

А. И. Архангельский^{1*}, (AIArkhangelskij@mephi.ru), А. М. Гальпер^{1,2}, И. В. Архангельская¹, А. В. Бакалдин³, О. Д. Далькаров², М. Г. Коротков¹, А. А. Леонов^{1,2}, Н. Ю. Панне², Ю. И. Стожков², С. И. Сучков², Н. П. Топчиев², Е. Н. Часовиков¹, Ю. Т. Юркин¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»», Москва

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

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

I. ВВЕДЕНИЕ

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 ТэВ; 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°, период обращения 7 суток.

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** – сцинтиляционный детектор преддиверного детектора (**КК1+С3**) калориметра, **С4** – сцинтиляционный детектор утечки, **ВПС** – времяпролетная система, состоящая из четырех, ориентированных перпендикулярно плоскостей, состоящих из десяти (восьми) полос сцинтиллятора BC408 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_{верх}** – верхний антисовпадетельный детектор, **АС_{бок}** – боковые антисовпадетельные детекторы, **БДК** – боковые антисовпадетельные 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), система формирования триггерных сигналов отбора событий (**СТ**), система управления, сбора и хранения научной информации (**ССНИ**) [4], система электропитания (**СЭП**).

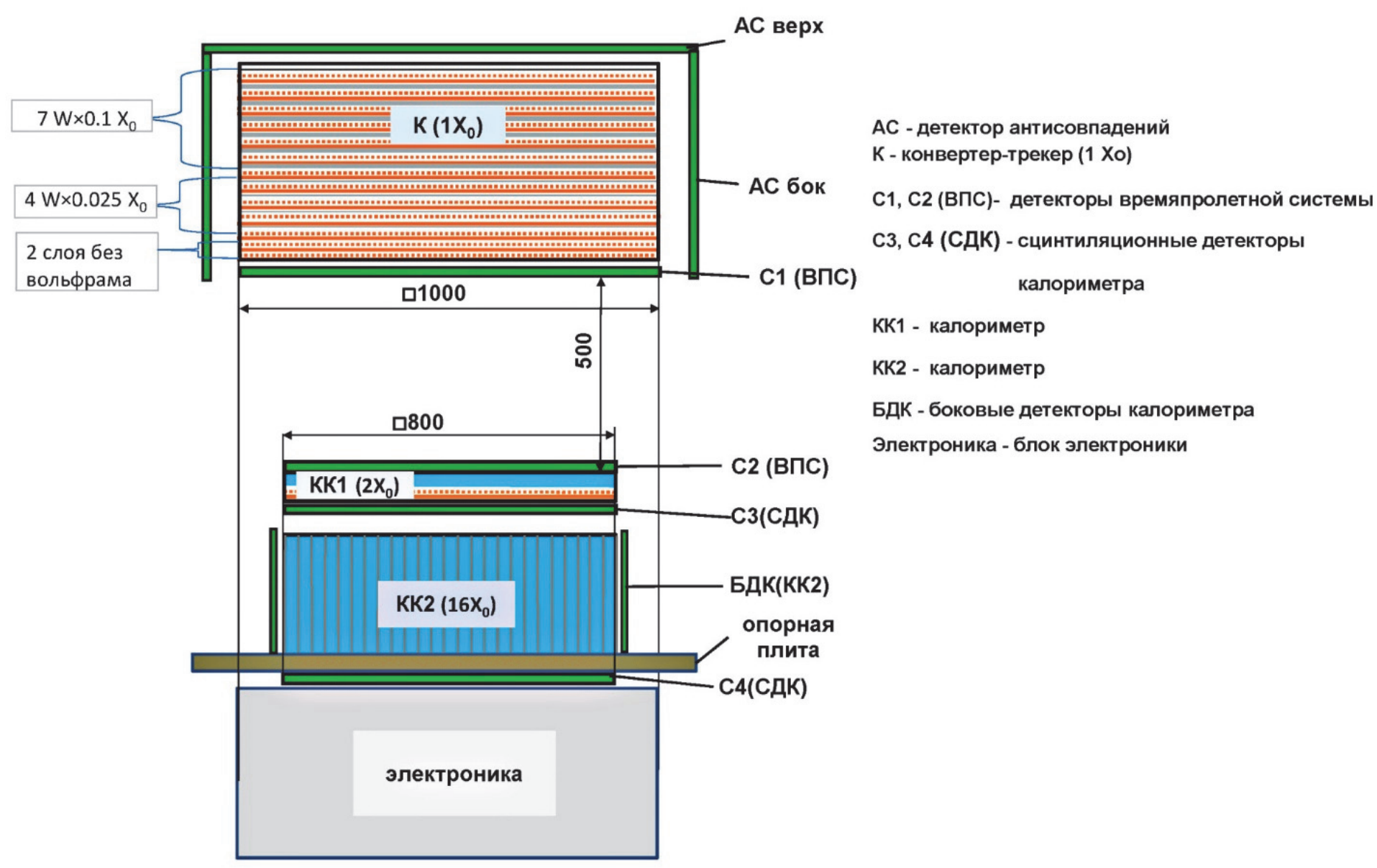


Рис. 1. Физическая схема гамма-телескопа

II. ПРОТОТИП АНТИСОВПАДЕТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Система антисовпадетельных детекторов телескопа представляет собой комплекс из сегментированных двухслойных сцинтилляционных счетчиков на основе поливинилтолуола BC408, с раздельной регистрацией событий в каждом слое посредством матриц кремниевых фотоумножителей (SiPM). Верхний антисовпадетельный детектор **АС_{верх}** и боковые антисовпадетельные детекторы **АС_{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 × 6 мм, размещенных на печатной плате. 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 одновременного получать как сигнал временной привязки с фронтом 2÷4 нс, так и сигнал с фронтом ~200 нс для определения энерговыделения в сегментах детекторов с разрешением ~30÷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 × 11.5 мм. Там же размещен цифровой термодатчик Maxim DS18B20, предназначенный для работы узла температурной стабилизации усиления SiPM, обеспечивающий в диапазоне +10÷+30°C точность измерения температуры платы ~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]:

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

Интенсивность пучков зависит от энергии вторичных частиц, возрастает с ее увеличением. Энергетическое разрешение пучков улучшается с ростом энергии и составляет 1÷10%.

В данной работе представлены первые результаты, полученные на только что созданном 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 BC408 размером 1280 мм × 100 мм × 10 мм, помещенных в углепластиковые кожуха толщиной 0.6 мм. Одна из полос обернута отражателем TYVEC, 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.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились на пучке позитронов со средней энергией 246 МэВ и шириной на полувысоте 3.1 МэВ 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 ЦП-301 размером 3 мм × 15 мм × 15 мм, просматриваемых двумя SiPM SensL MicroSB-30035-X13 каждый [7], включенных в совпадение. Длительность импульсов на выходе формирующих счетчиков телескопа 20 нс.

Во время сеанса исследовались следующие характеристики детектора в зависимости от координаты центра падения пучка позитронов: средняя амплитуда выходного сигнала детектора, амплитудное разрешение детектора, временное разрешение детектора, эффективность регистрации заряженных частиц. Все измерения проводились для величины порога регистрации частиц, соответствующего ~0.5 MIP для энерговыделения в центре полосы детектора. Статистика в каждой точке $\sim 10^6$ частиц для оценки эффективности регистрации и $\sim 2\cdot 10^4$ для остальных измерений.

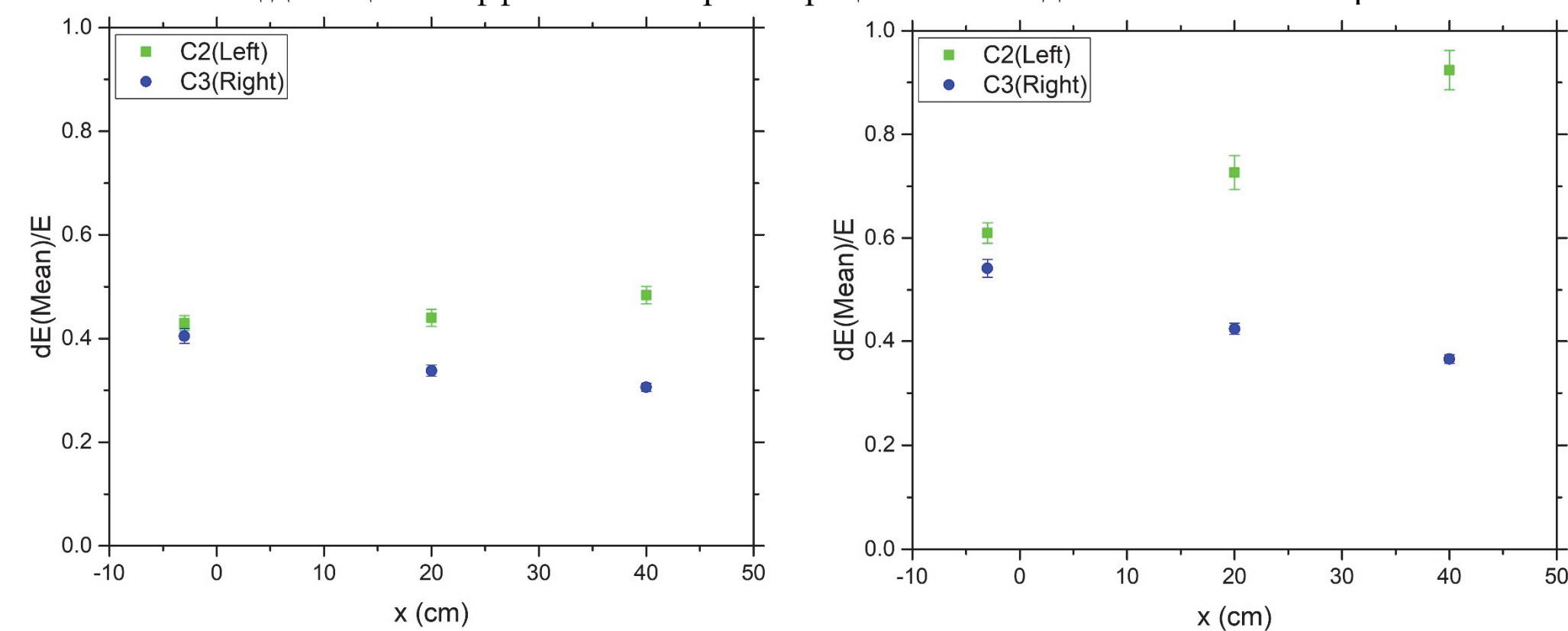


Рис. 2. Зависимость амплитудного разрешения от координаты центра падения пучка для детектора обернутого TYVEC (слева) и MYLAR (справа). Left(L) и Right(R) сигналы с левого и правого торцов полосы

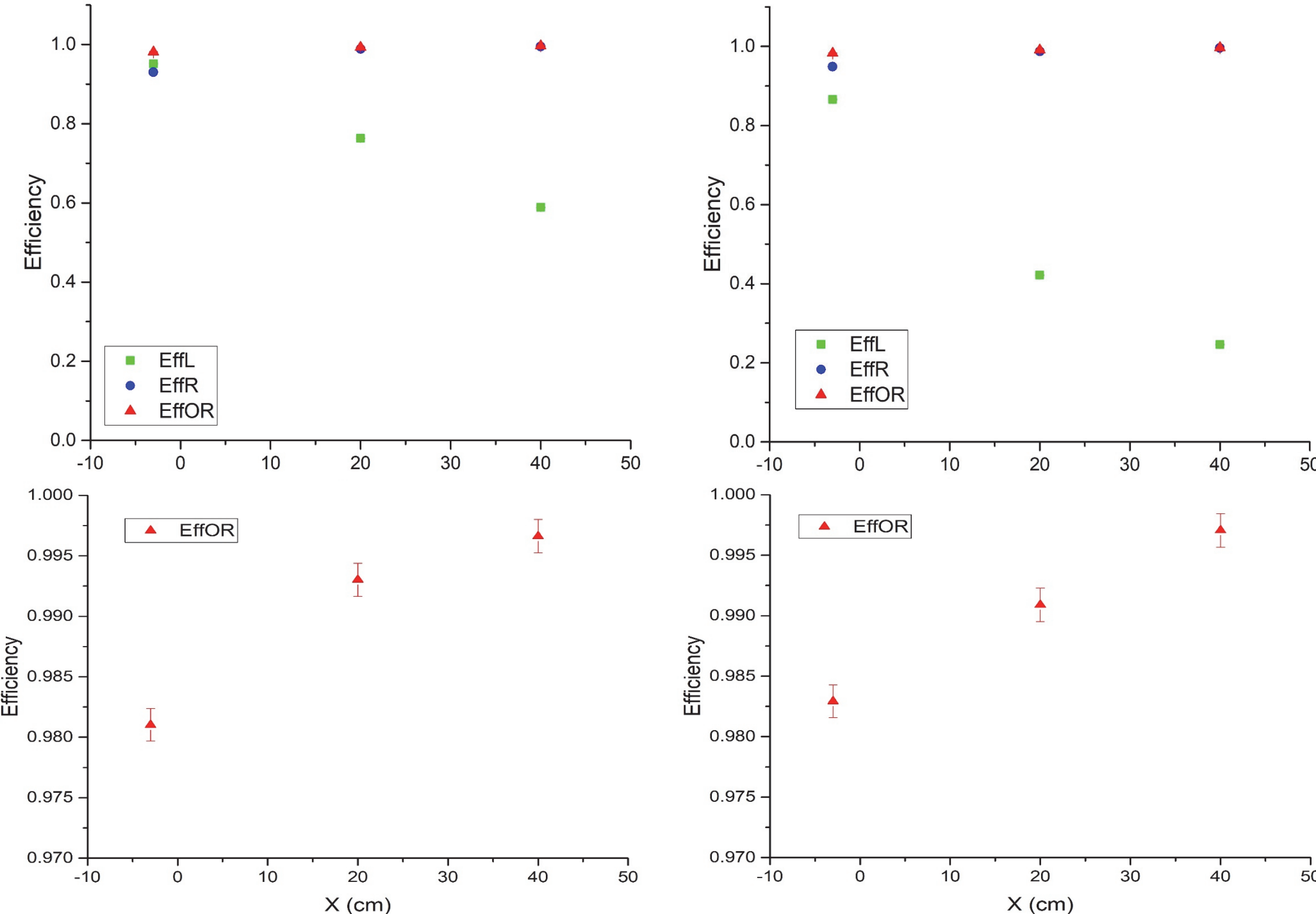


Рис. 3. Зависимость эффективности регистрации заряженных частиц от координаты центра падения пучка для детектора обернутого TYVEC (слева) и MYLAR (справа). EffOR – логическая сумма с торцов полосы

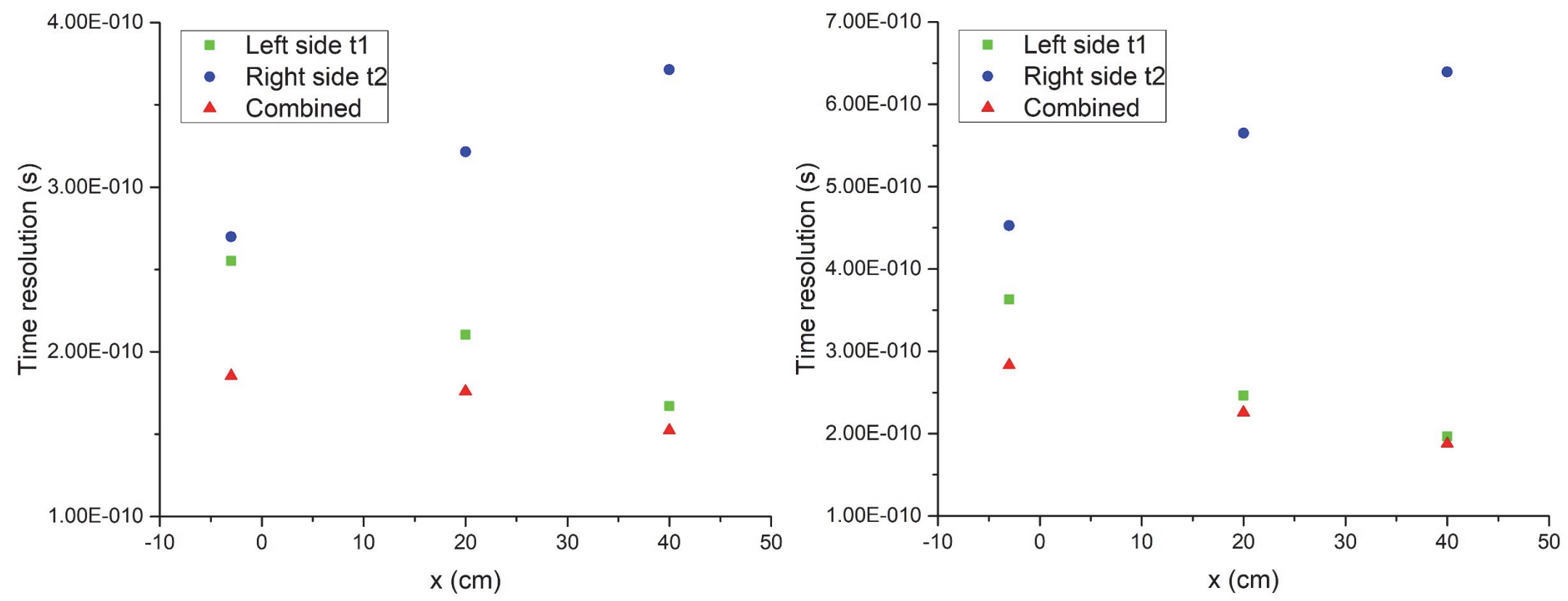


Рис. 4. Зависимость временного разрешения от координаты центра падения пучка для детектора обернутого TYVEC (слева) и MYLAR (справа). Combined – среднее геометрическое с торцов полосы

Параметр	TYVEC	MYLAR
Средняя амплитуда сигнала	290 mV	155 mV
Амплитудное разрешение	(41±1) %	(54±2) %
Временное разрешение	(185±1) ps	(283±2) ps
Эффективность регистрации	(98.1±0.1) %	(98.3±0.1) %

Таб. 1. Характеристики детектирующих полос обернутых TYVEC и MYLAR для пучка в центре полосы

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о несколько худших характеристиках детектора обернутого отражателем MYLAR по сравнению с TYVEC. 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 антисовпадетельных детекторов гамма-телескопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. P. Topchiev, A. M. Galper, V. Bonvicini, et al., Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **79**(3), 417 (2015)
2. A. M. Galper, N. P. Topchiev and Yu. T. Yurkin, Astronomy Reports. **62**(12), 882 (2018)
3. A. S. Syrov, V. V. Smirnov, V. N. Sokolov, et al., Cosmonautics and Rocket Engineering. **3**, 58 (2015)
4. A. I. Arkhangelskiy, S. G. Bobkov, O. V. Serdin, et al., J. of Phys.:Conf. Ser. 2015. V. 675(3). 032013
5. Silicon Driven Multiplexing of Silicon Photomultiplier Arrays, Semiconductor Components Industries, LLC, 2015, Publication order number: AND9772/D (www.onsemi.com)
6. V. I. Alekseev, V. A. Baskov, V. A. Dronov, et al., J. of Phys.:Conf. Ser. 2019. V. 1390. 012127
7. A. I. Arkhangelskiy, A.M. Galper, Arkhangelskaja I.V., et al., J. of Phys.:Conf. Ser. 2019. V. 1390. 012130