

КОМПЛЕКС ПРИБОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ НА СПУТНИКЕ «ЛОМОНОСОВ»

М. И. Панасюк^{1,2}, *В. М. Липунов*^{1,3}, *Ил Пак*⁴,
С. И. Свертилов^{1,2,*}, *В. В. Богомолов*^{1,2}, *Е. С. Горбовской*³,
*А. М. Амелюшкин*¹, *А. В. Богомолов*¹, *А. Ф. Июдин*¹,
Е. А. Кузнецова^{1,2}, *В. Л. Петров*¹, *Г. В. Рожков*¹, *И. В. Яшин*¹

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

³ Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

⁴ Университет Сонгюнган, Сеул, Республика Корея

В состав научной аппаратуры спутника «Ломоносов» входит комплекс приборов, предназначенных для исследования гамма-излучения и оптического излучения космических гамма-всплесков. Гамма-спектрометр БДРГ обеспечивает выработку триггера гамма-всплеска и исследование его свойств в диапазоне значений энергии 10–3000 кэВ, а также определение координат источника путем сравнения показаний трех разнонаправленных детекторов. Оптические камеры ШОК, имеющие поле зрения $\sim 20 \times 40^\circ$, фиксируют по триггеру гамма-всплеска набор изображений с частотой ~ 5 кадров/с, предшествующий триггеру и следующий за ним. Прибор UFFO имеет в своем составе телескоп с кодирующей маской UBAT для измерений в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах и оптический телескоп с поворачивающимся зеркалом SMT, наводящийся за время ~ 1 с для измерения оптического излучения гамма-всплесков на ранних стадиях.

The scientific instruments on board “Lomonosov” satellite include a set of detectors designed to study gamma-ray and optical emission of cosmic gamma-ray bursts (GRB). Gamma spectrometer BDRG provides GRB trigger production and study of GRB spectral and temporal properties in the energy range 10–3000 keV as well as determining of the GRB source location by comparison of the readings of three differently directed detectors with an accuracy of a few degrees. Wide-field SHOK optical cameras have a field of view

*E-mail: sis@coronas.ru

of $\sim 20 \times 40$ deg. They fix by the GRB trigger a set of images with a frequency of about 5 frames per second prior to the trigger and following it. UFFO instrument incorporates UBAT telescope with coding mask for measurements in hard X rays and soft gamma rays and optical telescope with a rotating mirror SMT, directed to the GRB source for ~ 1 s to measure GRB prompt emission at the early stages.

PACS: 96.40.Tf; 96.60.qe

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, 28 апреля 2016 г. с космодрома «Восточный» был успешно осуществлен запуск космического аппарата (КА) «Ломоносов» с научной аппаратурой, предназначенной для исследования космических лучей предельно высоких энергий, космических гамма-всплесков, транзиентных атмосферных явлений, процессов ускорения и выбросов магнитосферных электронов высоких энергий, радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве, а также ускорений в условиях микрогравитации [1]. В настоящей работе будет рассмотрен эксперимент по наблюдениям космических гамма-всплесков в различных диапазонах электромагнитного спектра.

Космические гамма-всплески (КГВ) — наиболее мощные явления во Вселенной (выделяющаяся мощность в источнике может достигать 10^{51} – 10^{53} эрг/с). Считается, что их источники находятся на очень далеких — космологических — расстояниях. Из-за необычно большой яркости КГВ изучение их свойств позволяет исследователям заглянуть в эпоху ранней Вселенной, т. е. изучать эволюцию звезд и звездных популяций в широком диапазоне красного смещения z — от $\sim 0,1$ до ~ 15 – 20 , т. е. более чем на 98 % возраста Вселенной. Несмотря на обилие теоретических моделей, природа этого необычного явления до сих пор полностью не изучена. Указанные обстоятельства делают исследования КГВ одной из самых актуальных задач современной астрофизики.

В эксперименте на спутнике «Ломоносов» впервые будет реализована возможность одновременных наблюдений в оптическом, УФ-, рентгеновском и гамма-диапазонах собственного (т. е. возникающего непосредственно в момент работы «центральной машины») излучения и предвестников КГВ, что является чрезвычайно важным для понимания природы данного явления. Для этого в состав комплекса аппаратуры для исследования КГВ включены три прибора: монитор гамма-всплесков БДРГ, оптические камеры широкого поля ШОК, а также прибор UFFO в составе рентгеновского и быстронаводящегося УФ-телескопов (UBAT и SMT соответственно). Ниже будут представлены характеристики этих приборов, а также первые результаты летных испытаний.

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ НА СПУТНИКЕ «ЛОМОНОСОВ»

Монитор гамма-всплесков БДРГ. Прибор БДРГ [2] состоит из трех идентичных блоков детектирования БДРГ-1, . . . , БДРГ-3 и блока электроники БА-БДРГ. Последний обеспечивает связь с основным блоком электроники БИ, в том числе подачу на блоки детектирования питания и управляющих команд, формирование выходных массивов данных и их трансляцию в БИ. Основные характеристики прибора БДРГ приведены в табл. 1.

Каждый блок детектирования включает детекторный узел, платы электроники и элементы механической конструкции. Детекторные узлы представляют собой фосвич из сцинтилляторов NaI(Tl)/CsI(Tl) диаметром 13 см и полной толщиной 2 см (при этом толщина кристалла NaI(Tl) 0,3 см, кристалла CsI(Tl) 1,7 см). Оба сцинтиллятора находятся в оптическом контакте и просматриваются со стороны CsI(Tl) одним фотоэлектронным умножителем (ФЭУ Hamamatsu R877). Подобная компоновка позволяет за счет разного времени высвечивания ($\sim 0,25$ мкс для кристалла NaI(Tl), ~ 2 мкс для кристалла CsI(Tl)) эффективно разделить события в обоих сцинтилляторах и тем самым, с одной стороны, существенно уменьшить регистрацию фоновых гамма-квантов в тонком кристалле NaI(Tl), а с другой — расширить энергетический диапазон благодаря использованию толстого кристалла CsI(Tl). Использование фосвича NaI(Tl)/CsI(Tl) также дает принципиальную возможность разделять события, связанные с регистрацией всплесков собственно гамма-излучения и высыпаний магнитосферных электронов.

Таблица 1

Параметр, единица измерения	Значение
Энергетический диапазон, МэВ	0,01–3,0
Эффективная площадь (для трех детекторов), см ²	~ 360
Временное разрешение, мс	1 (для всплескового режима)
Масса (один блок), кг	5,5
Информативность, Мбайт/сут	~ 300
Поле зрения, ср	2π
Телесный угол области локации всплесков	$\pi/2$
Чувствительность к регистрации всплеска, эрг/см ²	$\sim 10^{-7}$
Точность локации всплеска, °	$\sim 2-4$ (для ярких событий)
Ожидаемое количество регистрируемых всплесков в год	~ 100
Потребляемая мощность, Вт	2,5 (один блок)

Оси трех блоков детектирования разнесены в пространстве под углами 90° друг относительно друга, образуя как бы декартову систему координат. Это дает возможность по соотношению показаний отдельных детекторов определять направление на источник регистрируемого всплеска.

Прибор работает в двух режимах — мониторингом и всплесковым. В мониторинговом режиме осуществляется непрерывная запись средних за 0,1 с скоростей счета в энергетических интервалах для событий в каждом из кристаллов. Кроме того, с помощью многоканальных АЦП измеряются средние за 15 с энергетические спектры (также для обоих кристаллов). Во всплесковом режиме вырабатываются три типа триггера, различающиеся временем экспозиции, за которое накапливаются события для определения уровня превышения фона: 10 мс («быстрый»), 1 с («медленный»), 20 с («сверхмедленный»). По триггеру в районе момента его выработки осуществляется более подробная запись как скоростей счета (до 1 мс), так и средних энергетических спектров (вплоть до 1 с), при этом для каждого регистрируемого события (кванта или частицы) проводится измерение амплитуд энерговыделений в обоих кристаллах. Кроме того, триггерные сигналы поступают в блоки оптических камер широкого поля ШОК и на прибор UFFO. По триггерам БДРГ также формируются телеграммы, содержащие оперативную информацию о регистрируемом всплеске для передачи в мировую сеть регистрации КГВ GCN.

Оптические камеры широкого поля зрения ШОК. В состав аппаратуры космического аппарата «Ломоносов» входят два идентичных блока оптических камер широкого поля зрения ШОК-1 и ШОК-2. Оба блока соединены непосредственно с центральным блоком электроники БИ, через который осуществляется связь с бортовыми системами и другими приборами комплекса. Основные характеристики камер ШОК приведены в табл. 2. Это камеры того же типа, что используются в наземной сети роботов-телескопов МАСТЕР для поиска оптических транзиентов, в том числе и КГВ [3].

Каждая камера выполнена на основе объектива Nikkor и ПЗС-матрицы Kodak KAI-11002. Камеры обладают чувствительностью на уровне $9-10^m$ звездной величины. Каждая камера ориентирована таким образом, что ее поле зрения находится в пределах поля зрения одного из гамма-детекторов БДРГ. В блоках осуществляется непрерывная запись изображений с временным разрешением 0,2 с. В случае поступления триггера от блоков БДРГ или рентгеновского телескопа UBAT прибора UFFO осуществляется фиксация данных за 1 мин до и 2 мин после триггера. Благодаря соосности с гамма-детекторами БДРГ это дает возможность регистрировать КГВ одновременно обоими приборами и получать оптическое изображение как непосредственно в момент, так и до всплеска. При этом выбранные временные интервалы фиксации данных перекрывают типичные времена между предвестником и всплеском. Предусмотрена возможность фиксации изображений

Таблица 2

Параметр, единица измерения	Значение
Диапазон длин волн, нм	330–820
Диаметр линзы объектива/фокусное расстояние, мм	50 × 52
Временное разрешение, кадров за 1 с	5
Масса (один блок), кг	5,5
Информативность, Гбайт/сут	~ 850
Поле зрения, °	26,5 × 39,9
Чувствительность	9–10 ^m (0,2 с), 13 ^m (20 с)
Позиционное разрешение, количество пикселей	4008 × 2672
Потребляемая мощность, Вт	26 (один блок)

ШОК по триггеру с Земли, т.е. по всплескам, фиксируемым мировой сетью GCN. Камеры также могут осуществлять наблюдения в режиме поиска оптических транзиентов — по собственному триггеру. В этом случае осуществляется автоматическое сравнение каждого последующего изображения с предыдущим и в случае изменения яркости или появления нового объекта в поле зрения камеры изображение фиксируется. Этот режим может использоваться не только для наблюдений астрофизических явлений типа сверхновых, новых, но и для исследования космического мусора, метеоритной опасности и т. п.

Прибор UFFO. Прибор UFFO включает рентгеновский телескоп UBAT и быстро наводящийся оптический и УФ-телескоп SMT [4]. Телескоп UBAT основан на комбинации позиционно-чувствительного детектора (ПЧД) и кодирующей маски. ПЧД телескопа, так же как и кодирующая маска, имеет плоскую конфигурацию и состоит из 48×48 пикселей, выполненных из сцинтилляционных кристаллов YSO, просматриваемых мультианодными ФЭУ. Размер одного пикселя $2,8 \times 2,8$ мм, общая площадь ПЧД 191 см^2 . Поле зрения телескопа $70,4 \times 70,4^\circ$. Он позволяет регистрировать гамма-всплеск в жестком рентгеновском диапазоне (5–150 кэВ) и с высокой точностью ($\sim 10'$) определять координаты его источника, при этом время накопления данных для определения координат источника всплеска составляет 0,1 с. По триггеру UBAT обеспечивается быстрое наведение телескопа SMT, чувствительного в диапазоне длин волн 200–650 нм, в область локализации всплеска. В этом эксперименте должно быть достигнуто рекордное на сегодняшний день время наведения оптического телескопа — около 1 с. Для сравнения самая быстрая из работающих сегодня на орбите американская обсерватория SWIFT обеспечивает наведение оптического телескопа за ~ 30 с. Это также позволит записывать оптическую кривую блеска непосредственно во время самого гамма-всплеска с высоким временным разрешением.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

На рис. 1 представлены временные зависимости скоростей счета в каналах регистрации гамма-квантов одного из детекторных блоков прибора БДРГ. Видны типичные для низких орбит вариации фона гамма-излучения, обусловленные регистрацией тормозного излучения электронов высоких энергий при пересечении спутником зон захваченной радиации.

На рис. 2 приведены примеры изображений неба, полученных с помощью камеры ШОК. На этих изображениях видны звезды (светлые точки) и попа-

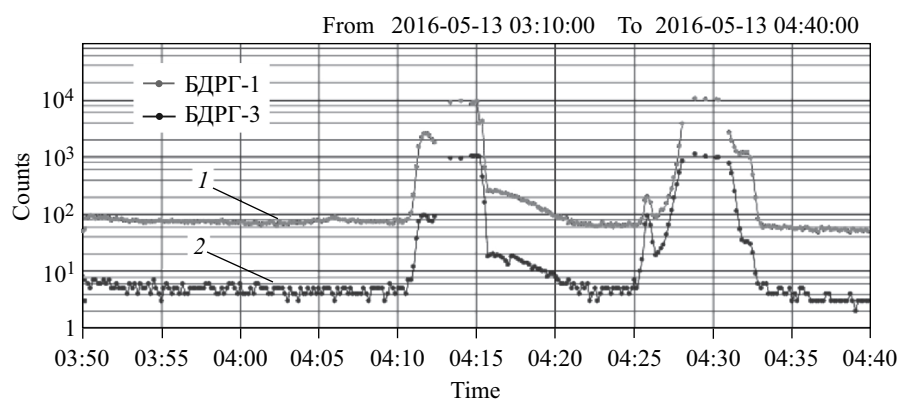


Рис. 1. Скорости счета прибора БДРГ (блок БДРГ-3) в каналах: 1 — NaI(Tl), энерговыделение 30–50 кэВ; 2 — NaI(Tl), энерговыделение 100–200 кэВ

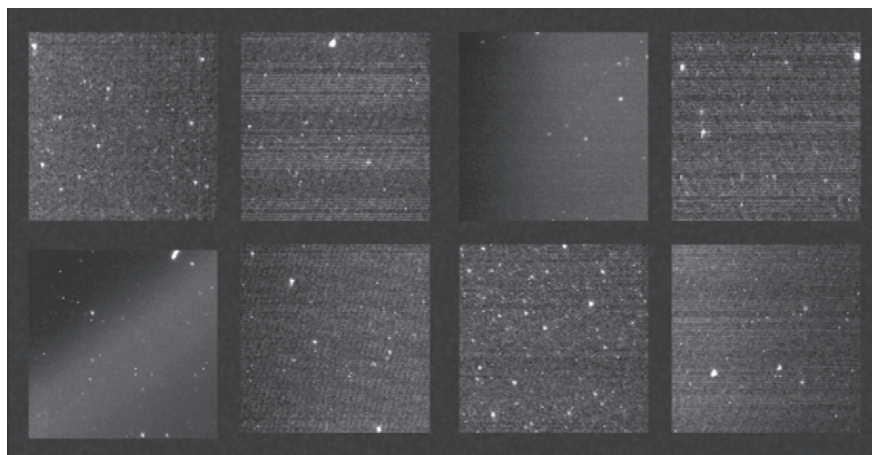


Рис. 2. Изображения неба, полученные с помощью камер широкого поля зрения ШОК

дающие в поле зрения движущиеся объекты искусственного происхождения (яркие штрихи).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что приборы, предназначенные для изучения гамма-всплесков, на борту спутника «Ломоносов» работают штатно.

Благодарности. Эксперименты на спутнике «Ломоносов» осуществляются в рамках программы «Перспективные направления развития» Московского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовничий В. А., Амелюшкин А. М., Ангелопулос В., Бенгин В. В., Богомолов В. В., Гарипов Г. К., Горбовской Е. С., Гроссан Б., Климов П. А., Хренов Б. А., Джик Ли, Липунов В. М., Джи Ву На, Панасюк М. И., Ил Пак, Петров В. Л., Рассел К., Свертилов С. И., Сигаева Е. А., Смут Дж. Ф., Шприц Ю., Веденькин Н. Н., Яшин И. В. Космические эксперименты на борту спутника МГУ «Ломоносов» // Косм. исслед. 2013. Т. 51, № 6. С. 470–477.
2. Амелюшкин А. М., Галкин В. И., Гончаров Б. В., Горбовской Е. С., Корнилов В. Г., Липунов В. М., Панасюк М. И., Петров В. Л., Смут Дж. Ф., Свертилов С. И., Веденькин Н. Н., Яшин И. В. Приборы БДРГ И ШОК для исследования собственного излучения гамма-всплесков на борту космического аппарата «Ломоносов» // Косм. исслед. 2013. Т. 51, № 6. С. 478–483.
3. Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskey E., Shatskiy N., Kuvshinov D., Tyurina N., Belinski A., Krylov A. et al. Master Robotic Net // Adv. Astron. doi:10.1155/2010/349171.
4. Nam J. W., Ahmad S., Ahn K. B., Barrillon P., Brandt S., Budtz-Jrgensen C., Castro-Tirado A. J., Chang C.-H., Chang C.-Y., Chang Y. Y., Chen C. R., Chen P., Cho M., Choi H. S., Choi Y. J., Connel P., Dagoret-Campagne S., Eyles C., Grossan B., Huang J. J., Huang M. H. A., Jeong S., Jung A., Kim J. E., Kim M. B., Kim S.-W., Kim Y. W., Krasnov A. S., Lee J., Lim H., Linder E. V., Liu T. C., Lund N., Min K. W., Na G. W., Panasyuk M. I., Park I. H., Reglero V., Ripa J., Rodrigo J. M., Smoot G. F., Suh J. E., Svertilov S., Vedenkin N., Wang M.-Z., Yashin I. The Status of the Ultra Fast Flash Observatory — Pathfinder // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2014. V. 246–247. P. 29–33.