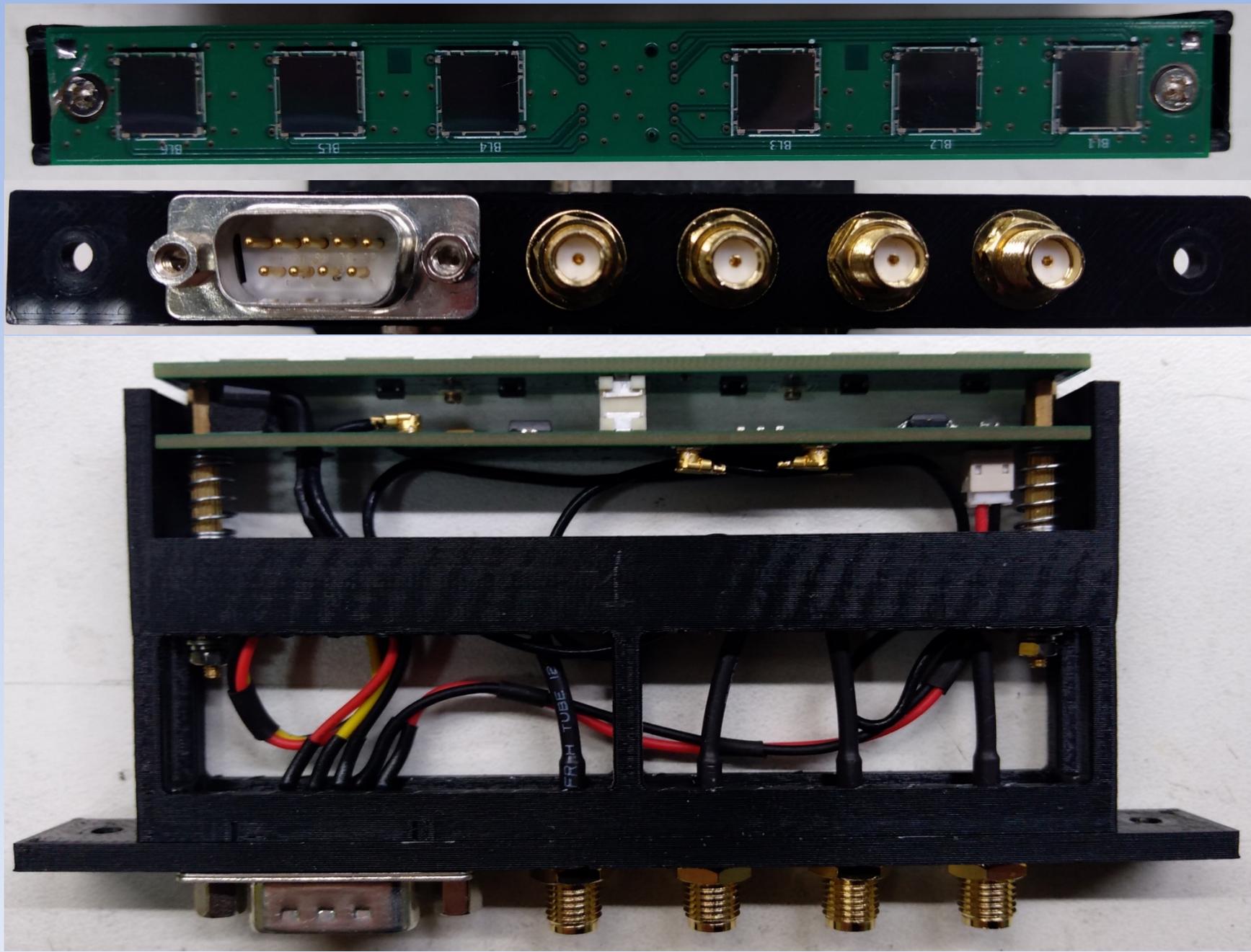
Функциональная схема гамма-телескопа



ССНИ – система сбора научной информации;
БАК – блок аппаратов коммутации;
ВИП – вторичные источники питания систем гамма-телескопа;
ВИРК – высокоинформативный радиокomплекс.

Система антисовпадательных детекторов телескопа представляет собой комплекс из сегментированных двухслойных сцинтилляционных счетчиков на основе поливинилтолуола ВС408, с отдельной регистрацией событий в каждом слое посредством матриц кремниевых фотоумножителей (SiPM). Верхний антисовпадательный детектор $AC_{\text{верх}}$, и боковые антисовпадательные детекторы $AC_{\text{бок}}$ образуют защиту для основной апертуры гамма-телескопа (направление сверху-вниз), в то время как детекторы **С3**, **С4** и **БДК** образуют защиту для боковой апертуры гамма-телескопа (направление падения частиц на плоскости **БДК**). В текущей реализации прототипа системы используются матрицы из шести SiPM размером 6 мм x 6 мм, размещенных на печатной плате.

Блок фотопремников прототипа гамма-телескопа



Учитывая необходимость получения со счетчиков как временной, так и амплитудной информации в системе применены кремниевые фотоумножители OnSemi/SensL MicroFC-60035-SMT-C1, имеющие дополнительный “быстрый” выход с малой выходной емкостью, позволяющий одновременно получать как сигнал временной привязки с фронтом $2\div 4$ нс, так и сигнал с фронтом ~ 200 нс для определения энерговыделения в сегментах детекторов с разрешением $\sim 30\div 40\%$. Сигналы с “быстрых” выходов SiPM суммируются на матрице из диодов Шоттки SMS7621-006LF Skyworks [5], смонтированных на той же плате, что и SiPM размером 90 мм x 11.5 мм. Там же размещен цифровой термодатчик Maxim DS18B20, предназначенный для работы узла

температурной стабилизации усиления SiPM, обеспечивающий в диапазоне $+10\div+30^{\circ}\text{C}$ точность измерения температуры платы $\sim 0.1\%$. Суммарный сигнал дополнительно усиливается в ~ 10 раз предусилителем на основе InGaP MMIC HMC589AST89ET производства Analog Devices, смонтированном на отдельной плате, размещенной на расстоянии 5 мм от платы SiPM и соединенной с ней через пару межплатных разъемов Hirose DF17(2.0)-20DP-0.5V(57)/DF17(4.0)-20DS-0.5V(57).

Блок фотоприемников соединяется посредством набора кабелей длиной 10 см с блоком фронтальной электроники, содержащем источники вторичного электропитания и узел дополнительного усиления сигнала ($K_u=50\div 100$) на операционных усилителях AD8000.

В рамках осуществления космических проектов “ГАММА-400” и “АЛЬФА-ЭЛЕКТРОН”, коллаборацией ФИАН и НИЯУ МИФИ созданы три калибровочных квазимонохроматических пучка электронов (позитронов) на базе ускорителя ФИАН С-25Р “ПАХРА” для проведения тестовых исследований характеристик детекторов и аппаратуры проектов [6, 7].

1. Пучок с энергией вторичных электронов 20-300 МэВ, средней интенсивностью $\sim 1 \div 10^2 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$;

2. Пучок с энергией вторичных электронов 3-100 МэВ, средней интенсивностью $\sim 10 \div 10^3 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$;

3. Пучок с энергией вторичных электронов 90-250 МэВ, средней интенсивностью $\sim 10^2 \div 10^3 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$.

Интенсивность пучков зависит от энергии вторичных частиц, возрастая с ее увеличением.

Энергетическое разрешение пучков улучшается с ростом энергии и составляет в среднем $\sim 10\%$.

В данной работе представлены первые результаты, полученные на только что созданном пучке №3 с прототипом детектора $AC_{\text{верх}}$ с использованием “быстрого” выхода кремниевых фотоумножителей матриц фотоприемников. Прототип представляет собой сборку из двух сцинтилляционных полос из поливинилтолуола BC408 размером 1280 мм x 100 мм x 10 мм, помещенных в углепластиковые кожуха толщиной 0.6 мм. Одна из полос обвернута отражателем TYVEX, а вторая отражателем MYLAR. Каждая из полос просматривается с двух противоположных торцов, описанными выше модулями фотоприемников. Для более корректного сопоставления результатов, полученных с разных полос прототипа

В процессе измерений использовался один и тот же комплект фронтальной электроники, модулей фотоприемников, а также измерительной аппаратуры.

Измерения проводились на пучке позитронов с энергией ~ 225 МэВ и энергетическим разрешением $\sim 10\%$ для трех значений координаты центра падения пучка на детектор, относительно его центра: -3 см, $+20$ см и $+40$ см. Исходный пучок ограничивался свинцовым коллиматором диаметром 15 мм и толщиной 50 мм. Для формирования триггерного сигнала использовался телескоп из трех счетчиков на основе полистирольного сцинтиллятора СЦ-301 размером 3 мм \times 15 мм \times 15 мм, просматриваемых двумя SiPM SensL MicroSB-30035-X13 каждый [8], включенных в совпадение. Длительность импульсов на выходе формирователей счетчиков телескопа 20 нс.

Прототип детектора АС_{верх} в зале №2 синхротрона С-25Р

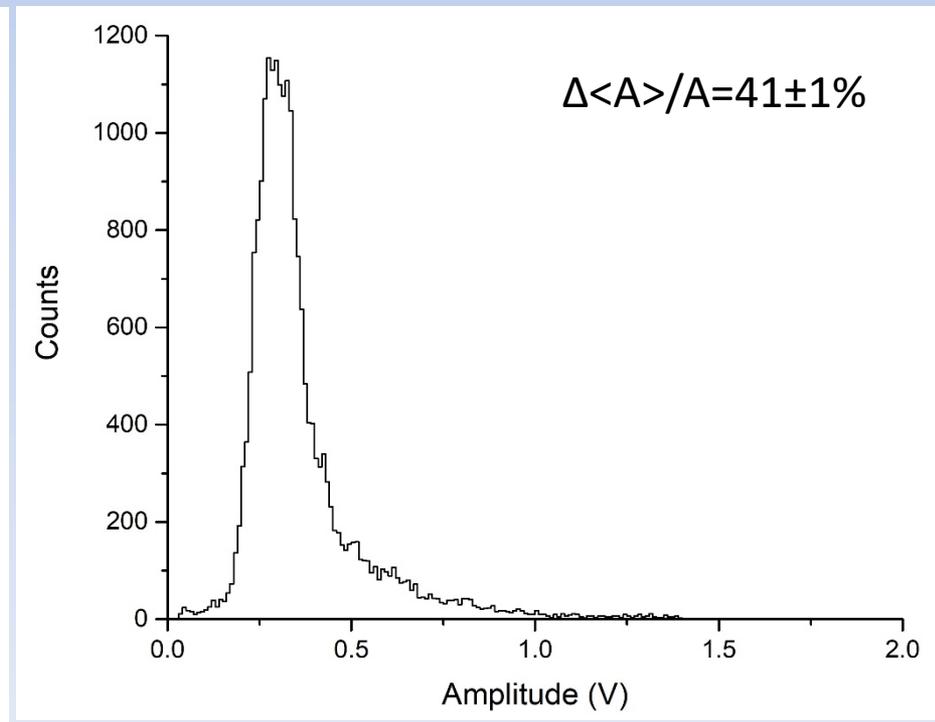
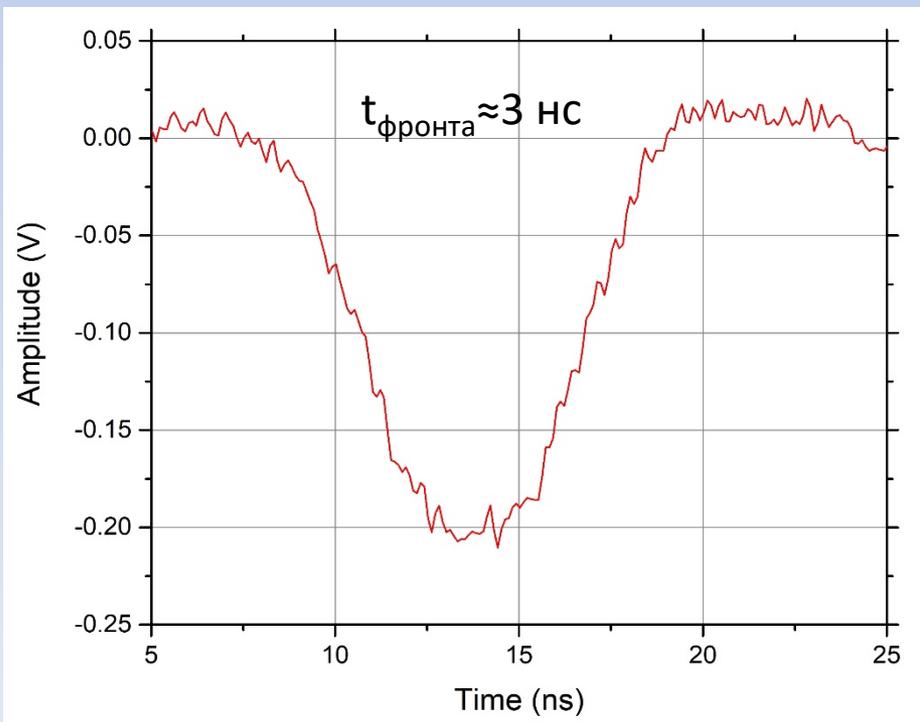


Во время сеанса исследовались следующие параметры детектора:

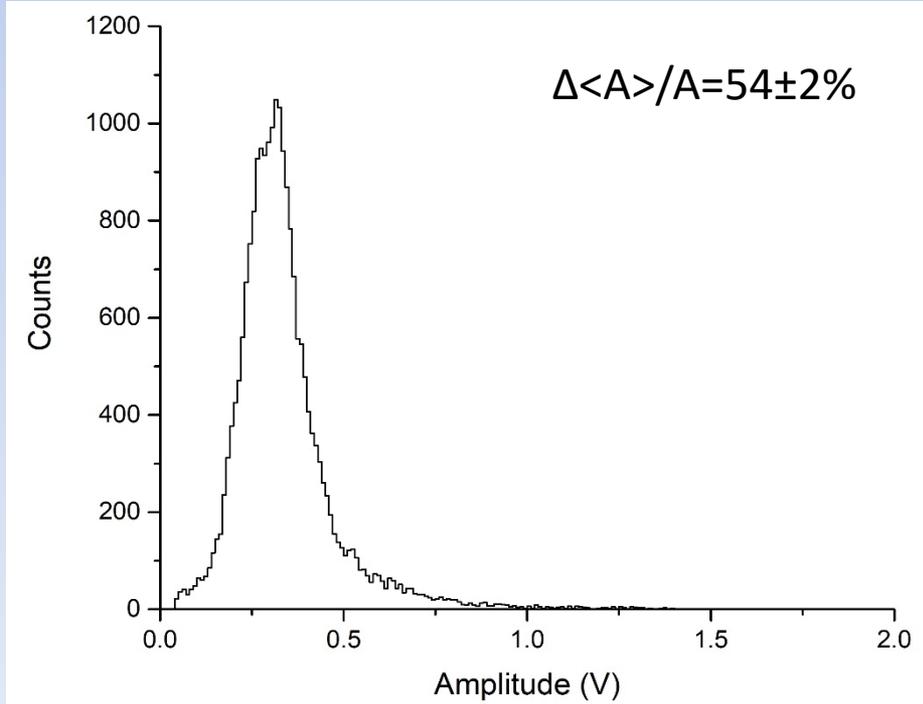
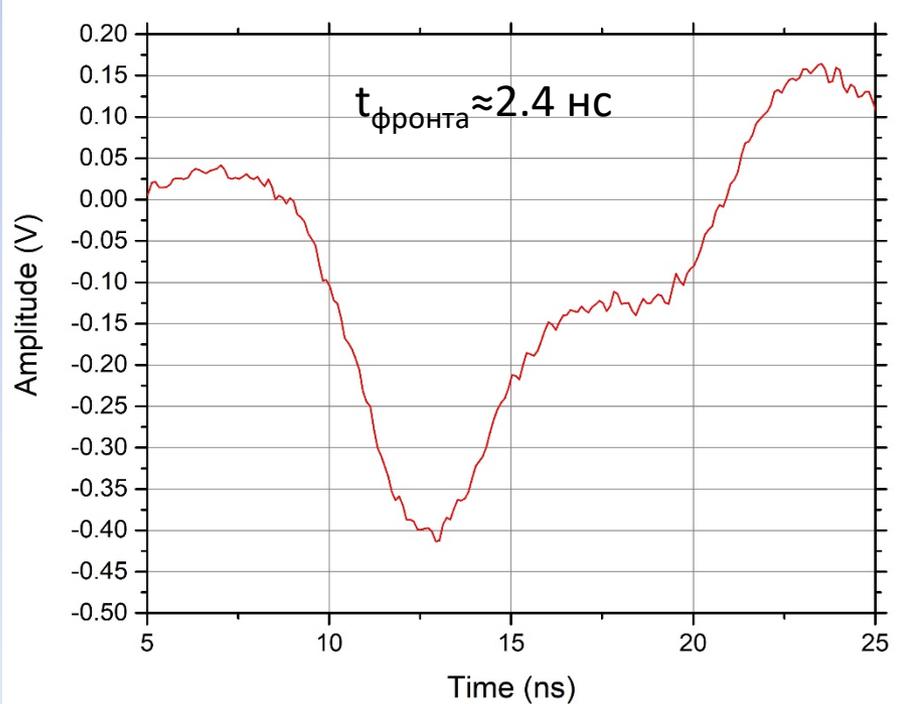
- зависимость эффективности регистрации частиц от координаты центра падения пучка;
- зависимость средней амплитуды выходного сигнала детектора от координаты центра падения пучка;
- зависимость амплитудного разрешения детектора от координаты центра падения пучка;
- зависимость временного разрешения детектора от координаты центра падения пучка.

Все измерения проводились для величины порога регистрации частиц, соответствующего ~ 0.4 МIP для энерговыведения в центре полосы детектора обернутого TUVES и ~ 0.5 МIP для энерговыведения в центре полосы детектора обернутого MYLAR.

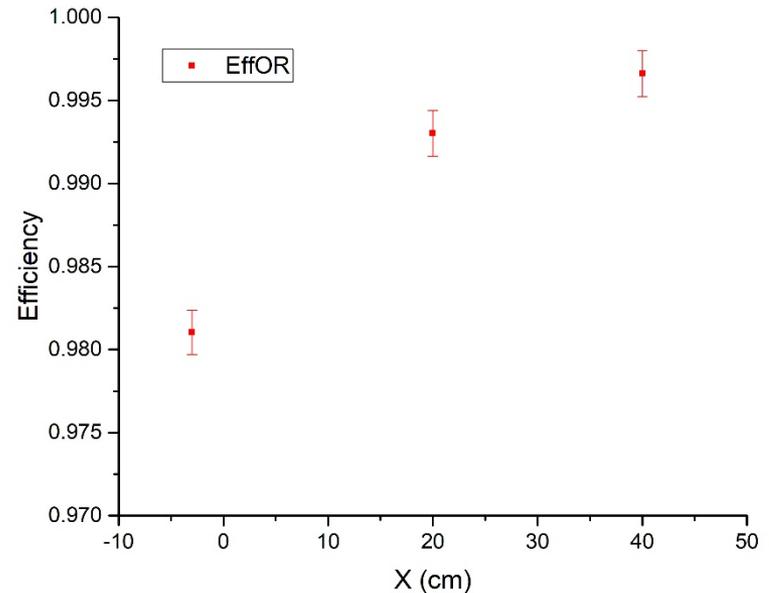
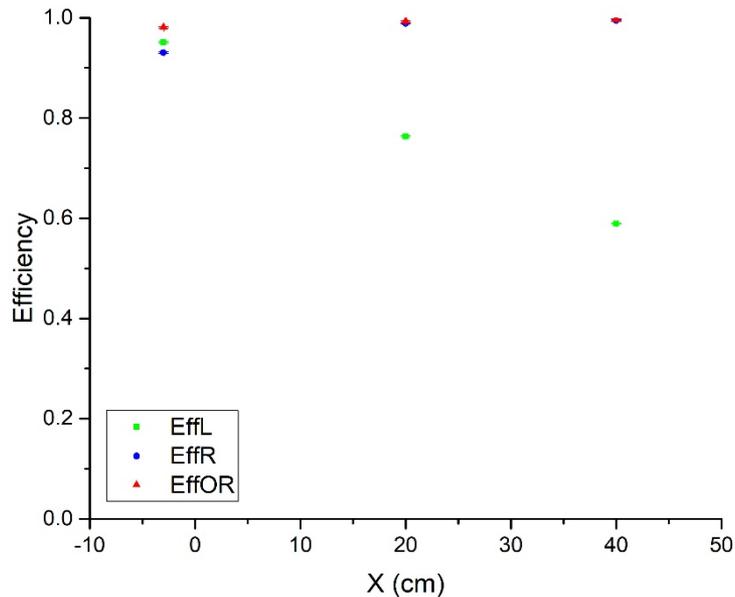
Осциллограмма одиночного импульса и распределение импульсов по амплитуде (~22000 событий) на выходе блока фронтальной электроники, измеренные с одного из торцов детектора при падении позитронного пучка в центре (- 3 см) детектирующего блока размером 1280 мм x 100 мм x 10 мм, обернутого отражателем TYVES.



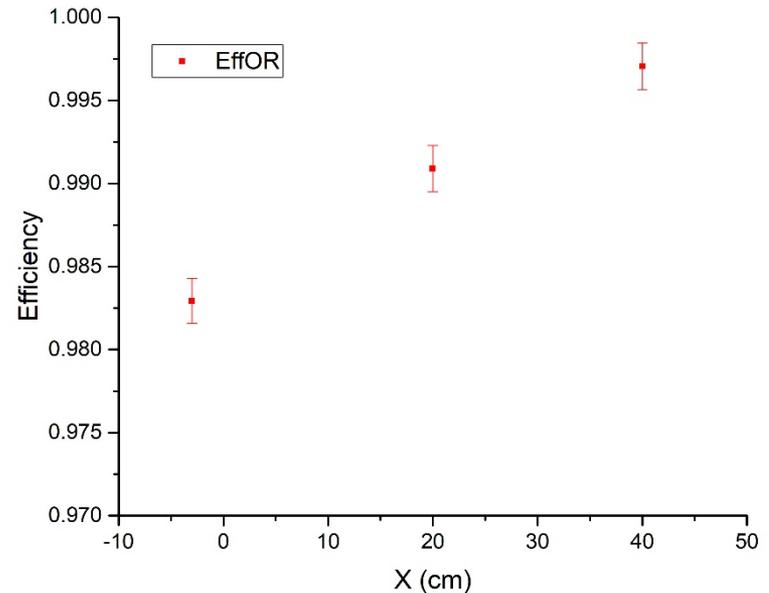
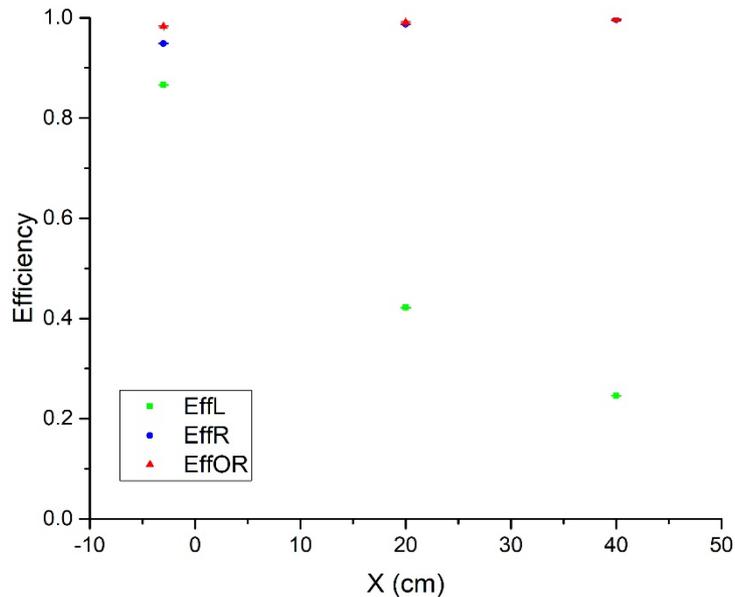
Оциллограмма одиночного импульса и распределение импульсов по амплитуде (~ 22000 событий) на выходе блока фронтальной электроники, измеренные с одного из торцов детектора при падении позитронного пучка в центре (-3 см) детектирующего блока размером 1280 мм \times 100 мм \times 10 мм, обернутого отражателем MYLAR. Сигнал усилен в два раза по сравнению с TYVES.



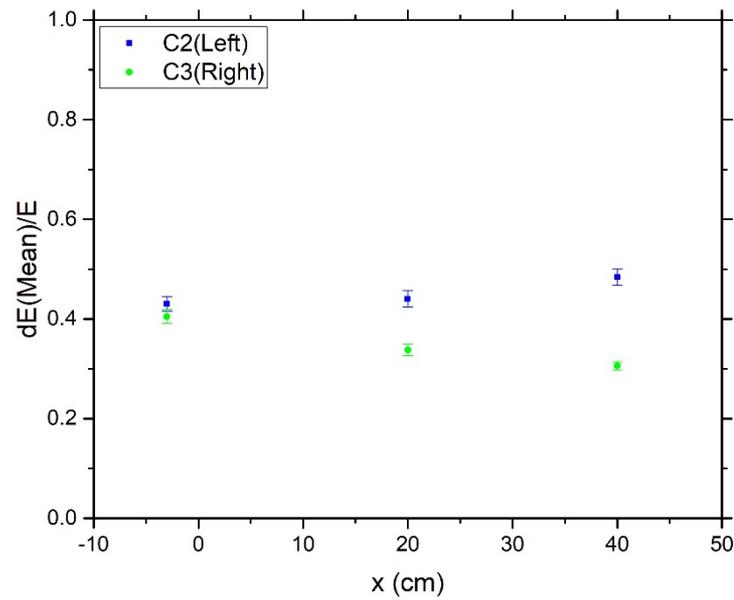
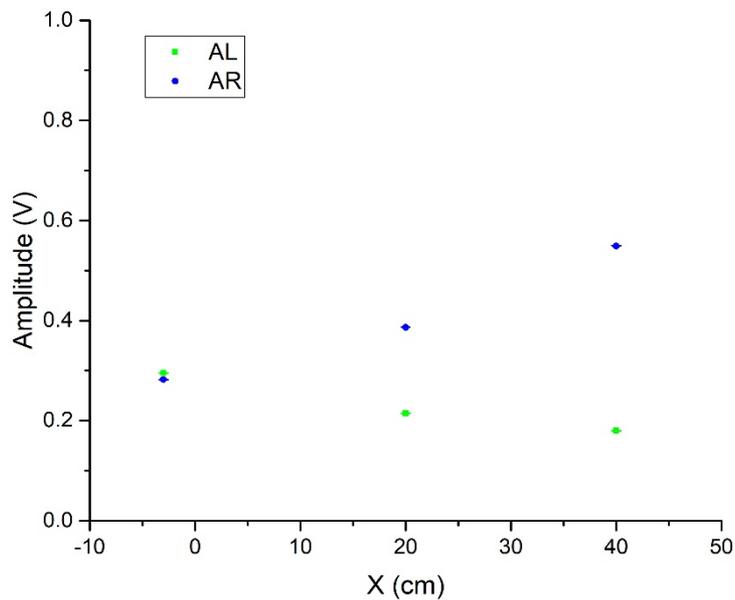
Зависимость эффективности регистрации частиц, измеренные с обоих торцов прототипа детектора, обернутого отражателем TYVES, от координаты центра падения пучка. EffL, EffR – величины, определяемые независимо с разных торцов детектора. EffOR – эффективность, определяемая как логическая сумма с двух торцов детектора.



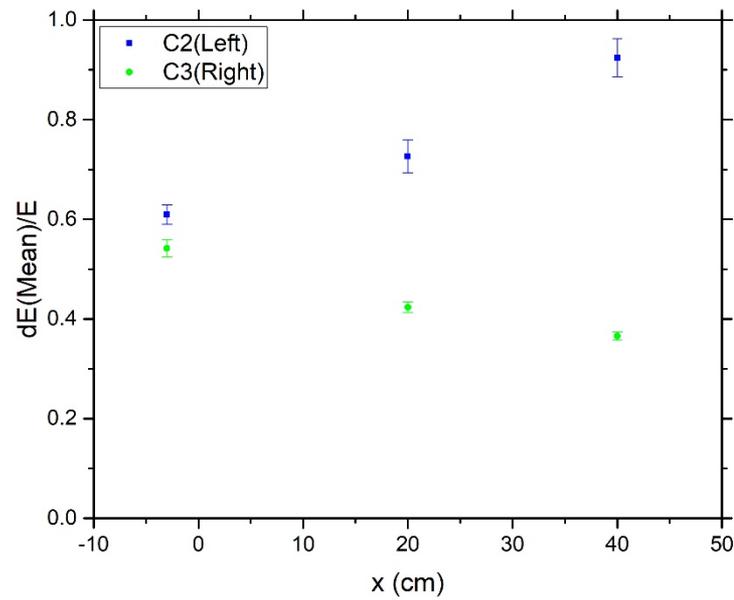
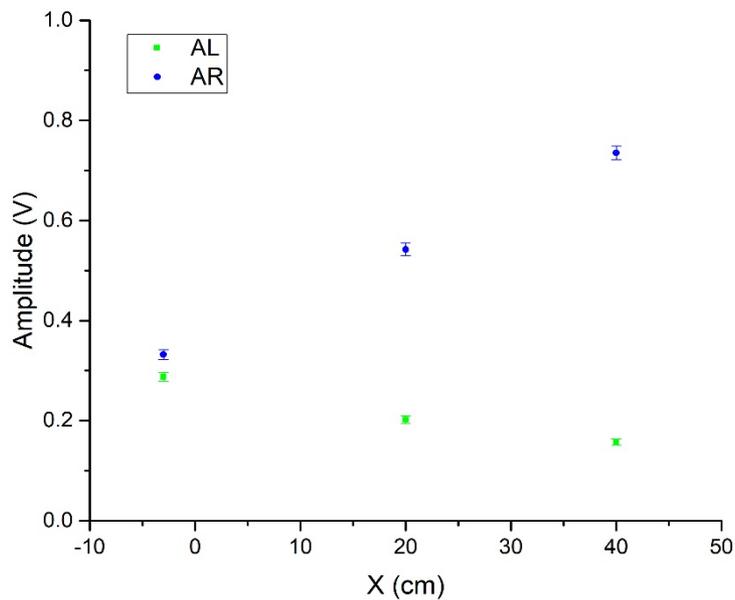
Зависимость эффективности регистрации частиц, измеренные с обоих торцов прототипа детектора, обернутого отражателем MYLAR, от координаты центра падения пучка. EffL, EffR – величины, определяемые независимо с разных торцов детектора. EffOR – эффективность, определяемая как логическая сумма с двух торцов детектора.



Зависимость средней амплитуды выходного сигнала и амплитудного разрешения, измеренные с обоих торцов детектора, обернутого отражателем TYVES, от координаты центра падения пучка.



Зависимость средней амплитуды выходного сигнала и амплитудного разрешения, измеренные с обоих торцов детектора, обернутого отражателем MYLAR, от координаты центра падения пучка.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках осуществления космических проектов “ГАММА-400” и “АЛЬФА-ЭЛЕКТРОН”, коллаборацией ФИАН и НИЯУ МИФИ созданы три калибровочных квазимонохроматических пучка электронов (позитронов) на базе ускорителя ФИАН С-25Р “ПАХРА” для проведения тестовых исследований характеристик детекторов и аппаратуры проектов.

1. Пучок с энергией вторичных электронов 20-300 МэВ, средней интенсивностью $\sim 1 \div 10^2 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$;
2. Пучок с энергией вторичных электронов 3-100 МэВ, средней интенсивностью $\sim 10 \div 10^3 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$;
3. Пучок с энергией вторичных электронов 90-250 МэВ, средней интенсивностью $\sim 10^2 \div 10^3 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$.

Представлены первые результаты, полученные на пучке №3 с прототипом детектора АС_{верх} с использованием “быстрого” выхода кремниевых фотоумножителей матриц фотоприемников. Прототип представляет собой сборку из двух сцинтилляционных полос из поливинилтолуола ВС408 размером 1280 мм x 100 мм x 10 мм, помещенных в углепластиковые кожуха толщиной 0.6 мм. Одна из полос обвернута отражателем TYVEX, а вторая отражателем MYLAR. Каждая из полос просматривается с двух противоположных торцов модулями фотоприемников.

Во время сеанса исследовались следующие параметры детектора:

- зависимость эффективности регистрации частиц от координаты центра падения пучка;

- зависимость средней амплитуды выходного сигнала детектора от координаты центра падения пучка;
- зависимость амплитудного разрешения детектора от координаты центра падения пучка;
- зависимость временного разрешения детектора от координаты центра падения пучка.

Полученные результаты свидетельствуют о худших характеристиках детектора обернутого отражателем MYLAR по сравнению с отражателем TYVEX. Тем не менее количественные значения оценок параметров позволяют сделать заключение о пригодности обоих типов отражателей в сочетании со сбором света матрицами на основе кремниевых фотоумножителей для применения в условиях космического эксперимента для двухслойных антисовпадательных детекторов гамма-телескопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Topchiev N. P., Galper A. M., Bonvicini V., et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79(3). P. 417.
2. Galper A. M., Adriani O., Arkhangelskaja I. V., et al. // Adv. in Space Res. 2013. V. 51. P. 297.
3. Syrov A. S., Smirnov V. V., Sokolov V. N., et al. // Cosmonautics and Rocket Engineering. 2015. V. 3. P. 58.
4. Arkhangelskiy A. I., Bobkov S. G., Serdin O. V., et al. // J. of Phys.:Conf. Ser. 2015. V. 675(3). 032013.
6. Alekseev V. I., Baskov V. A., Dronov V. A., et al. // J. of Phys.:Conf. Ser. 2019. V. 1390. 012127.

7. Alekseev V. I., Arkhangelskiy A. I., Baskov V. A., et al.

// In press.

8. Arkhangelskiy A. I., Galper A. M., Arkhangelskaja I.V., et al. // J. of Phys.:Conf. Ser. 2019. V. 1390. 012130.

СПАСИБО

ЗА

ВНИМАНИЕ!