

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ГАММА-ТЕЛЕСКОПОМ ГАММА-400

© 2017 г. А. М. Гальпер^{1),2)}, С. И. Сучков^{1)*}, Н. П. Топчиев¹⁾,
И. В. Архангельская²⁾, А. И. Архангельский²⁾, А. В. Бакалдин³⁾, Ю. В. Гусаков¹⁾,
О. Д. Далькаров¹⁾, А. Е. Егоров¹⁾, В. Г. Зверев¹⁾, В. В. Кадилин²⁾,
А. А. Леонов^{1),2)}, П. Ю. Наумов²⁾, М. Ф. Рунцо²⁾, М. Д. Хеймиц²⁾, Ю. Т. Юркин²⁾

Поступила в редакцию 22.03.2017 г.

Гамма-телескоп ГАММА-400, устанавливаемый на российской космической обсерватории, предназначен для прецизионных измерений в энергетическом диапазоне 20 МэВ–1000 ГэВ γ -излучения (с угловым и энергетическим разрешениями, в несколько раз лучшими, чем у существующих гамма-телескопов) от дискретных источников, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного γ -излучения, исследования γ -излучения активного Солнца, измерения потоков γ -излучения и электрон-позитронной компоненты космических лучей, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи.

DOI: 10.7868/S0044002717060095

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Федеральными космическими программами России на 2009–2015 гг. и 2016–2025 гг. в настоящее время продолжают работы по созданию гамма-телескопа ГАММА-400 (гамма-астрономическая многофункциональная модульная аппаратура) [1, 2].

ГАММА-400, устанавливаемый на российской космической обсерватории, предназначен для исследования γ -излучения в энергетическом диапазоне 20 МэВ–1000 ГэВ, получения данных, способствующих решению проблемы природы темной материи во Вселенной, и развития теории происхождения высокоэнергичных космических лучей.

ГАММА-400 позволит получить информацию:

об особенностях в энергетических спектрах высокоэнергичного γ -излучения от дискретных и протяженных источников и электрон-позитронной компоненты, которые могут быть связаны с частицами темной материи;

о переменности высокоэнергичного γ -излучения от дискретных источников с целью выяснения

природы ускорительных процессов элементарных частиц в этих источниках;

о диффузном галактическом и внегалактическом γ -излучении;

о высокоэнергичном γ -излучении, возникающем в солнечных вспышках.

Задачами эксперимента ГАММА-400 являются непрерывные длительные (до 100 сут) наблюдения высокоэнергичного γ -излучения от следующих областей: центра Галактики, пузырей Ферми, Крабовидной туманности, созвездий Вела, Геминга, Лебедя, а также Солнца и др. с уникальными угловым ($\sim 0.01^\circ$ при $E_\gamma > 100$ ГэВ) и энергетическим ($\sim 1\%$ при $E_\gamma > 100$ ГэВ) разрешениями, что значительно лучше, чем у гамма-телескопов Fermi-LAT [3] и AGILE [4], работающих в настоящее время на орбите, а также у работающих и проектируемых наземных гамма-телескопов VERITAS [5], MAGIC [6], H.E.S.S. [7], CTA [8].

ГАММА-ТЕЛЕСКОП ГАММА-400

ГАММА-400 представляет собой спутниковый гамма-телескоп, использующий для регистрации γ -излучения конверсию гамма-квантов в электрон-позитронные пары при прохождении гамма-кванта в конвертере. Конверсионные электрон и позитрон летят в направлении движения гамма-кванта и регистрируются детекторными системами. Основной режим ГАММА-400 — прецизионные измерения отдельных участков небесной

¹⁾Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

²⁾Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

³⁾Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва, Россия.

*E-mail: souch@mail.ru

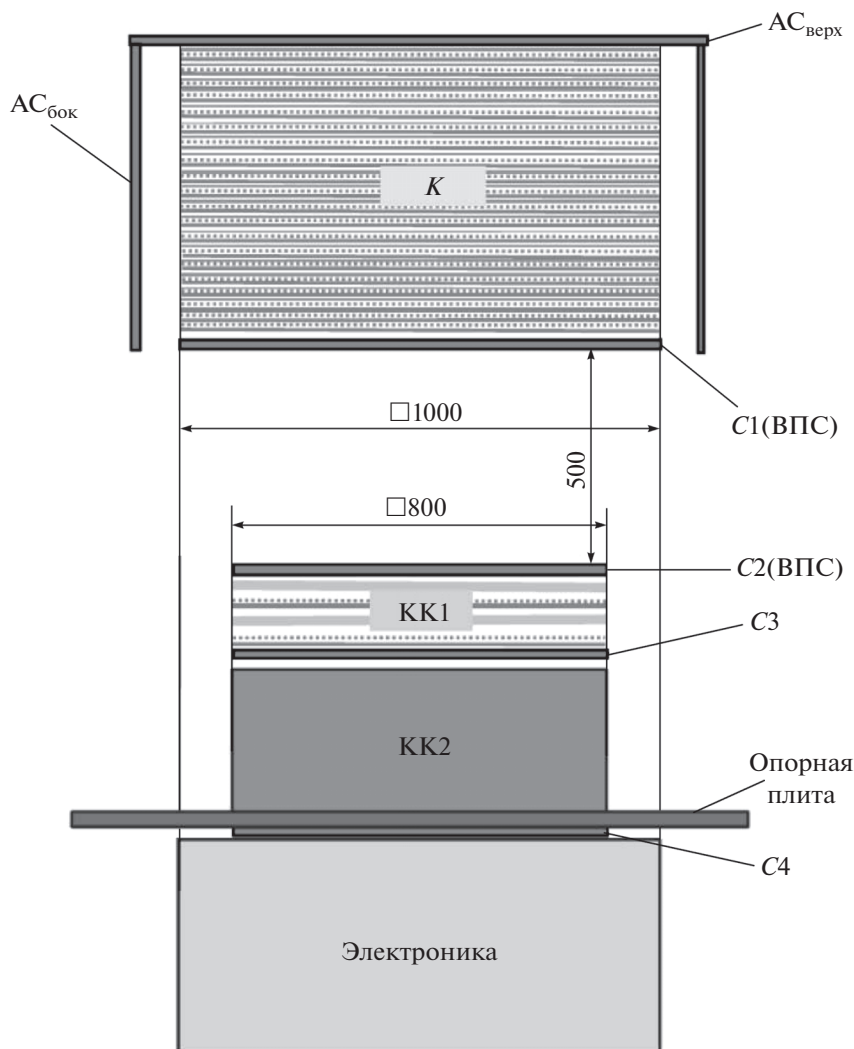


Рис. 1. Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400: АС — антисовпадательная система (верхний и боковые детекторы), *K* — конвертер-трекер, ВПС — времяпролетная система, КК1 и КК2 — части координатно-чувствительного калориметра, *C3*, *C4* — сцинтилляционные детекторы калориметра.

сферы, например, области центра Галактики с продолжительностью непрерывных наблюдений до 100 сут на высокоэллиптической орбите, при которой практически отсутствуют прохождения через радиационные пояса и затенение поля зрения гамма-телескопа Землей, с начальными параметрами: апогей 300 000 км, перигей 500 км и наклоном 51.4°.

Основные системы детекторов гамма-телескопа ГАММА-400: антисовпадательная система, конвертер-трекер, времяпролетная система, калориметр, сцинтилляционные детекторы калориметра (рис. 1). Для изготовления детекторов выбраны технологии, отработанные в космических экспериментах и физике высоких энергий.

Антисовпадательная система АС обеспечивает выделение космических гамма-квантов на фоне значительно превосходящего потока протонов и

электронов первичного космического излучения с эффективностью выделения гамма-квантов на фоне заряженных частиц лучше 0.999995. Детекторная система АС окружает конвертер с пяти сторон (верхний детектор АС_{верх} и четыре боковых детектора АС_{бок}).

Верхний детектор АС_{верх} представляет собой двухслойный детектор из пластического сцинтиллятора ВС-408. Верхний слой состоит из 10 полос, нижний слой состоит из 11 полос, параллельных верхнему слою, щели между полосами одного слоя сдвинуты относительно полос другого, что обеспечивает перекрытие щелей. Четыре боковых антисовпадательных детектора АС_{бок1}–АС_{бок4}, аналогичных по конструкции АС_{верх}, расположены перпендикулярно плоскости верхнего детектора АС_{верх} с четырех сторон конвертера-трекера. Применение

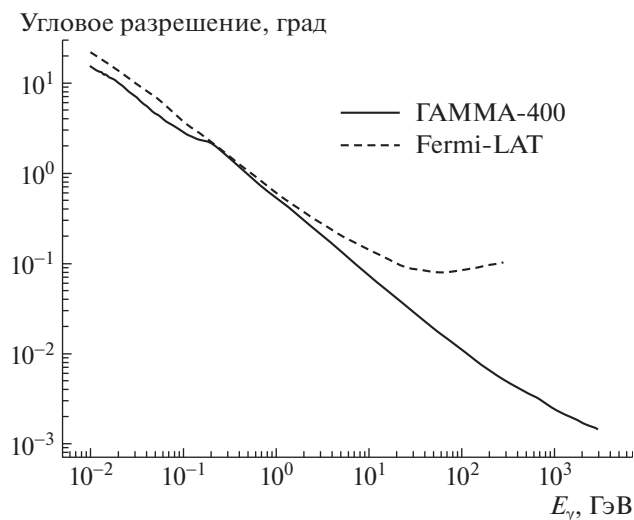


Рис. 2. Зависимость углового разрешения гамма-телескопа ГАММА-400 от энергии. Для сравнения приведена такая же зависимость для Fermi-LAT.

двухслойной конструкции с перекрытием щелей позволяет достигнуть величины выделения гамма-квантовых событий на фоне заряженных частиц 0.999995.

Конвертер-трекер *K* предназначен для:

преобразования гамма-квантов в электрон-позитронные пары и их регистрации;

определения направления прихода гамма-квантов с высокой точностью, позволяющей получить высокое угловое разрешение гамма-телескопа ГАММА-400.

Конвертер-трекер *K* состоит из 22 пар плоскостей кремниевых стриповых детекторов (*X* и *Y* координаты), расположенных на 23 сотопанелях, с шагом стрипов 80 мкм и аналоговым съемом информации, что значительно улучшает пространственную точность. На 20 верхних панелях расположены вольфрамовые конвертеры толщиной по 0.025 р.е.д. (радиационная единица длины). Полная толщина конвертера-трекера для вертикального падения частиц ~1 р.е.д.

Выбранная конструкция конвертера-трекера (и гамма-телескопа в целом) дает значительное улучшение углового разрешения по сравнению с Fermi-LAT практически во всем диапазоне энергий от ~20 МэВ до ~1000 ГэВ, особенно начиная с 10 ГэВ, и составляет ~0.01° при энергии 100 ГэВ (рис. 2). Это достигается за счет:

улучшения пространственного разрешения кремниевых стриповых детекторов (использование стриповых детекторов с шагом 80 мкм по сравнению с 225 мкм у Fermi-LAT и аналоговым съемом информации по сравнению с бинарным у Fermi-LAT);

использования большой пролетной базы от стриповых детекторов конвертера до стриповых детекторов калориметра;

значительного снижения уровня фона от обратного тока вследствие большого расстояния от конвертера до калориметра ~100 см (у Fermi-LAT ~10 см);

дополнительного применения быстрого триггера, обеспечивающего снижение фона от космического излучения, ~50 нс (у Fermi-LAT ~1.5 мкс).

Времяпролетная система ВПС предназначена для выделения событий, вызванных конвертированными гамма-квантами, летящими в апертуре прибора от верхнего детектора *C1* к нижнему *C2*, от фоновых событий, вызванных гамма-квантами и частицами, летящими в противоположном направлении.

ВПС состоит из верхнего *C1* и нижнего *C2* сцинтилляционных детекторов. Каждый детектор состоит из двух слоев пластического сцинтиллятора BC-408.

Координатно-чувствительный калориметр предназначен для измерения энергии γ -излучения. Он состоит из двух частей: позиционно-чувствительный калориметр КК1 и электромагнитный калориметр КК2.

КК1 предназначен для:

определения пространственного положения оси электромагнитного ливня от регистрируемых гамма-квантов;

измерения выделившейся в нем энергии электромагнитного ливня от регистрируемых гамма-квантов.

КК1 состоит из двух групп. Каждая группа состоит из двух детекторов: сцинтилляционный детектор из кристаллов CsI(Tl), перекрывающих чувствительную площадь, и двухслойный (*X, Y*) кремниевый стриповый детектор с шагом стрипов 80 мкм и аналоговым съемом информации. Толщина КК1 составляет ~2 р.е.д. Применение КК1 позволяет с высокой точностью определить положения оси электромагнитного ливня.

КК2 предназначен для:

измерения выделившейся энергии электромагнитного ливня от регистрируемых гамма-квантов с высоким энергетическим разрешением;

определения профиля ливня и режекции протонов.

КК2 состоит из сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl). Толщина КК2 для нормального падения частиц составляет ~20 р.е.д.

Калориметр (КК1 и КК2) с полной толщиной для нормального падения частиц ~22 р.е.д. (в то время как у Fermi-LAT ~8.5 р.е.д.) позволит получить энергетическое разрешение значительно

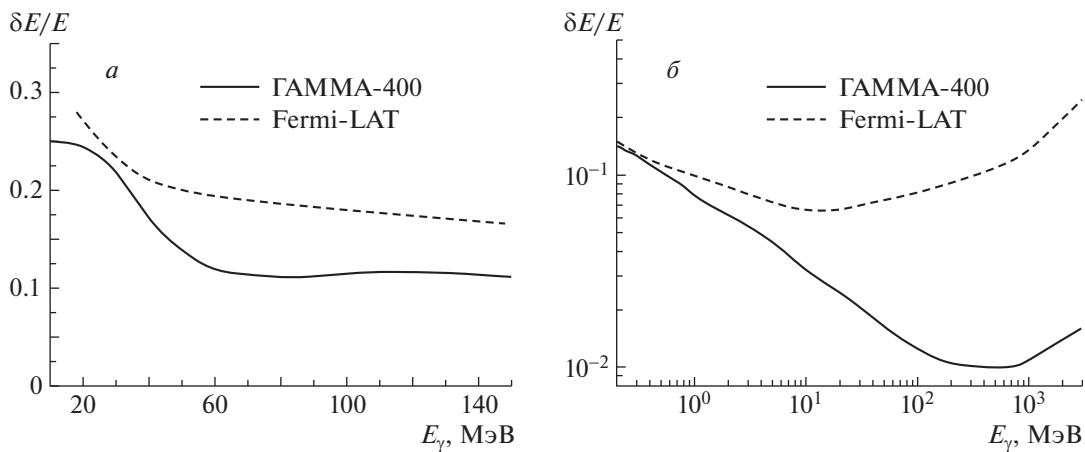


Рис. 3. Зависимость энергетического разрешения гамма-телескопа ГАММА-400 от энергии гамма-квантов в диапазонах 20–140 МэВ (а) и 0,2–1000 ГэВ (б). Для сравнения приведены такие же зависимости для Fermi-LAT.

лучше, чем у Fermi-LAT, начиная с энергии 10 ГэВ, $\sim 1\%$ для энергии 100 ГэВ (рис. 3).

Сцинтилляционные детекторы калориметра СДК, состоящие из пластиковых сцинтилляционных детекторов С3 и С4, предназначены для:

- определения энерговыделения от регистрируемых частиц и выработки сигналов для формирования триггера;

- выделения одночастичных событий для проведения калибровки;

- определения с помощью детектора С4 “утечки” частиц электромагнитного ливня, выходящих из калориметра.

Конструкция детекторов СДК аналогична конструкции детекторов ВПС.

При регистрации гамма-квантов с энергией более нескольких десятков ГэВ возникает “обратный ток” (ОТ) — поток частиц (в основном это гамма-кванты с энергией ~ 1 МэВ), образовавшихся при развитии электромагнитного ливня в калориметре и двигающихся в обратном направлении к антисовпадательному детектору. ОТ вызывает ложные срабатывания системы АС, создающие имитацию прохождения заряженных частиц, а также мнимые сигналы в стриповых детекторах конвертера-трекера. ОТ может существенно снизить эффективность гамма-телескопа при регистрации гамма-квантов с энергией выше десятков ГэВ.

Следующие конструктивные особенности, применяемые в ГАММА-400, значительно снижают влияние ОТ на регистрацию высокоэнергетического γ -излучения:

- сегментирование (включая двухслойную структуру) детекторов АС, уменьшающее вероятность срабатывания сегментов АС от частиц ОТ;

- использование КК1, существенно уменьшающего ОТ, образовавшийся в КК2;

- увеличенное расстояние от КК2 до конвертера-трекера — 100 см.

Расчеты показали, что при выбранной конструкции гамма-телескопа даже для гамма-квантов с энергией 1000 ГэВ число событий с ОТ, которые могут интерпретироваться как заряженные частицы и исключаться из регистрации, составляет не более нескольких процентов.

Кроме того, для уменьшения ОТ применяется временной метод, основанный на измерении времени пролета частиц между детекторами данных систем. Возникающий в АС сигнал ОТ появляется позднее от запускающего начало регистрации события в С1 ВПС, что позволяет выделять события с ОТ [9].

Триггером для регистрации гамма-квантов ГАММА-400 являются:

- срабатывание С1 ВПС ранее С2;
- отсутствие сигнала АС.

Задержка между запуском триггера и считыванием информации с детекторов составляет ~ 50 нс.

Использование более быстрого триггера позволяет в ГАММА-400 существенно уменьшить влияние фона от космического излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уникальные характеристики ГАММА-400 (угловое разрешение $\sim 0.01^\circ$ при $E_\gamma > 100$ ГэВ и энергетическое разрешение $\sim 1\%$ при $E_\gamma > 100$ ГэВ) при непрерывном длительном (до 100 сут) наблюдении отдельных областей небесной сферы, центра Галактики и др. позволят значительно продвинуться в проведении прецизионного исследования дискретных источников γ -излучения, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного γ -излучения, измерения потоков

γ -излучения и электрон-позитронной компоненты космических лучей, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи. Запуск космической обсерватории с гамма-телескопом ГАММА-400 планируется на 2025–2026 гг.

Работа выполняется при поддержке Совета РАН по космосу и Роскосмоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. M. Galper, O. Adriani, R. L. Aptekar, I. V. Arkhangel'skaja, A. I. Arkhangel'skiy, M. Boezio, V. Bonvicini, K. A. Boyarchuk, Yu. V. Gusakov, M. O. Farber, M. I. Fradkin, V. A. Kachanov, V. A. Kaplin, M. D. Kheymits, A. A. Leonov, F. Longo, *et al.*, *Adv. Space Res.* **51**, 297 (2013).
2. N. P. Topchiev, A. M. Galper, V. Bonvicini, O. Adriani, R. L. Aptekar, I. V. Arkhangel'skaja, A. I. Arkhangel'skiy, A. V. Bakaldin, L. Bergstrom, E. Berti, G. Bigongiari, S. G. Bobkov, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **675**, 032009 (2016).
3. W. B. Atwood, A. A. Abdo, M. Ackermann, W. Althouse, B. Anderson, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, D. L. Band, G. Barbiellini, J. Bartelt, D. Bastieri, B. M. Baughman, K. Bechtol, D. Bédérède, F. Bellardi, *et al.*, *Astrophys. J.* **697**, 1071 (2009).
4. M. Tavani, G. Barbiellini, A. Argan, F. Boffelli, A. Bulgarelli, P. Caraveo, P. W. Cattaneo, A. W. Chen, V. Cocco, E. Costa, F. D'Ammando, E. Del Monte, G. De Paris, G. Di Cocco, G. Di Persio, I. Donnarumma, *et al.*, arXiv: 0807.4254.
5. R. E. Ong (for the VERITAS Collab.), *Adv. Space Res.* **53**, 1483 (2014).
6. D. Mazin, D. Tesaro, M. Garzarczyk, G. Giavitto, and J. Sitarek (for the MAGIC Collab.), arXiv: 1410.5073.
7. A. Balzer, M. Fülling, M. Gajdus, D. Göring, A. Lopatin, M. de Naurois, S. Schlenker, U. Schwanke, and C. Stegmannar, arXiv: 1311.3486.
8. M. Actis, G. Agnetta, F. Aharonian, A. Akhperjanian, J. Aleksić, E. Aliu, D. Allan, I. Allekotte, F. Antico, L. A. Antonelli, P. Antoranz, A. Aravantinos, T. Arlen, H. Araldi, S. Artmann, K. Asano, *et al.*, *Exp. Astron.* **32**, 193 (2011).
9. М. Д. Хеймиц, А. М. Гальпер, И. В. Архангельская, А. И. Архангельский, Ю. В. Гусаков, В. Г. Зверев, В. В. Кадилин, В. А. Каплин, А. А. Леонов, П. Ю. Наумов, М. Ф. Рунцо, С. И. Сучков, Н. П. Топчиев, Ю. Т. Юркин, ПТЭ, № 4, 27 (2016) [*Instrum. Exp. Techn.* **59**, 508 (2016)].

PRECISION MEASUREMENT OF COSMIC HIGH-ENERGY GAMMA-RAY EMISSION WITH THE GAMMA-400 GAMMA-RAY TELESCOPE

A. M. Galper, S. I. Suchkov, N. P. Topchiev, I. V. Arkhangel'skaja, A. I. Arkhangel'skiy, A. V. Bakaldin, O. D. Dalkarov, A. E. Egorov, Yu. V. Gusakov, V. V. Kadilin, M. D. Kheymits, A. A. Leonov, P. Yu. Naumov, M. F. Runtso, Yu. T. Yurkin, V. G. Zverev

The GAMMA-400 space-based gamma-ray telescope installed on the Russian space observatory is intended for precision measurements in the energy range of 20 MeV–1000 GeV of the gamma-ray emission (the GAMMA-400 angular and energy resolutions are several times better than for current gamma-ray telescopes) of discrete sources, investigation of gamma-ray emission of the active Sun, measuring the energy spectra of Galactic and extragalactic diffuse gamma-ray emission, measuring fluxes of gamma-ray emission and electron–positron component of cosmic rays, which can be associated with the annihilation or decay of dark matter particles.