

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА КОСМИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА ГРИС

Ю.А. Трофимов, Ю.Д. Котов, В.Н. Юров, Е.Э. Лупарь

SIMULATION OF GRIS SPACE SOLAR GAMMA-RAY SPECTROMETER RESPONSE

Yu.A. Trofimov, Yu.D. Kotov, V.N. Yurov, E.E. Lupar

Представлены результаты численного моделирования в пакете GEANT4 отклика солнечного гамма-спектрометра ГРИС на мощные солнечные вспышки различного спектрального состава, потоки протонов космических лучей и нейтроны атмосферного альбеда. Статистика от солнечных событий сопоставлена с фоновой загрузкой детекторов на различных участках орбиты, оценена эффективность применения полистирольных антисовпадательных защитных детекторов.

The results of GEANT4 simulation of solar gamma-rays spectrometer GRIS response to the large solar flares with different spectral composition, to the cosmic rays protons and to the atmospheric albedo neutrons are represented. Solar events statistic are compared with background count rates on different parts of orbit. Efficiency of polystyrene anticoincidence shielding detectors is estimated.

В настоящее время в Институте астрофизики НИЯУ МИФИ разрабатывается прибор ГРИС (гамма- и рентгеновское излучение Солнца), предназначенный для спектрометрии жесткого рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек в диапазоне 50 кэВ – 200 МэВ и солнечных нейтронов с энергией более 30 МэВ. Эксперимент планируется к проведению на борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) с 2016 г.

ГРИС включает в себя два детектора: спектрометрический канал низких энергий (СКН) на основе сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ $\varnothing 7.62 \times 7.62$ см и спектрометрический канал высоких энергий (СКВ) на основе сцинтилляционного кристалла $\text{CsI}(\text{Tl})$ размером $\varnothing 12 \times 15$ см. СКН предназначен для регистрации жесткого рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек в диапазоне 50 кэВ – 15 МэВ. Отличительной особенностью этого детектора является высокое энергетическое разрешение сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$: порядка 3 % на линии 662 кэВ. Детектор СКВ предназначен для регистрации гамма-излучения солнечных вспышек в диапазоне энергий 200 кэВ – 200 МэВ и солнечных нейтронов с энергией больше 30 МэВ. Кристалл $\text{CsI}(\text{Tl})$ обладает несколько худшим энергетическим разрешением, около 7 % на линии 662 кэВ, но, в силу технологических причин, может быть выращен до больших размеров, что важно с точки зрения регистрации гамма-излучения высокой энергии, и имеет на порядок меньшую цену по сравнению с $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. Еще одним достоинством $\text{CsI}(\text{Tl})$ является возможность дискриминации сортов частиц по форме импульса сцинтилляции, что позволяет реализовать в СКВ отдельную регистрацию солнечного нейтронного и гамма-излучения.

Для подавления фона заряженных частиц оба детектора накрыты антисовпадательными защитными детекторами АЗД (рис. 1) из полистирольного сцинтиллятора. Полистирольные сцинтилляторы обладают тем свойством, что регистрируют с относительно низкой эффективностью нейтральные частицы (гамма-кванты и нейтроны) и почти со 100 % эффективностью заряженные частицы. Это позволяет при работе основных детекторов в режиме антисовпадений с защитными исключить из регистрации

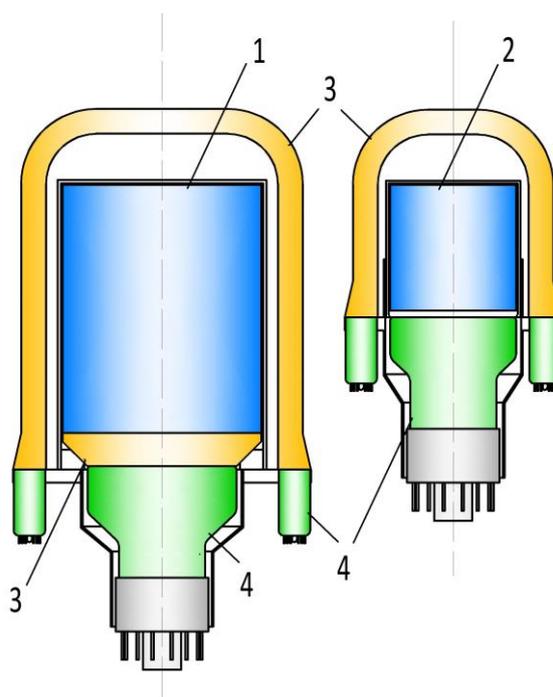


Рис. 1. Детекторы СКВ и СКН прибора ГРИС: 1 – кристалл $\text{CsI}(\text{Tl})$, 2 – кристалл $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, 3 – АЗД детекторы, 4 – фотоэлектронные умножители.

события, связанные с фоновыми заряженными частицами, увеличив чувствительность прибора. Это особенно важно при регистрации солнечных нейтронов, потоки которых малы по сравнению с потоком протонов космических лучей (КЛ), а разделение по форме импульса протонов и нейтронов в $\text{CsI}(\text{Tl})$ невозможно. Поэтому детектор СКВ имеет дополнительный полистирольный сцинтиллятор, закрывающий кристалл $\text{CsI}(\text{Tl})$ снизу.

Основной вклад в фоновую загрузку детекторов гамма-излучения на орбите МКС вносят: радиационные пояса Земли, солнечные и галактические космические лучи и нейтронное альbedo от атмосферы. Радиационные пояса Земли хотя и обладают значительной интенсивностью, действуют на относительно коротких участках орбиты. Поток солнечных космических лучей нестационарен и может

многократно возрастать, играя существенную роль на некоторых участках орбиты во время мощных солнечных событий. Потoki галактических космических лучей и нейтронов-альbedo также не являются постоянными, во многом определяясь солнечной активностью, однако эти факторы будут воздействовать на детекторы непрерывно на всех участках орбиты и во многом определяют минимальную фоновую загрузку или «хорошие» условия наблюдения.

В нашей работе для моделирования фоновой загрузки детекторов прибора ГРИС были использованы спектры потоков протонов КЛ, измеренные детектором АМС на орбите, близкой к орбите МКС [Alcaraz et al., 2000], и расчетный спектр потоков нейтронов-альbedo, приведенный в работе [Drozdov et al., 2010], в окрестностях 0° и $45\text{--}50^\circ$ широты вдали от Южно-Атлантической аномалии, что соответствует экваториальному и высокоширотному участкам орбиты МКС. Фоновые условия на этих участках значительно различаются из-за эффекта геомагнитного обрезания КЛ, так поток протонов возрастает от экватора к высоким широтам в четырнадцать раз, а поток нейтронов-альbedo – в пять раз. Для детектора СКН также учитывался собственный фон $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ [Quarati et al., 2012].

Гамма-спектр мощной солнечной вспышки имеет много компонентов, каждый из которых несет информацию о своем источнике. Большую часть статистики во вспышке определяет тормозное излучение ускоренных во вспышке электронов, возникающее при их взаимодействии с плотными слоями солнечной плазмы. Ускоренные во время вспышки протоны в зависимости от энергии испытывают разные типы взаимодействия с солнечной плазмой. Ядерное взаимодействие протонов с энергией до 20 МэВ и солнечной плазмы приводит к возникновению узких гамма-линий в спектре солнечной вспышки, энергия линии зависит от испутившего квант ядра, например, ^{16}O высвечивает кванты с энергией 6.1 МэВ, а ^{12}C – с энергией 4.4 МэВ. Протоны больших энергий при взаимодействии с ядрами генерируют нейтроны, которые захватываются ядрами водорода. Образовавшиеся ядра, в свою очередь, испускают гамма-кванты с энергией 2.2 МэВ. В случае если во вспышке присутствовал поток нейтронов, направленных вверх, то нейтроны могут покинуть Солнце и, если их энергия достаточно велика, достигнуть Земли. Нейтральные и заряженные пионы образуются при взаимодействии ядер с протонами с энергией в сотни МэВ. Распадаясь, пионы образуют высокоэнергичную пионную компоненту в спектре солнечной вспышки.

В нашей работе для оценки возможности регистрации мощных солнечных вспышек прибором ГРИС было выполнено численное моделирование отклика детекторов на два солнечных события: вспышку, зарегистрированную RHESSI 23 июля 2003 г. (класс GOES X4.8) [Lin et al., 2003; Share et al., 2003], и вспышку, зарегистрированную прибором СОНГ 28 октября 2003 г. [Kuznetsov et al., 2011].

Численное моделирование проводилось с помощью пакета GEANT4. Для моделирования отклика прибора была создана модель блока детекторов, по

габаритам, массе и химическому составу приближенная к реальному прибору ГРИС. Для моделирования фона от протонов КЛ в модель был добавлен модуль РС МКС «Звезда» массой 24, на котором планируется установка блока детекторов прибора ГРИС. Результаты моделирования показали, что присутствие такой большой массы вещества около детекторов заметно увеличивает фоновую скорость счета от протонов КЛ, особенно в области энергий 0.2–15 МэВ (в 3–7 раз), тогда как на фон от нейтронов-альbedo модуль практически не оказывает влияния. В расчетах также использовались зависимости энергетического разрешения от энергии полученные на прототипах СКВ и СКН при лабораторных измерениях.

На рис. 2, а представлены результаты моделирования отклика детектора СКН на солнечную вспышку 23.07.2002 г. в диапазоне энергий 0.4–15 МэВ. В спектре хорошо видны ядерные гамма-линии. На том же рисунке показаны фоновые спектры от собствен-

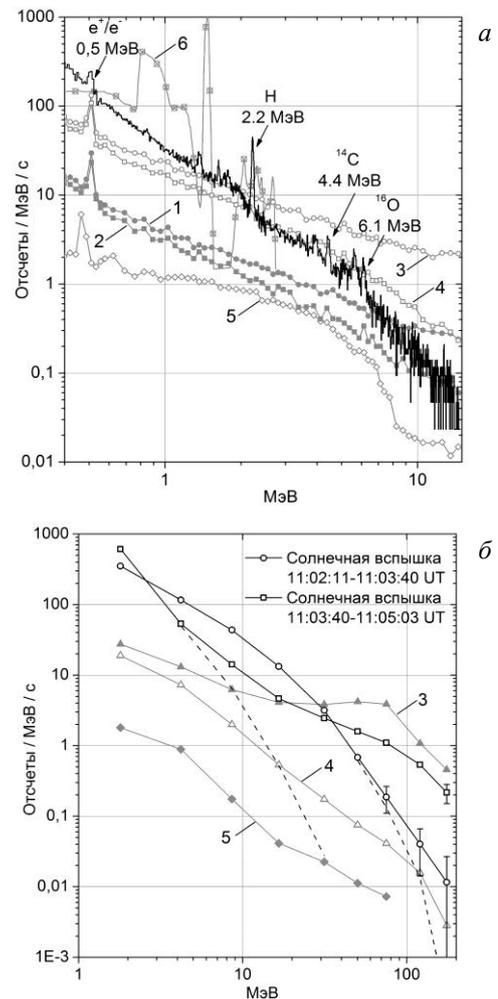


Рис. 2. Результаты моделирования отклика: а – детектора СКН на солнечную вспышку 23.07.2002; б – детектора СКВ на солнечную вспышку 28.10.2003, штриховой линией обозначена тормозная компонента спектров. 1 – фон протонов КЛ без АСЗ на экваториальном участке орбиты; 2 – то же, что и 1, но с АСЗ; 3 – фон протонов КЛ без АСЗ на высокоширотном участке орбиты; 4 – то же, что и 3, но с АСЗ; 5 – фон от нейтронов-альbedo без АСЗ на высокоширотном участке орбиты; 6 – собственная активность $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$.

ной активности $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, протонов КЛ и нейтронов-альbedo. Можно заметить, что основной вклад в фоновую загрузку до энергии 3 МэВ вносят активность $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и для больших энергий – протоны КЛ. Использование АСЗ обеспечивает снижение фоновой загрузки в области высокоэнергичных гамма-линий (4–10 МэВ) примерно в два раза. Однако большую часть фоновых событий в области низких энергий не удается режектировать с помощью АСЗ. Это связано с тем, что в детекторе регистрируются не только протоны, но и вторичное гамма-излучение, возникающее при взаимодействии энергичных протонов с окружающим веществом (главным образом модулем «Звезда»). На высокоширотных участках орбиты фоновая загрузка детектора значительно возрастает, достигая по интенсивности выбранной нами достаточно мощной солнечной вспышки, существенно ухудшая условия измерений.

На рис. 2, б представлены результаты моделирования отклика детектора СКВ на очень мощную солнечную вспышку 28.10.2003 г. в диапазоне 1–200 МэВ. Приведены две фазы вспышки: в первой доминирует тормозная компонента спектра (обозначена штрихом), во второй присутствует мощная пионная компонента. Детектор СКВ обеспечивает хорошее выделение пионной компоненты спектра благодаря достаточно большой высоте кристалла $\text{CsI}(\text{Tl})$, обеспечивающей поглощение большей доли энергии энергичных гамма-квантов. На рисунке также приведены фоновые спектры от протонов КЛ и нейтронов-альbedo для высокоширотных участков орбиты. Видно, что использование АСЗ эффективно подавляет фон от протонов КЛ (почти на два порядка в области энергий 100 МэВ), обеспечивая хорошие условия регистрации даже на высокоширотном участке орбиты. Это связано с тем, что в высокоэнергичной области спектра регистрируются в основном первичные протоны КЛ, а не вторичное излучение. Фон от нейтронов-альbedo значительно ниже в обоих рассмотренных случаях и не оказывает существенного влияния на фоновую загрузку детектора.

Приведенные расчеты позволяют сделать вывод, что прибор ГРИС имеет достаточную чувствительность и энергетическое разрешение для регистрации всех компонентов гамма-спектра мощных солнечных вспышек, регистрируя как ядерные линии с высоким энергетическим разрешением, по крайней мере на экваториальных участках орбиты, так и высокоэнергичную пионную компоненту. АСЗ СКВ обладает высокой эффективностью, значительно повышая чувствительность прибора в области высоких энергий. АСЗ СКН незначительно повышает чувствительность детектора в области 4–10 МэВ, однако из-за того, что в области энергий до 10 МэВ, большую часть фоновой загрузки обеспечивает вторичное гамма-излучение, возникающее при взаимодействии протонов КЛ с модулем «Звезда», эффективность применения АСЗ СКН невелика.

Alcaraz J., Alvisi D., Alpat B., et al. Protons in near-Earth orbit // *Phys. Lett. B.* 2000. V. 472. P. 215–226.

Drozdov A., Grigoriev A., Malyshkin Yu. Modeling of albedo neutrons at low orbiting satellites altitudes // *WDS'10 Proceeding of Contributed Papers.* 2010. Part III. P. 133–138.

Kuznetsov S.N., Kurt V.G., Yushkov B.Y. Gamma-ray and high-energy-neutron measurements on CORONAS-F during the solar flare of 28 October 2003 // *Solar Phys.* 2011. V. 268. P. 175–193.

Lin R.P., Krucker S., Hurford G.J., et al. RHESSI observations of particle acceleration and energy release in an intense solar gamma-ray line flare // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. P. 69–76.

Quarati F.G.A., Khodyuk I.V., Eijk C.W.E., et al. Study of ^{138}La radioactive decays using LaBr_3 scintillators // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2012. V. 683. P. 46–52.

Share G.H., Murphy R.J., Skibo J.G., et al. High-Resolution observation of the solar positron-electron annihilation line // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. P. 85–88.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия