

УДК 520.6.05

СИСТЕМА ОТБОРА СОБЫТИЙ ГАММА-ТЕЛЕСКОПА ГАММА-400

© 2021 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, А. А. Леонов^{1,2}, Н. Ю. Паппе¹, М. Ф. Рунцо², Ю. И. Стожков¹, С. И. Сучков¹, Н. П. Топчиев¹, М. Д. Хеймиц², 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

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

*E-mail: AIArkhangelskij@mephi.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

После доработки 12.03.2021 г.

Принята к публикации 28.04.2021 г.

Комплекс научной аппаратуры с высоким угловым и энергетическим разрешением ГАММА-400 разрабатывается в соответствии с Федеральными космическими программами России на 2009–2015 и 2016–2025 годы и предназначен для получения данных для определения природы “темной материи” во Вселенной, развития теории процессов в активных астрофизических объектах, происхождения высокоэнергичных космических лучей и физики элементарных частиц. Приведены особенности реализации, основные технические характеристики, а также текущее состояние разработки системы отбора событий гамма-телескопа комплекса.

DOI: 10.31857/S0367676521080032

Гамма-телескоп ГАММА-400 [1–5] предназначен для прецизионного измерения космического гамма-излучения в диапазоне энергий от десятков МэВ до сотен ГэВ, регистрации гамма-излучения от активных астрофизических объектов различной природы, проведения детальных обзоров и картографирования галактической плоскости и центра Галактики с высоким энергетическим и угловым разрешением. Планируемый срок активного существования комплекса не менее 7 лет. Вес и потребляемая мощность гамма-телескопа составляют ~2000 кг и ~1500 Вт соответственно. Важной составной частью гамма-телескопа является система отбора событий, обеспечивающая регистрацию с высокой вероятностью высокоэнергичного гамма-излучения в условиях значительного превышения уровня фона над полезным сигналом. Для орбиты ГАММА-400 (среднее расстояние от Земли ~120 000 км), поток фоновых частиц, главным образом протонов, электронов и позитронов [6, 7], превышает поток “полезных” событий на три-четыре порядка.

Обсуждаемая система отбора содержит ряд особенностей, выгодно отличающих ее от аналогов, реализованных в космических комплексах последних десятилетий, регистрирующих высокоэнергичное гамма-излучение, таких как AGILE

[7], Fermi-LAT [8], DAMPE [9], CALET [10] и AMS-02 [11]. Во-первых, использование в качестве фотоприемников сцинтилляционных детекторов гамма-телескопа современных кремниевых фотоумножителей (OnSemi MicroFC-60035-SMT и аналогичных), параметры которых позволяют получить высокий уровень метрологических характеристик и надежности аппаратуры, при значительном снижении ее веса, энергопотребления и размеров, по сравнению с системами, выполненными на основе вакуумных фотоумножителей. Во-вторых, применение в качестве регистрирующих элементов конвертера-трекера телескопа сцинтилляционно-волоконных детекторов SciFi [12–14] диаметром 250 мкм со съемом информации с помощью 128-канальных кремниевых фотоумножителей Hamamatsu S13552–H2017. Трековые детекторы, выполненные с использованием SciFi, имеют высокие пространственное разрешение, эффективность регистрации заряженных частиц и радиационную стойкость, при существенно меньшей стоимости, чем используемые в аналогичных проектах кремниевые микрополосковые детекторы. В-третьих, применение для выработки быстрого триггера времяпролетной системы (ВПС), регистрирующей вторичные электроны и позитроны, возникающие при взаимодействии первичных гамма-квантов с веществом конвертера-трекера.

Ключевой особенностью является применение комплексной методики компенсации эффекта “обратного тока” (backsplash), вызванного воздействием на антисовпадательную систему АС телескопа низкоэнергичных вторичных электронов и позитронов, возникающих в результате взаимодействия гамма-квантов высоких (>5 ГэВ) энергий с веществом телескопа. При этом происходит ошибочная блокировка “полезных” событий, приводящая к снижению эффективности регистрации (рис. 1а). Для компенсации эффекта, помимо традиционных методов сегментирования детекторов, выполнения их многослойными, с отдельной регистрацией событий в каждом слое, используется метод временного анализа запаздывания сигнала “обратного тока” в АС по отношению к сигналу от времяпролетной системы [15] (рис. 1б). При этом сегменты соответствующих детекторов должны иметь собственное временное разрешение ~ 1 нс. В ходе экспериментальной отработки, для наибольшего из используемых в приборе сегментов (длина 1280 мм), было получено разрешение ~ 200 пс [16]. Кроме того, используется информация с других детектирующих систем гамма-телескопа, в частности, анализ энерговыделения в спектрометре предливневого калориметра (S3), имеющего ярко выраженную корреляцию с взаимодействием высокоэнергичных гамма-квантов с веществом телескопа (рис. 1в и 1г) [17]. В результате, на стадии быстрого аппаратного отбора, удается сохранить более 90% “полезных” событий. Примесь неидентифицированных на этой стадии заряженных частиц, большую часть которых можно исключить на финальном этапе бортового отбора и в процессе наземной обработки, не превышает 10%.

Физическая схема детектирующей части системы отбора событий гамма-телескопа ГАММА-400 приведена на рис. 2а и 2б. Электронная часть представляет собой многопоточную мультипроцессорную структуру, объединяющую блоки фронтальной электроники (БФЭ) [18] АС, ВПС и S3, а также процессорный блок, обеспечивающий прием импульсных сигналов с дискриминаторов фронтальной электроники и выработку на основании анализа временных параметров и комбинаций принятых импульсов, решения о прохождении через основную апертуру гамма-телескопа “полезного” события.

Триггер гамма-телескопа ГАММА-400 в основной апертуре вырабатывается на трехуровневой основе:

– быстрый триггер FT вырабатывается при пересечении заряженной частицей любых трех из четырех плоскостей ВПС в апертуре прибора, которая определяется, исходя из сравнения, в заданном временном окне длительностью ~ 200 нс, комбинации сработавших в ВПС сцинтилляционных полос с “разрешенными” шаблонами (масками). Набор масок определяется по результатам модели-

рования и калибровок гамма-телескопа и загружается при инициализации системы в регистры ПЛИС submodule МФБТ_1-МФБТ_4 модуля формирования быстрого триггера МФБТ (рис. 2в). При обнаружении совпадений, в submodule вырабатываются импульсные логические сигналы быстрых субтриггеров FT_x (x – индекс БФЭ), комбинация которых анализируется в модуле формирования “мастер”-триггера МФМТ. В результате генерируется сигнал FT, сигнализирующий о пролете заряженной частицы через апертуру гамма-телескопа. Частота сигнала FT составляет около 10 кГц;

– по сигналу FT производится анализ энерговыделения в детекторе S3, и при превышения порогового значения, определяемого по результатам расчетов и калибровок, вырабатывается сигнал, свидетельствующий о наличии кандидата на высокоэнергичное гамма-событие. Одновременно выполняется считывание в МФМТ содержимого буферов время-цифровых преобразователей МФБТ с временным разрешением ~ 20 пс, содержащих значения времен выработки быстрых субтриггеров FT_x детекторов АС и ВПС. По разности времен субтриггеров детекторов S1 и S2 оценивается направление движения частицы в апертуре прибора, а по разности времен субтриггеров ВПС и АС делается заключение о возможном присутствии в событии “обратного тока”. В итоге проведения анализа формируется триггер первого уровня LVL1. На данном уровне отбора частота триггерного сигнала LVL1 составляет ~ 100 Гц;

– сигнал LVL1 выдается на системы гамма-телескопа и инициирует в них сбор и передачу данных в соответствующие процессорные блоки для финального этапа бортового отбора. При этом проводится экспресс-анализ информации с конвертера-трекера К и координатно-чувствительного калориметра КК, а также более детальный, по сравнению с уровнем LVL1, анализ данных АС и ВПС. В результате вырабатывается триггер второго уровня LVL2, который разрешает вывод информации о событии в систему сбора и хранения научной информации ССНИ [19] для передачи на наземный сегмент комплекса. Темп выдачи сигнала LVL2 составляет несколько десятков Гц.

Для обеспечения высокого уровня надежности, в системе отбора событий реализовано дублирование с перекрестным резервированием модулей, а также используется радиационно-стойкая электронная компонентная база, преимущественно отечественного производства. В качестве базовых процессоров для основных систем телескопа выбраны 32-разрядные 100 МГц микропроцессоры 1907ВМ056 с интегрированным восьмиканальным коммутатором SPACEWARE разработки ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, а для блоков фронтальной электроники – 32-разрядные 100 МГц микроконтроллеры 1806ВЕ8Т с ядром ARM Cortex-M4F разработки АО “ПКК Миландр”. Быстрая

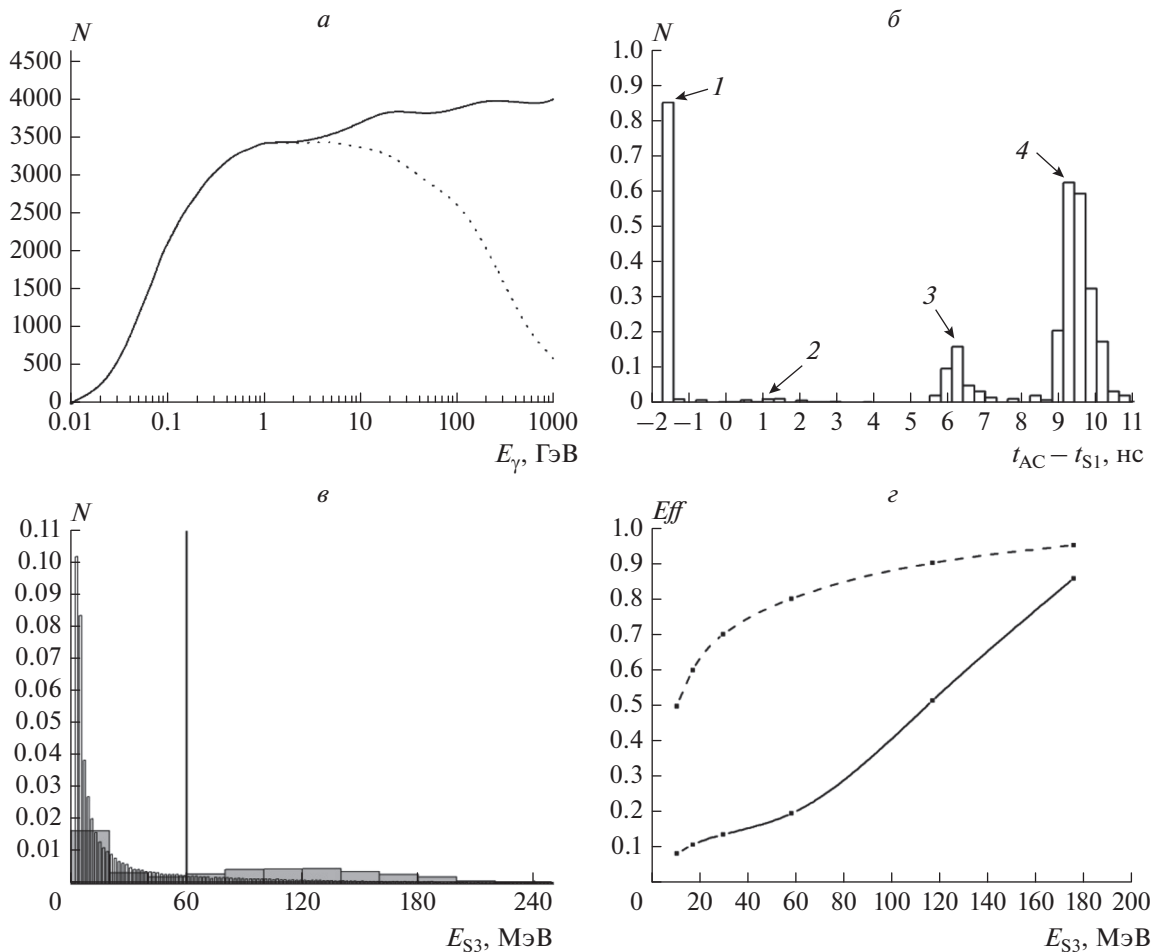


Рис. 1. Результаты расчетов, иллюстрирующие методику компенсации “обратного тока”: *a* – зависимость от энергии эффективной площади гамма-телескопа для вертикального потока гамма-излучения. Пунктирная линия соответствует регистрации событий без компенсации эффекта “обратного тока”, триггером является сигнал ВПС при условии отсутствия сигнала АС с порогом срабатывания 0.3 МІР (МІР – среднее энерговыделение минимально ионизирующих частиц). Резкий спад эффективности при энергии более 10 ГэВ вызван эффектом “обратного тока”. Сплошной линией показана расчетная оценка применения описанной методики; *б* – нормированное распределение числа событий по величине временных интервалов между моментами появления сигналов в детекторах АСтор и S1 при регистрации вертикального потока гамма-квантов с энергией 100 ГэВ. Цифрами обозначены временные интервалы, соответствующие: 1 – конверсии первичных гамма-квантов в АС, 2–4 – “обратному току” от конвертера-трекера К, предливневого калориметра КК1, и позиционно-чувствительного калориметра КК2 соответственно. Исключение из аппаратного отбора блокирующих сигналов АС в течение ~10 нс после срабатывания S1 позволяет подавить влияние большей части частиц “обратного тока”; *в* – нормированные распределения энерговыделения в детекторе S3 для вертикальных потоков гамма-квантов с энергией 10 ГэВ и протонов с энергией более 10 ГэВ и показателем спектра 2.7 (гистограммы с крупным и мелким шагом соответственно). Вертикальная линия – расчетный порог 60 МэВ, соответствующий регистрации ~80% гамма-квантов с “обратным током” при одновременной блокировке ~80% протонов космических лучей; *г* – зависимость эффективности блокировки протонов и гамма-квантов от энерговыделения в S3 (пунктирная и сплошная кривые соответственно), для событий, распределения по энерговыделению которых представлены на рис. 1в. Точки на графиках соединены сплайнами.

логика и многопоточные аппаратные вычисления реализуются в ПЛИС 5578ТС034 и 5576ХС6Т разработки АО “ВЗПП-С”. Для измерения энерговыделения в детекторах используются 16-канальные ASIC IDE3380 SIPHRA разработки IDEAS (Норвегия). Информационная сеть телескопа построена на основе интерфейса SPACEWARE. Для управления фронтальной электроникой применена дублированная шина CAN. Модули процес-

сорного блока системы отбора событий типоразмера 6U размещаются в ударопрочном крейте, выполненном в стандарте VPX. Масса процессорного блока составляет ~40 кг, энергопотребление не более 80 Вт. Полное энергопотребление системы отбора событий не превышает 400 Вт.

В 2020 г. была завершена работа над дополнением к эскизному проекту на разработку комплекса научной аппаратуры космического проек-

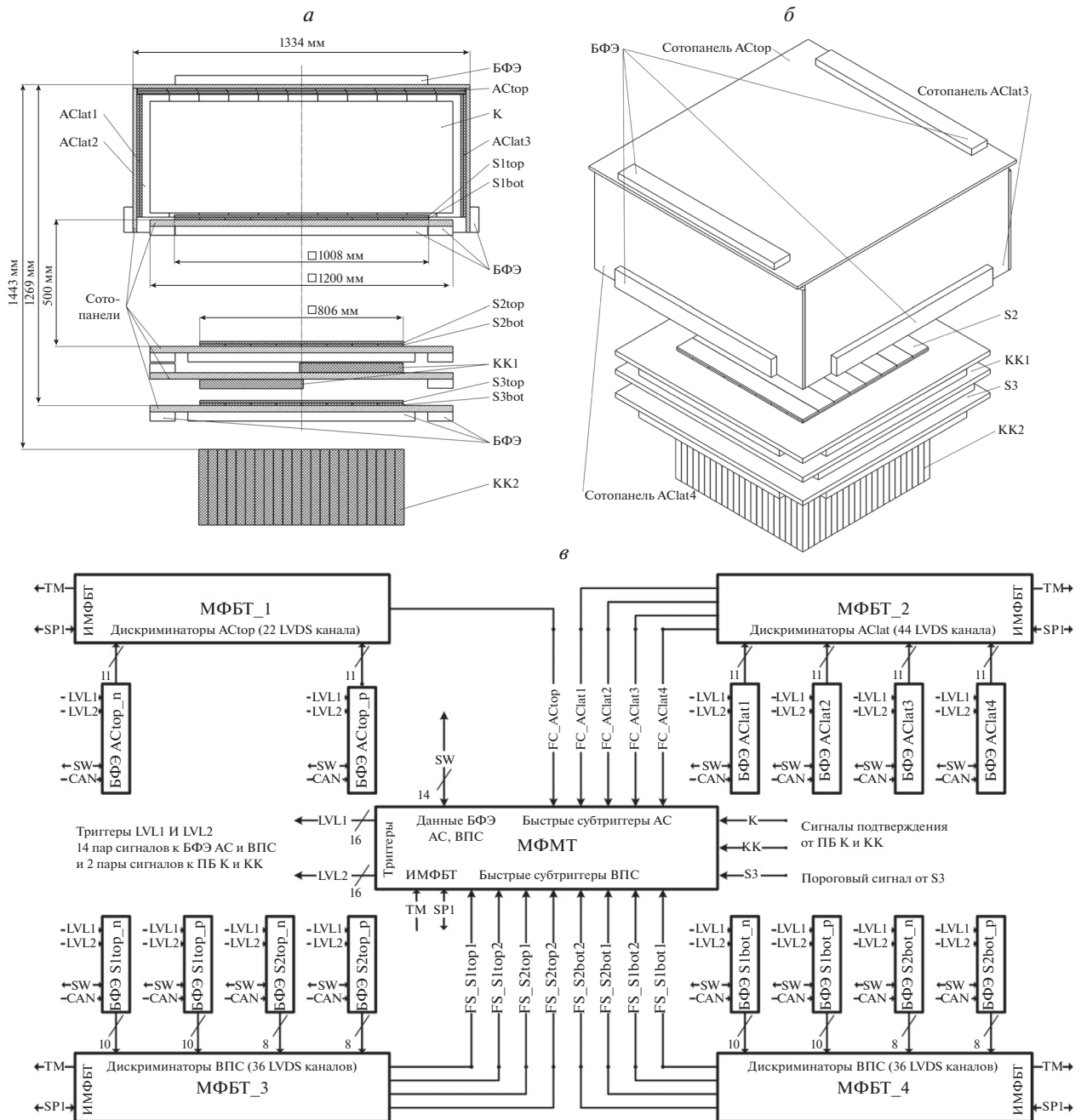


Рис. 2. Схемы системы отбора событий гамма-телескопа: *а, б* – физическая схема гамма-телескопа (показаны узлы имеющие отношение к бортовому отбору событий): ACtop и AClat1-AClat4 – двухслойные верхний и боковые антисовпадающие детекторы на основе полос сцинтиллятора BC-408 толщиной 10 мм, окружающие координатно-чувствительный конвертер-трекер К, состоящий из 13 пар координатных (x, y) SciFi плоскостей с пространственным разрешением ~50 мкм и 11 слоев вольфрамовых конвертеров суммарной толщиной ~1 р.е.д. (р.е.д. – радиационная единица длины); ВПС – времяпролетная система, состоящая из четырех, ориентированных взаимно ортогонально плоскостей, состоящих из набора полос сцинтиллятора BC-408 толщиной 10 мм и шириной 100 мм, объединенных попарно в детекторы S1 (S1top и S1bot) и S2 (S2top и S2bot), разнесенных на расстояние 500 мм; S3 (S3top и S3bot) – двухслойный сцинтилляционный спектрометр (на основе полос BC-408) предлинневого калориметра KK1, представляющего собой сборку из 32 кристаллов CsI(Tl) толщиной ~2 р.е.д., расположенную непосредственно над S3; KK2 координатно-чувствительный калориметр толщиной ~15 р.е.д. представляющего собой сборку из 440 кристаллов CsI(Tl), размещенных вдоль оси телескопа; детекторы AC, ВПС и S3 выполнены из конструктивно и схемотехнически унифицированных модулей, размещенных на углепластиковых сотопанелях, и различаются размерами, количеством и ориентацией сцинтилляционных полос, а также количеством кремниевых фотоумножителей в фотоприемниках; BFЭ – блоки фронтальной электроники; *в* – функциональная схема взаимодействия процессорного блока с детектирующими системами гамма-телескопа: постфиксы _n и _р обозначают сигналы с блоков фронтальной электроники расположенных с противоположных торцов детекторов ACtop, ВПС и S3, для детекторов AClat съем сигналов осуществляется только с одного торца; SW – интерфейс SPACEWIRE; ИМФБТ – интерфейс модуля формирования быстрого триггера МФБТ, объединяющий информационные шины SPI и телеметрические сигналы TM; ПБ К и КК – процессорные блоки К и КК соответственно.

та ГАММА-400. На данном этапе были, в том числе, проработаны и обоснованы принципиальные решения по созданию системы отбора событий гамма-телескопа проекта, дающие представление о принципах ее работы и позволяющие обеспечить выполнение требований технического задания и общих технических требований. Разработан и изготовлен макет системы, проведены его испытания, подтвердившие правильность принятых технических решений и возможность получения требуемых технических характеристик.

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ, договор № 02.a03.21.0005 от 27.08.2013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://gamma400.lebedev.ru>.
2. Гальпер А.М., Адриани О., Антекар Р.Л. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. № 77. № 11. С. 1605; Galper A.M., Adriani O., Aptekar R.L. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 11. P. 1339.
3. 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. No. 3. P. 417.
4. Топчиев Н.П., Гальпер А.М., Архангельская И.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 688; Topchiev N.P., Galper A.M., Arkhangelskaja I.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 629.
5. Galper A.M., Topchiev N.P., Yurkin Yu.T. // Astron. Rep. 2018. V. 62. No. 3. P. 882.
6. Martucci M., Munini R., Boezio M. et al. // Astrophys. J. Lett. 2018. V. 845. Art. No. L2.
7. Giuliani A., Cocco V., Mereghetti S. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2006. V. 568. P. 692.
8. Moiseev A.A., Hartman R.C., Ormes J.F. et al. // Astropart. Phys. 2007. V. 27. P. 339.
9. Yuhong Yu, Zhiyu Sun, Hong Su et al. // Astropart. Phys. 2017. V. 94. P. 1.
10. Adriani O., Akaiki Y., Asaoka Y. et al. // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2014. V. 256–257. P. 225.
11. Basili A., Bindi V., Casadei V. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2013. V. 707. P. 99.
12. Bachlechner A., Beischer B., Greim R. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2012. V. 695. P. 91.
13. LHCb Collaboration. LHCb tracker upgrade technical design report. CERN-LHCC-2014-001. LHCb-TDR-15, 2016. 196 p.
14. LHCb Scintillating Fibre Tracker Collaboration. LHCb scintillating fibre tracker: test beam report 2015. CERN-LHCB-PUB-2015-025. LHCb-PUB-2015-025, 2015. 66 p.
15. Хеймиц М.Д., Гальпер А.М., Архангельская И.В. и др. // ПТЭ. 2016. Т. 59. № 4. С. 27; Kheymits M.D., Galper A.M., Arkhangelskaja I.V. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2016. V. 59. No. 4. P. 508.
16. Arkhangelskiy A.I., Galper A.M., Arkhangelskaja I.V. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 82. No. 6. P. 252.
17. Leonov A.A., Galper A.M., Topchiev N.P. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 83. No. 2. P. 855.
18. Архангельский А.И., Гальпер А.М., Архангельская И.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 684; Arkhangelskiy A.I., Galper A.M., Arkhangelskaja I.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 625.
19. Bobkov S.G., Serdin O.V., Gorbunov M.S. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. Art. No. 012009.

Event selection system of the GAMMA-400 gamma-ray telescope

A. I. Arkhangelskiy^{a, b, *}, A. M. Galper^{a, b}, I. V. Arkhangelskaja^b, A. V. Bakaldin^{a, c}, Yu. V. Gusakov^a, O. D. Dalkarov^a, A. E. Egorov^a, A. A. Leonov^{a, b}, N. Yu. Pappé^a, M. F. Runtso^b, Yu. I. Stozhkov^a, S. I. Suchkov^a, N. P. Topchiev^a, M. D. Kheymits^b, I. V. Chernysheva^{a, b}, Yu. T. Yurkin^b

^aLebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

^bNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

^cScientific Research Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117218 Russia

*e-mail: AIArkhangelskij@mephi.ru

The high-precision scientific complex GAMMA-400 is developed according to the Russian Federal Space Programs for 2009–2015 and 2016–2025 and is intended for investigations in the field of the determination of the nature of “dark matter” in the Universe, the theory of the processes in the active astrophysical objects, particle physics and cosmic ray origin. The main technical characteristics, realization features and current development status of the event selection system of the GAMMA-400 gamma-ray telescope are presented.