

УДК 520.6.05

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ТРИГГЕРНЫХ СИГНАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА ГАММА-400

© 2019 г. А. И. Архангельский^{1, 2, *}, А. М. Гальпер^{1, 2}, И. В. Архангельская², А. В. Бакалдин^{1, 3}, Ю. В. Гусаков¹, О. Д. Далькаров¹, А. Е. Егоров¹, В. Г. Зверев¹, А. А. Леонов^{1, 2}, Н. Ю. Паппе¹, М. Ф. Рунцо², Ю. И. Стожков¹, С. И. Сучков¹, Н. П. Топчиев¹, М. Д. Хеймиц², Е. Н. Часовиков², И. В. Чернышева^{1, 2}, Ю. Т. Юркин²

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

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ”, Москва, Россия

³Федеральное государственное учреждение “Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: AIArkhangelskij@mephi.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

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-400. Специфика планируемых экспериментов предъявляет особые требования к системе формирования триггерных сигналов гамма-телескопа, которая разрабатывается с использованием современной элементной базы и быстрых коммуникационных каналов. В статье обсуждается концепция построения системы, выбранные технические решения, а также некоторые экспериментальные результаты, полученные в ходе проведения работ с прототипом системы на пучке позитронов с энергией 100–300 МэВ синхротрона “ПАХРА” С-25Р Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

DOI: 10.1134/S0367676519050077

ВВЕДЕНИЕ

Космический гамма-телескоп ГАММА-400 [1, 2] представляет собой прецизионную детекти-

рующую систему, состоящую из несколько тысяч унифицированных детектирующих модулей и блоков электроники. Телескоп планируется к запуску на платформе НАВИГАТОР [3], разрабаты-

Рис. 1. Схемы гамма-телескопа ГАММА-400: *a* – физическая схема телескопа: 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 10 полос сцинтиллятора ВС-408 размером $1000 \times 100 \times 10 \text{ мм}^3$ каждая, объединенных попарно в детекторы С1 и С2, расположенные на расстоянии 50 см друг от друга; АС_{верх} – верхний антисовпадательный детектор; АС_{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); *b* – функциональная схема телескопа: ССНИ – система сбора научной информации; БАК – блок аппаратов коммутации; ВИП – вторичные источники питания гамма-телескопа; К1–К4 – автономные секции конвертера-трекера К; СТ – система формирования триггерных сигналов; ВИРК – высокоинформативный радиокомплекс; ϕ – функциональная схема системы формирования триггерных сигналов: МУ – модуль управления, выполняющий предварительную обработку научных данных и информационный обмен с ССНИ; МТЛ – модуль триггерной логики, осуществляющий формирование триггеров на основании выходных сигналов узлов фронтальной электроники; МПТ – модуль питания и телеметрии, осуществляющий взаимодействие с блоком аппаратов коммутации БАК и вторичными источниками питания гамма-телескопа ВИП; ε – функциональная схема унифицированного блока фронтальной электроники: ПУ – предварительный усилитель; БФ – быстрый формирователь с компенсацией нулевого полюса для выделения быстрого фронта сигнала и восстановления базовой линии; ФСП – формирователь со следящим порогом; ВЦП – время-цифровой преобразователь; УУ – общий узел управления блока; АТТ – входной аттенуатор; ТИ – токовый интегратор; Ф – формирователь сигнала; ПД – пороговый дискриминатор; УВХ – устройство выборки-хранения; МУХ – аналоговый мультиплексор; АЦП – 12-битный аналого-цифровой преобразователь; У – узел управления спектрометрического тракта.

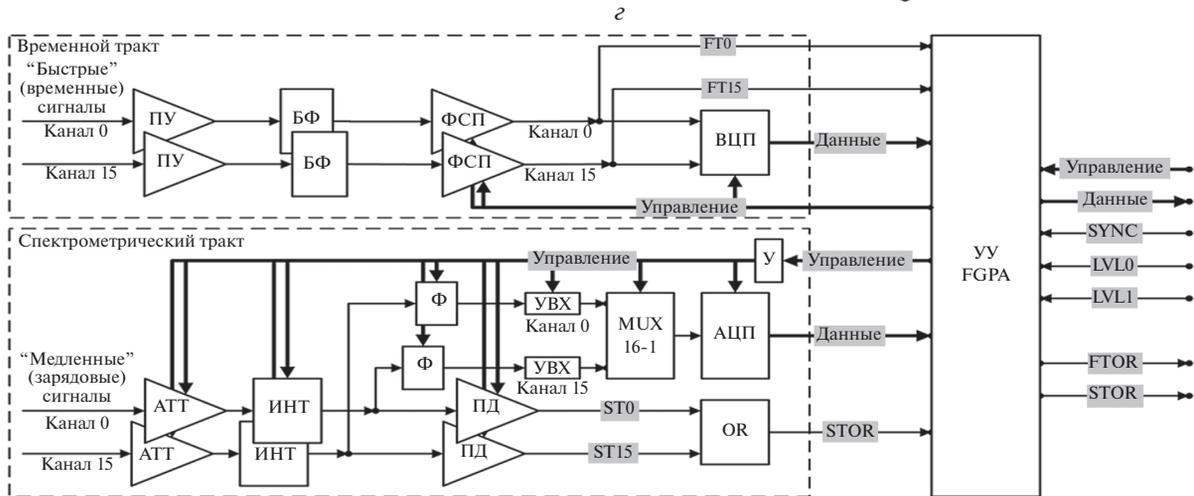
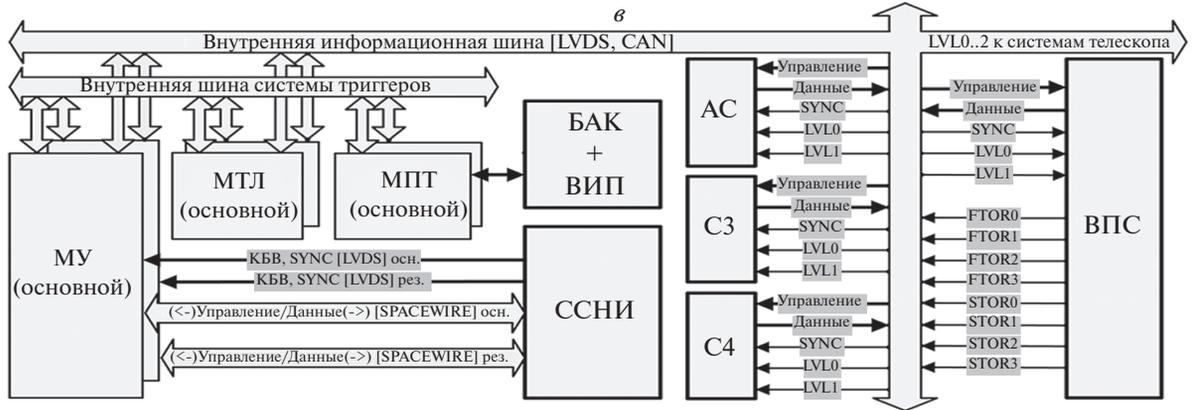
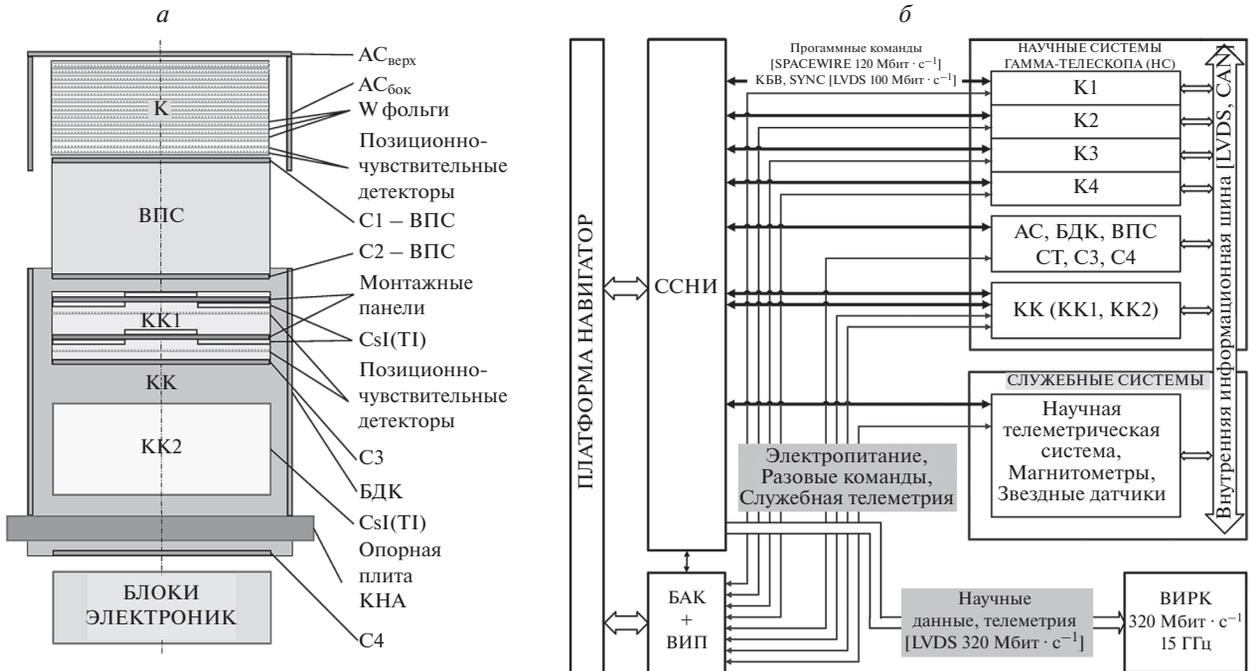


Таблица 1. Условия формирования триггера первого уровня LVL1 для основных типов регистрируемых телескопом событий (упрощенно)

Триггер LVL1	Регистрируемое событие
TOFL & (not AC) & S3	γ
TOFL & AC & S3	e^\pm
TOFL & AC & (not S3)	p, d
TOFH & AC	He, тяжелые ядра

ваемой НПО им. С.А. Лавочкина на высокоапогейную орбиту со средним расстоянием от Земли ~ 120000 км. Основные технические параметры научного комплекса: вес ~ 4000 кг, электрическая мощность, предоставляемая научной аппаратуре ~ 2000 Вт, поток научной информации на наземный сегмент комплекса ~ 100 Гбайт в сут. Физическая и функциональная схемы гамма-телескопа приведены на рис. 1а и 1б соответственно.

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ТРИГГЕРНЫХ СИГНАЛОВ ГАММА-ТЕЛЕСКОПА

Система формирования триггерных сигналов СТ гамма-телескопа ГАММА-400 осуществляет формирование триггеров, соответствующих регистрации различных типов событий (см. табл. 1) на основании выходных сигналов блоков фронтальной электроники детектирующих систем телескопа. Для повышения надежности система спроектирована с использованием схемы двойного резервирования; магистрали информационного обмена также дублированы, причем каждая магистраль имеет свои собственные приемо-передающие узлы. Упрощенная функциональная схема системы формирования триггерных сигналов представлена на рис. 1в. Логика формирования триггеров гамма-телескопа построена по трехуровневой схеме: два быстрых аппаратных уровня LVL0 и LVL1, а также более медленный, формируемый программно уровень LVL2. Блоки фронтальной электроники, предоставляющие исходную информацию для генерации триггеров, являются унифицированными, позволяют подключать до 16 детектирующих модулей каждый и состоят из двух трактов – временного и спектрометрического (см. рис. 1з). Усилитель-формирователь временного тракта блоков (ПУ, БФ, ФСП) выполнен на дискретных радиоэлементах, для временного анализа (ВЦП) используются 4-канальные ASICAMTDC-GPX2 с временным разрешением ~ 20 пс. Сформированные временные ФСП-сигналы поступают на входы ВЦП, а также в общий узел управления блока УУ на основе FPGA (Microsemi Pro ASIC3 в текущей версии прототипа системы), осуществляющий взаимодействие с модулем триггерной логики системы. Спектрометрический тракт выполнен на основе 16-канального ASICIDEASIDE3380.

Сформированные зарядовые сигналы запоминаются на УВХ и по приходу соответствующего триггера последовательно передаются через аналоговый мультиплексор MUX на АЦП для получения оцифрованного значения выделившегося в соответствующем детектирующем модуле заряда. Пороги ФСП устанавливаются программно на уровне $\sim 40\%$ сигнала от минимально ионизирующих частиц (МИР), соответствующих частицам с зарядом $Z \geq 1$, формируя сигналы FT_i , используемые при формировании уровней LVL0 и LVL1 триггерной логики ($i = 0, \dots, 9$ – идентификатор сцинтилляционной полосы для каждой из четырех плоскостей времяпролетной системы ВПС). Пороги дискриминаторов ПД устанавливаются на уровне $\sim 200\%$ МИР, соответствующем частицам с $Z \geq 2$, формируя сигналы ST_i , используемые при выработке триггера LVL1. Сигналы FT_i запоминаются в регистре состояния дискриминаторов ВПС, содержание которых вместе с временной информацией с ВЦП передаются по триггерному сигналу LVL0 в модуль триггерной логики МТЛ через высокоскоростной информационный канал для принятия решения о выработке триггера первого уровня LVL1.

Триггер LVL0 генерируется модулем триггерной логики на основании сигналов ВПС в течение ~ 100 нс после пересечения заряженной частицей апертуры телескопа при условии, что, по крайней мере, с одной из сторон каждой плоскости ВПС поступает сигнал с амплитудой выше порога за заданный временной интервал (100–1000 нс). Для этого сигналы FT_i и ST_i каждой стороны каждой плоскости ВПС логически суммируются, формируя сигналы $FTOR_j$ и $STOR_j$ ($j = 0..1$ – идентификатор стороны плоскости ВПС). Затем сигналы с одной стороны каждой плоскости логически комбинируются по OR или по AND, в зависимости от программных установок, с сигналами с противоположной стороны каждой плоскости, формируя сигналы $TOFL_k$ и $TOFH_k$ ($k = 0..3$ – идентификатор плоскости ВПС), совпадение которых с заданной маской триггера формирует общие сигналы TOFL и TOFH. Сигнал TOFL, соответствующий прохождению частиц с $Z \geq 1$, выдается системам гамма-телескопа как триггер LVL0, а сигнал TOFH, соответствующий частицам с $Z \geq 2$, используется при формировании триггера LVL1. Формирование триггера LVL1 начинается с анализа содержимого регистров состояния дискриминаторов ВПС для оценки положения трека частицы и проверки условий ее попадания в основную апертуру прибора. Затем на основе анализа моментов времени пересечения частицей соответствующих плоскостей ВПС производится отбор частиц, движущихся из верхней полусферы. Одновременно анализируется состояние системы антисовпадений АС с учетом подавления эффекта “обратного тока” на основании временного анализа моментов срабатывания АС и ВПС [5, 6].

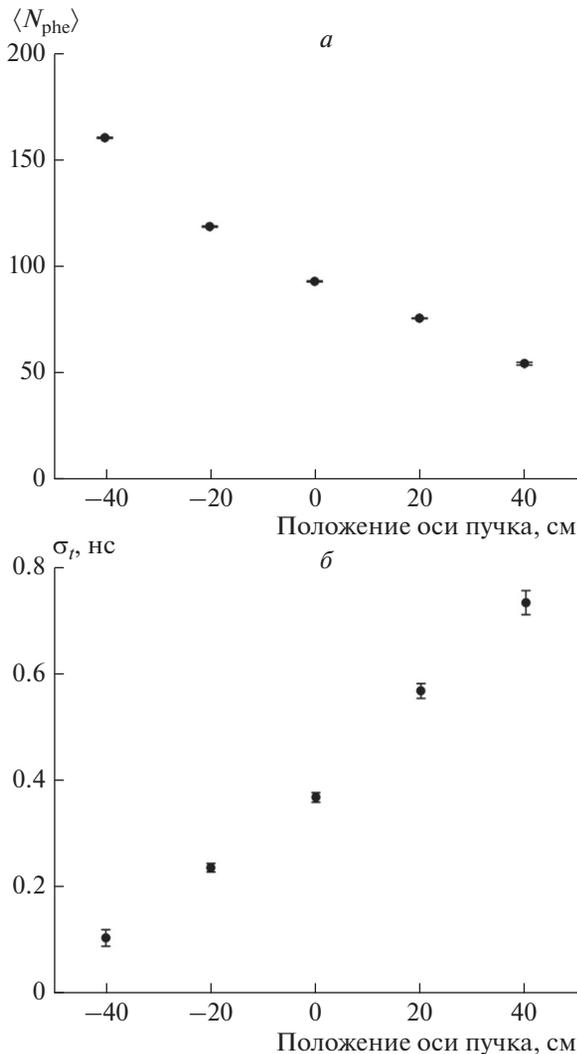


Рис. 2. Результаты измерений с прототипом системы формирования триггеров гамма-телескопа ГАММА-400. Зависимость от положения оси пучка позитронов с энергией 300 МэВ по отношению к центру сцинтилляционной полосы прототипа: а – среднего числа зарегистрированных с одного торца детектора прототипа фотоэлектронов $\langle N_{\text{phe}} \rangle$; б – собственного временного разрешения детектора прототипа σ_r . Статистика в каждой точке $\sim 10^4$ падающих позитронов.

Отклик детектора С3 также включается в триггер для улучшения разделения адронных и электромагнитных каскадов, основываясь на анализе распределения энерговыделения в полосах С3. Сигнал детектора утечки свидетельствует о том, что энергия регистрируемой частицы не выделилась полностью в калориметре КК2 и для оценки возможности ее восстановления необходим дополнительный анализ пространственного профиля каскада на уровне LVL2. Триггер LVL1 инициирует процесс сбора информации с систем гамма-телескопа и ее запоминание в буферной памяти. Триггер LVL2 подавляет ложные быстрые триггеры на основании предварительного анали-

за трековой информации в конвертере-трекере (К), а также пространственного распределения энерговыделения в калориметре (КК), при этом принимается окончательное решение о передаче информации о событии на наземный сегмент научного комплекса через систему сбора научной информации ССНИ [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ НА ПУЧКЕ ПОЗИТРОНОВ

Измерения проводились на пучке вторичных позитронов синхротрона “ПАХРА” с энергией 100–300 МэВ. Прототип представлял собой полосу сцинтиллятора ВС-408 размером $1280 \times 100 \times 10$ мм, обернутую диффузным светоотражателем, просматриваемую с противоположных коротких граней двумя модулями фотоприемников, включающих четыре SiPM SensL MicroFC-60035-SMTи узел фронтальной электроники каждый. Прототип был установлен на дистанционно-управляемую платформу, позволяющую перемещать детектор в диапазоне ± 40 см по отношению к оси пучка. Результаты измерений с прототипом системы представлены на рис. 2. Для выделения частиц, падающих на телескоп из верхней полусферы на уровне 99% на времяпролетной базе 50 см, необходимо собственное временное разрешение детекторов ВПС не хуже ~ 500 пс, что, как видно из рисунка, выполняется для длины сцинтилляционной полосы ≤ 100 см (длина полос ВПС телескопа). Для улучшения временного разрешения и эффективности выделения до ~ 300 пс и 99.99% соответственно, проведена доработка модуля фотоприемников, в каждый из которых установлено восемь SiPM SensL MicroFJ-60035-TSV, обладающих лучшими шумовыми характеристиками и эффективностью регистрации фотонов. Тестирование доработанной версии прототипа на пучке позитронов планируется провести до конца текущего года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Топчиев Н.П., Гальпер А.М., Бонвичини В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 454; *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. 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. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 675. № 3. Art. no. 032013.
5. *Arkhangelskaja I.V., Arkhangelskiy A.I., Chasovikov E.N. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 675. № 3. Art. no. 032015.
6. *Хеймиц М.Д., Гальпер А.М., Архангельская И.В. и др.* // ПТЭ. 2016. № 4. С. 27; *Kheyimits M.D., Galper A.M., Arkhangelskaja I.V. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2016. V. 59. № 4. P. 508.