Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Трофимов Юрий Алексеевич

Спектрометр научной аппаратуры ГРИС по исследованию с борта РС МКС рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор:

МОСКВА – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: *Котов Юрий Дмитриевич*
кандидат физико-математических наук, доцент,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: *Нусинов Анатолий Абрамович*
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией №3 отдела №2, Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, г. Москва

Яшин Иван Васильевич
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцина МГУ, г. Москва

Ведущая организация: *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург*

Защита состоится «3» февраля 2020 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 при ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Физического Института им. П.Н. Лебедева РАН и на сайте института: www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «___»_____20 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.023.04, д.ф.-м.н. Баранов С.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

По мере развития технологического уровня человечества нестационарные процессы на Солнце (солнечная активность) оказывают все увеличивающееся влияние на многие аспекты деятельности современного общества. Мощные корональные выбросы замагниченной плазмы, происходящие во время солнечных вспышек, могут привести к серьезным нарушениям индустриальной инфраструктуры (выходу из строя спутников, в том числе навигационных; авариям на трубопроводах и линиях электропередач, особенно в северных широтах и т.д.). С другой стороны, каждый из слабых всплесков активности не оказывает серьезного влияния на космическую погоду, однако их совокупное воздействие на временах масштаба десятилетий влияет на систематическое изменение климата. Детальное понимание механизма возникновения и развития вспышечной активности на Солнце важно как для совершенствования теоретической основы вспышечных процессов, так и для прогнозирования космической погоды в будущем.

Рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек является ценным источником данных о механизмах ускорения и распространения частиц, происходящих в солнечной атмосфере. Из-за разнообразия процессов генерации электромагнитного излучения вспышечный спектр содержит в себе несколько компонентов, несущих информацию об источниках, их породивших: спектр тормозного излучения в диапазоне от десятков кэВ до сотен МэВ несет информацию о количестве и энергетическом распределении ускоренных электронов; по относительным интенсивностям ядерных гамма-линий в диапазоне 0,3-8 МэВ можно судить о характере спектра ускоренных протонов и α-частиц в диапазоне энергий 10–30 МэВ/нуклон, а по доплеровскому смещению и уширению гамма-линий об их угловом распределении; присутствие в спектре широкого пика с максимумом в окрестности 70 МэВ от распада π^0 мезонов свидетельствует о наличии во вспышке высокоэнергичных протонов

(>300 МэВ). Дополнительным источником данных могут служить «прямые» солнечные нейтроны, рожденные во взаимодействии энергичных адронов с веществом солнечной атмосферы и долетевшие до Земли без распада. Определение вклада указанных механизмов в совокупный регистрируемый спектр электромагнитного излучения может быть осуществлено на основании выделения характерных особенностей спектра в различных энергетических диапазонах и изучения эволюции этих особенностей во времени

Спектрометрия рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек, начиная с 50-х годов XX века, является широко используемым методом изучения активности Солнца. В первом десятилетии XXI века было запущено несколько миссий, изучавших солнечные вспышки в рассматриваемом диапазоне энергий. Наиболее результативные из них: научная аппаратура (НА) СОНГ на борту космического аппарата (КА) КОРОНАС-Ф, проводившая измерения электромагнитных спектров солнечных вспышек в диапазоне 0,03-200 МэВ, а также солнечных нейтронов [1]; КА RHESSI, изучавший солнечные вспышки с высоким энергетическим и пространственным разрешением в диапазоне 0,003-17 МэВ [2]; и КА Fermi, проводящий измерения в диапазоне 8 кэВ – 300 ГэВ с помощью двух инструментов LAT [3] и GBM [4].

Несмотря на успешную многолетнюю работу этих и других инструментов, ограниченное число имеющихся наблюдательных данных, охватывающих для каждой из наблюденных вспышек широкий диапазон энергий от десятков кэВ до ГэВ, не позволяет сделать выбор в пользу той или иной модели вспышки. СОНГ и GBM не обладают достаточно высоким энергетическим разрешением для детального изучения спектров вспышечных гамма-линий (~12% на линии 662 кэВ для BGO детектора GBM), тогда как RHESSI, несмотря на рекордно высокое энергетическое разрешение детекторов (~0,3% на линии 662 кэВ), не может проводить измерения высокоэнергичного гамма-излучения от распада пионов и солнечных нейтронов.

Поэтому актуальна подготовка нового космического эксперимента, направленного на спектрометрию рентгеновского и гамма-излучения солнечных

вспышек в диапазоне от десятков кэВ до сотен МэВ с достаточно высоким энергетическим разрешением и возможностью регистрации «прямых» солнечных нейтронов.

В настоящее время в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» ведется разработка подобной научной аппаратуры – ГРИС, предназначенной для спектрометрии Гамма- и Рентгеновского Излучений Солнечных вспышек в диапазоне энергий 20 кэВ – 200 МэВ, а также для регистрации солнечных нейтронов с энергией >30 МэВ [5]. Эксперимент ГРИС-ФКИ-1 включен в этапную программу научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на РС МКС по направлению исследований «Исследования Земли и Космоса». Начало эксперимента планируется после 2022 года.

Степень разработанности темы исследования

Несмотря на то, что солнечные гамма-спектрометры создавались ранее и успешно работали на космических аппаратах, разработка новой научной аппаратуры (НА) космического назначения каждый раз требует большого объема исследований, необходимых для определения конструкции НА и оптимизации ее физических характеристик. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

- каждый эксперимент направлен на решение определенных научных задач, в той или иной степени отличающихся от задач предыдущих экспериментов, и поэтому к аппаратуре предъявляются собственные уникальные требования по диапазонам измерений, чувствительности, энергетическому разрешению и т.д.;
- орбиты и конструкция космических аппаратов, служащих платформой для проведения экспериментов, задают различные условия для проведения измерений, например: время экспозиции и фон;
- постоянно появляются материалы, детекторы, электронные компоненты нового поколения, применение которых позволяет значительно улучшить характеристики НА, придать ей новые качества.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является разработка спектрометра нового типа для космического эксперимента ГРИС-ФКИ-1 на борту Международной космической станции (МКС). Аппаратура должна проводить измерения амплитудно-временных характеристик спектров рентгеновского и гамма-излучения, возникающего в результате взаимодействия с солнечной атмосферой пучков частиц, ускоренных в солнечных вспышках, в энергетическом диапазоне от десятков кэВ до нескольких сотен МэВ на различных фазах развития вспышек: от появления ускоренных электронов до релятивистских протонов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определение требований к физическим параметрам детектирующей аппаратуры на основе имеющихся экспериментальных данных и расчетных моделей вспышек;
- разработка метода построения сцинтилляционного спектрометра научной аппаратуры (НА) ГРИС для измерений в энергетическом диапазоне от десятков кэВ до сотен МэВ с высоким энергетическим и временным разрешением и возможностью регистрации солнечных нейтронов;
- выбор типов и размеров детекторов спектрометра, в соответствии с требованиями к их физическим параметрам, по результатам расчетов и экспериментальных исследований их характеристик;
- разработка метода расчета фонового космического излучения на низкой околоземной орбите при проведении эксперимента на борту МКС и математическое моделирование условий проведения эксперимента ГРИС;
- моделирование отклика аппаратуры на солнечные вспышки классов M и X и оценка ее способности регистрировать компоненты спектра вспышек в присутствии фонового космического излучения.

Научная новизна

- Разработан сцинтилляционный спектрометр космического эксперимента ГРИС-ФКИ-1 на борту РС МКС, предназначенный для одновременного синхронного измерения спектров рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек в широком энергетическом диапазоне 0,02-200 МэВ двумя каналами: низкоэнергетичным с детектором $CeBr_3$, впервые применяемом для регистрации солнечных вспышек, и высокоэнергетичным с детектором CsI(Tl).
- Основными характеристиками спектрометра ГРИС являются:
  - рекордное для детекторов на основе неорганических сцинтилляторов, использовавшихся для измерения спектров солнечных вспышек, энергетическое разрешение в диапазоне вспышечных гамма-линий (≤ 4,5% на линии 662 кэВ);
  - рекордное быстродействие (≤ 1мкс/фотон при энергии до 15 МэВ), что позволит без перегрузки регистрировать излучение вспышек с мощностью от M1 до X10 по шкале GOES;
  - одновременные синхронные измерения во всём энергетическом диапазоне 0,02-200 МэВ.
- Впервые для гамма-спектрометров, предназначенных для регистрации солнечных вспышек в условиях космического фона, предложен метод выбора типа детектора, учитывающий погрешности измерения энергии вспышечных гамма-линий (формула 1), спектральное разделение близкорасположенных гамма-линий (формула 2) и чувствительность к излучению вспышек малой и средней мощности (формула 3). Данным методом произведен выбор типа детектора для низкоэнегетичного канала спектрометра НА ГРИС.
- Впервые разработан и реализован метод, позволяющий в энергетическом диапазоне от десятков кэВ до нескольких ГэВ рассчитать суммарный спектр излучения, возникающего в результате взаимодействия первичного и вторичного фонового космического излучения (протоны космических лучей, диффузное космическое гамма-излучение, электроны, позитроны, альбедные гамма-кванты

и нейтроны) с веществом РС МКС, что позволило определить вклады от различных компонентов космического излучения в фоновую загрузку спектрометра ГРИС.

Практическая значимость работы

Заключается в том, что разработанные в диссертации методы и полученные с их помощью результаты могут представлять интерес при планировании экспериментов и создании аппаратуры для внеатмосферных гамма-спектрометрических исследований.

- Предложенный метод выбора типа детектора для низкоэнергетичного канала спектрометра солнечных вспышек показал преимущество кристалла $CeBr_3$ по сравнению с $LaBr_3$ (Ce) и другими неорганическими кристаллами при регистрации на РС МКС гамма-излучения солнечных вспышек и позволил выбрать сцинтилляционный детектор для спектрометра ГРИС.
- Разработанный сцинтилляционный спектрометр и полученные расчетно-экспериментальными методами его характеристики являются основой для создания научной аппаратуры ГРИС и проведения космического эксперимента на РС МКС. Данные, полученные в эксперименте, дадут вклад в исследования физики Солнца, в развитие моделей ускорения и транспортировки заряженных частиц (электронов, протонов, ядер) в солнечных вспышках.
- Разработанный метод расчёта спектров электромагнитного фонового излучения в диапазоне от десятков кэВ до нескольких ГэВ позволил осуществить выбор конфигурации детекторов и оценить чувствительность и загрузку спектрометра ГРИС при проведении на РС МКС измерений излучения солнечных вспышек классов M1 – X10 по шкале GOES.
- Оптимизация светоотражающих покрытий сцинтилляторов и электрических схем делителей напряжения ФЭУ позволила значительно улучшить характеристики детекторов в части повышения энергетического разрешения и уменьшения нелинейности энергетических шкал

сцинтилляционных детекторов ГРИС. Предложенные решения могут использоваться разработчиками детекторов излучений.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, получены либо автором лично, либо при его определяющем участии:

- автор внес существенный вклад в разработку принципа построения и структуры детектирующей аппаратуры для эксперимента ГРИС-ФКИ-1;
- автором разработан и реализован метод выбора типа низкоэнергетичного канала спектрометра солнечных вспышек;
- автором проведены экспериментальные исследования характеристик прототипа спектрометра ГРИС, предложены и проверены методические решения для их улучшения;
- автором разработаны метод расчета фона космического излучения на низкой околоземной орбите для инструментов, размещаемых на российском сегменте МКС, и необходимое программное обеспечение; с помощью GEANT4 проведено моделирование отклика НА ГРИС на фоновое космическое излучение и солнечные вспышки, и осуществлён анализ полученных результатов;
- автор внес основной вклад в подготовку ряда публикаций по теме диссертации в российских и зарубежных журналах, а также представил несколько докладов на международных и отечественных конференциях.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач в диссертации использованы экспериментальные данные по спектрам компонентов космического излучения и характеристикам солнечных вспышек, инструментарий для моделирования Geant4, специальные расчетные программные средства, основанные на методе Монте-Карло, и данные, полученные автором экспериментальным путем, что позволило ввести в расчеты реальные параметры детекторов и повысить достоверность полученных результатов.

Основные положения, выносимые на защиту

- Сцинтилляционный спектрометр для космического эксперимента ГРИС на борту МКС, обеспечивающий одновременную синхронную регистрацию рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек в широком энергетическом диапазоне 0,02-200 МэВ двумя каналами: низкоэнергетичным с детектором $CeBr_3$ (энергетический диапазон 0,02–15 МэВ), и высокоэнергетичным с детектором CsI(Tl) (диапазон 0,1–200 МэВ). Спектрометр позволит с высоким временным и энергетическим разрешением регистрировать излучения, возникающие на разных фазах ускорения частиц в процессе развития солнечной вспышки: интенсивные потоки жесткого рентгеновского излучения, вспышечные гамма-линии, высокоэнергетичное гамма-излучение от распада нейтральных пионов, а также солнечные нейтроны.
- Метод выбора типа детектора для гамма-спектрометра солнечных вспышек, учитывающий погрешности измерения энергии вспышечных гамма-линий, спектральное разделение близкорасположенных гамма-линий и чувствительность детектора к солнечным вспышкам малой и средней мощности в условиях космического фона; а также детектор на основе $CeBr_3$ для спектрометрии рентгеновского и гамма излучения солнечных вспышек с диапазоном измерений 0,02-15 МэВ.
- Метод расчета спектра фонового космического излучения на низкой околоземной орбите для инструментов, размещаемых на борту Российского сегмента МКС, включающий основные компоненты космического излучения (протоны космических лучей, альбедные гамма-кванты, электроны, позитроны и нейтроны, диффузное космическое гамма-излучение, локальный фон от МКС) и учитывающий пространственное распределение вещества модулей стации в окрестности детектора.
- Результаты численного моделирования отклика спектрометра ГРИС на фоновое космическое излучение в соответствии с разработанным методом и на излучение солнечных вспышек различной мощности (от M1.8 до X17) и

спектрального состава, подтверждающие возможность регистрации научной аппаратурой ГРИС различных компонентов спектров солнечных вспышек (тормозного излучения, ядерных гамма-линий и гамма-излучения от распада пионов).

Степень достоверности и апробация результатов

Представленные в диссертации характеристики разработанных образцов аппаратуры получены на сертифицированном оборудовании с использованием образцовых источников ионизирующего излучения по стандартным методикам измерений и подтверждаются опубликованными в научной литературе данными российских и зарубежных исследований. Метод расчета спектра электромагнитного фонового излучения прошел апробацию на экспериментальных данных прибора «Наталья-2М», работавшего в 2009 году на спутнике КОРОНАС-ФОТОН и дал хорошее согласие. При численном моделировании и расчетно-экспериментальном определении характеристик спектрометра были использованы измерительные данные, полученные в космических экспериментах с приборами SMM/GRS, RHESSI, КОРОНАС-Ф/СОНГ, КОРОНАС-Фотон/Наталья-2М.

Основные результаты, содержащиеся в диссертации были доложены на научных конференциях: Научной сессии НИЯУ МИФИ 2013, 2014, 2015, БШФФ-2013 (Иркутск), International Workshop on Solar Physics 2013 (Москва), COSPAR 2014 (Москва), 2-ой Международной конференции «Научные исследования и эксперименты на МКС» 2015 (Москва), ICPPA 2016 (Москва), заседании секции Физика Солнца Совета РАН по космосу, состоявшемся 27 июня 2017 года в ИКИ РАН (Москва).

Сущность и новизна исследований, выполненных по теме диссертации, изложены в 6 работах в периодических научных изданиях (2 – перечень ВАК; 2 – Web of Science и Scopus; 1 – перечень ВАК, Web of Science и Scopus).

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Содержит 160 страниц, 68 рисунков и 20 таблиц. Список цитируемой литературы включает 109 наименований.

Основное содержание работы

Во введении сформулированы цели диссертационного исследования, обсуждается его новизна и практическая значимость. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 приведен краткий обзор явлений, происходящих на Солнце во время вспышек и инструментов, применявшихся и применяющихся для изучения жёсткого рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек.

Солнечная вспышка подобна гигантскому взрыву в солнечной атмосфере, происходящему за счет энергии, высвобождающейся при изменении конфигурации магнитных полей. Ускоренные в результате высвобождения энергии электроны и ионы, распространяясь вдоль магнитной петли и взаимодействуя с окружающей плазмой, продуцируют жесткое рентгеновское, гамма-излучение и нейтроны либо в прямых реакциях, либо через промежуточные процессы, например, с образованием возбужденных ядер или пионов.

Из-за разнообразия процессов генерации электромагнитного излучения спектр жёсткого рентгеновского и гамма-излучения солнечной вспышки содержит в себе несколько компонентов (рис.1). Взаимодействие ускоренных во вспышке электронов с окружающим веществом приводит к возникновению тормозного излучения с энергией от десятков кэВ до сотен МэВ.

При ядерных реакциях ускоренных до энергий 10–30 МэВ/нуклон протонов и альфа-частиц с ядрами окружающей плазмы возникает излучение в узких гамма-линиях в интервале энергий 0,3–8 МэВ. Наиболее интенсивные из них: 1,37 МэВ (^{24}Mg), 1,63 МэВ (^{20}Ne), 1,8 МэВ (^{28}Si), 4,4 МэВ (^{12}C) и 6,1 МэВ (^{16}O). В более энергичных процессах возникают нейтроны, часть из них захватываются

ядрами водорода с испусканием фотонов с энергией 2,2 МэВ, а часть выходит из солнечной атмосферы и, при достаточной энергетике, может достичь орбиты Земли. Протоны с энергией >300 МэВ при ядерных взаимодействиях порождают заряженные и нейтральные пионы. От распада $\pi^0 \rightarrow \gamma+\gamma$ в спектре вспышки возникает широкий пик с максимумом в окрестности 70 МэВ.

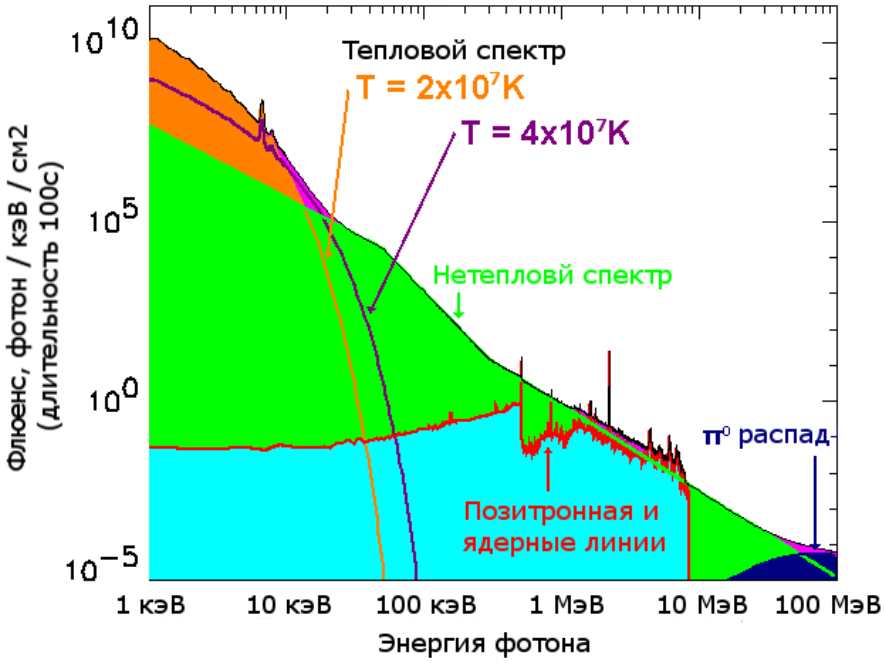

Рис.1 Спектр мощной солнечной вспышки.

Источник: http://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessi/flares.htm

В главе 2 обсуждаются требования к аппаратуре, предназначенной для спектрометрии рентгеновского и гамма-излучения солнечных вспышек, описан метод построения спектрометра ГРИС и метод выбора для него типа низкоэнергичного детектора, приведены цели эксперимента ГРИС и основные параметры разрабатываемой научной аппаратуры.

Спектрометрия солнечного рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне от десятков кэВ до сотен МэВ определяется следующими особенностями вспышечных спектров: в области низких энергий (десятки кэВ) необходимо регистрировать значительные потоки тормозного излучения (до 5000 фотон/см^2/с в диапазоне 20-100 кэВ); в диапазоне энергий 0,3-9 МэВ необходимо обеспечить достаточно высокое энергетическое разрешение и эффективность регистрации в фотопике для измерения характеристик гамма-линий; и, наконец,

в области энергий ~100 МэВ необходимо обеспечить эффективную площадь и объем рабочего вещества детектора, достаточные для получения спектров гамма-излучения от распада пионов (10^{-4}-10^{-6} фотон/см^2/с в диапазоне >100 МэВ, для длительного высокоэнергичного излучения вспышек). Задача выделения сигналов от солнечных нейтронов на фоне многократно превосходящего по интенсивности гамма-излучения выдвигает дополнительные требования к НА.

Для решения данной задачи в условиях массово-габаритных ограничений, накладываемых необходимостью доставки аппаратуры на РС МКС (масса до 50 кг, габариты 40×40×48 см для блока детекторов НА), оптимальным решением является применение двух спектрометрических детекторов относительно небольших размеров: первый детектор должен быть направлен на регистрацию значительных потоков рентгеновского излучения и спектрометрических измерений вспышечных гамма-линий, основной задачей второго детектора должна являться регистрация высокоэнергичного пионного компонента спектра и прямых солнечных нейтронов. Одновременная работа двух детекторов должна обеспечивать синхронные измерения в широком диапазоне энергий: от низкоэнергетичного тормозного излучения электронов в области десятков кэВ до высокоэнегетичного излучения от распада пионов в области сотен МэВ.

Наиболее подходящим решением для низкоэнергетичного канала регистрации излучения солнечных вспышек видится применение детектора на основе неорганических сцинтилляторов нового поколения $LaBr_3$(Ce) или $CeBr_3$. Данные сцинтилляторы широко используются в наземных измерениях, но в космофизических исследованиях их только начинают применять. Они имеют малое время высвечивания (~20 нс), что обеспечивает высокую загрузочную способность детектора, достаточно высокое энергетическое разрешение (3-4,5 %), необходимое для спектрометрии ядерных гамма-линий, и высокую радиационную стойкость.

Кристалл $LaBr_3$(Ce) имеет лучшее энергетическое разрешение (до 3% на линии 662 кэВ по сравнению с 4,3% для $CeBr_3$), но более высокий собственный

фон (1,24 отсч./с/см^3 против 0,02-0,04 отсч./с/см^3 $CeBr_3$ в диапазоне 0.02–3.0 МэВ), что может негативно сказаться на чувствительности детектора [6-8].

Для обоснованного выбора типа кристалла низкоэнергетичного детектора был разработан метод, позволяющий сравнить характеристики различных детекторов гамма-излучения и учитывающий, с одной стороны, такие факторы как внешний фон, собственная активность кристалла, энергетическое разрешение детектора, а с другой, различные аспекты регистрации спектров солнечных вспышек. Предложенный метод включает в себя три критерия:

Для измерения доплеровского смещения вспышечных гамма-линий, согласно данным [9], необходима точность измерения энергии линий не хуже 0,1-0,5%. Поэтому первым критерием метода выбрана погрешность измерения положения пиков гамма-линий в аппаратном спектре при наличии подложки:

$$\sigma_{\bar{E}} = \frac{\sqrt{\sum(N_i+B_i)(E_i-\bar{E})^2}}{P}, \qquad (1)$$

где $\bar{E}$ – оценка положения центроида пика, $\sigma_{\bar{E}}$ – среднеквадратичное отклонение $\bar{E}$, P – суммарная статистика отсчетов в пике, N_i – суммарная статистика отсчетов в i-ом канале спектра, B_i – оценка числа отсчетов в подложке в этом же канале, в которую входит как космический фон и собственная активность кристалла, так и непрерывные компоненты спектра вспышки.

Вторым критерием служит условие спектрального разделения комплекса из трех близкорасположенных пиков: гамма-линий 1,63 МэВ (^{20}Ne), 1,78 МэВ (^{28}Si) и, лежащего между ними пика однократного вылета линии n-захвата 1,71 МэВ. Спектральное разделение можно оценить по формуле:

$$\eta = \frac{s}{w_{1,63\ \text{МеВ}}/2+w_{1,71\ \text{МеВ}}+w_{1,78\ \text{МеВ}}/2}, \qquad (2)$$

где s – расстояние между линиями 1,63 МэВ (^{20}Ne) и 1,78 МэВ (^{28}Si), $w_{1,63\ МэВ}$, $w_{1,71\ МэВ}$, и $w_{1,78\ МэВ}$ – ПШПВ соответствующих пиков.

Мощные солнечные вспышки рентгеновского класса X – относительно редкие события. Основной массив вспышечных данных для спектрометра ГРИС будут составлять вспышки средней и малой мощности с достаточно мягким

энергетическим спектром. Поэтому третьим критерием метода выбрана чувствительность детектора к подобным событиям. Чтобы оценить её величину, был использован показатель качества (*FOM*), аналогичный описанным в работе [6]:

$$FOM(E) = I(E)\, S_{phot}(E) \sqrt{\frac{t}{B(E)w(E)}} \quad , \qquad (3)$$

где I (фотон/с/см^2) – интенсивность падающего на детектор излучения в узком интервале энергий (E; $E+dE$), S_{phot} – эффективная площадь детектора при регистрации в фотопике (пике полного поглощения), t – время набора данных, B – фоновая загрузка детектора, включающая собственный фон кристалла и вклад космического фона, w – энергетическое разрешение детектора в единицах энергии. Заданный таким образом *FOM* имеет смысл статистической значимости измерительных данных детектора при регистрации за время t излучения интенсивностью I в присутствии фона B.

Методы получения входных параметров для критериев метода описаны в главах 3 и 4. Результаты применения предложенного метода для выбора типа детектора низкоэнегетичного канала ГРИС описаны в главе 5.

Для высокоэнергетичного детектора оптимальным решением является применение спектрометра на основе CsI(Tl). Данные кристаллы могут быть изготовлены больших размеров, что необходимо для регистрации высокоэнергетичного излучения. Дополнительным преимуществом CsI(Tl) является возможность разделение n/γ-сигналов по форме сцинтилляционных импульсов. Это позволяет реализовать в детекторе раздельную регистрацию нейтронов и гамма-излучения. Худшее энергетическое разрешение CsI(Tl) (~8% на линии 662 кэВ) и быстродействие (время высвечивания ~ 0.7 и 7.0 мкс) не должно играть существенной роли при регистрации высокоэнергетичного излучения, так как для энергий ~100 МэВ энергетическое разрешение детектора определяется размерами кристалла (так как значительная часть вторичных частиц, образующихся в кристалле, может выходить за пределы детектора), а потоки высокоэнергичного гамма-излучения от распада пионов относительно

невелики: не более нескольких фотонов/см^2/с в диапазоне 20-200 МэВ в активной фазе вспышки [1].

Предложенный способ построения солнечного гамма-спектрометра реализуется в научной аппаратуре ГРИС, предназначенной для спектрометрии гамма и рентгеновского излучения солнечных вспышек в диапазоне энергий 20 кэВ – 200 МэВ, а также для регистрации солнечных нейтронов с энергией >30 МэВ [5].

Спектрометр ГРИС (рис.2) содержит два канала: Спектрометрический Канал Низких энергий (СКН) с детектором $CeBr_3$ размером ø7,6×7,6 см, регистрирующий излучение в диапазоне 0,02-15 МэВ и Спектрометрический Канал Высоких энергий (СКВ) с детектором CsI(Tl) размером ø12×15 см, регистрирующий излучение в диапазоне 0,1-200 МэВ и обеспечивающий раздельную регистрацию нейтронов и гамма-излучения. Для подавления фона от заряженных частиц детектор СКВ со всех сторон окружен полистирольными антисовпадательными защитными детекторами (АСЗ-детекторами): верхним, представляющим из себя отдельный детектор куполообразной формы, и нижним, составляющим с кристаллом CsI(Tl) фосвич-детектор.

Синхронность измерений ГРИС во всём энергетическом диапазоне достигается благодаря тому, что все данные в поддиапазонах ГРИС, включая н-матрицу, формируются из аналоговых сигналов спектрометра ГРИС в едином электронном блоке – узле обработки сигналов (УОС), расположенном в ГРИС-БД [10].

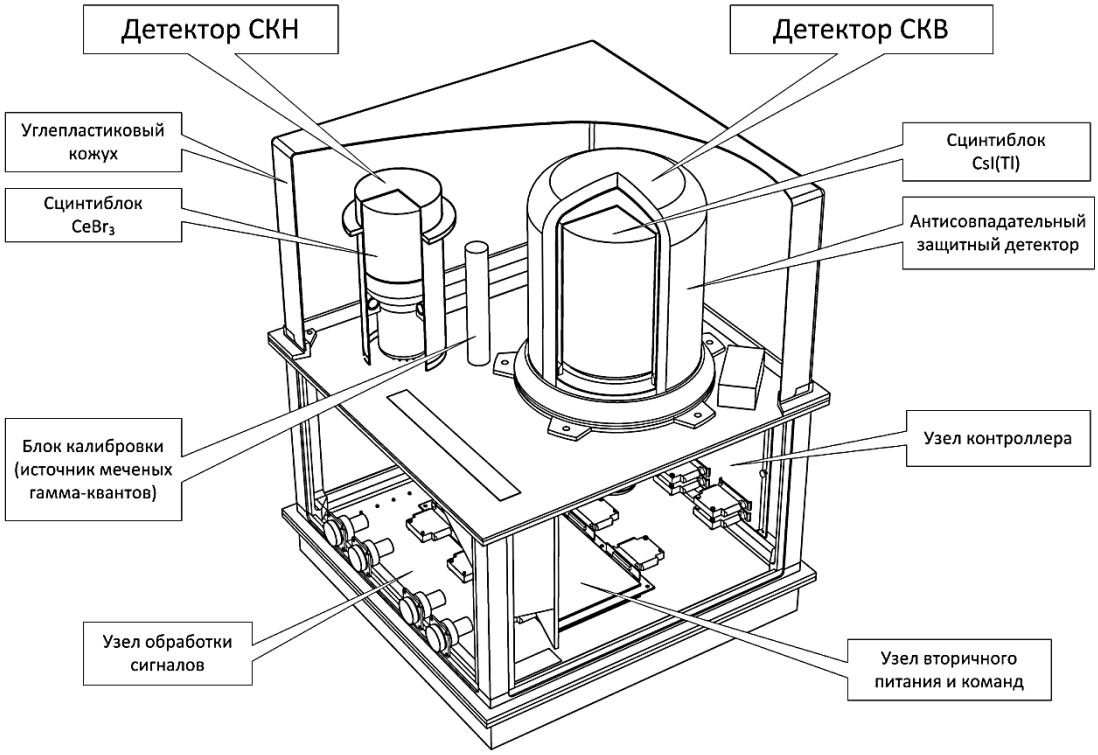

Рис.2 Спектрометр ГРИС

В главе 3 обсуждаются результаты экспериментальных исследований характеристик специально разработанных и созданных прототипов детекторов СКН и СКВ.

В качестве прототипов для СКН исследовались два детектора: $LaBr_3$(Ce) ø2,5×2,5 см и $CeBr_3$ ø5,1×1,25 см. В прототипе для СКВ использовался CsI(Tl) в форме шестигранной призмы высотой 15 см и диаметром описанной вокруг основания окружности 10 см. Для проведения калибровок использовался набор гамма-линий в диапазоне 0,5–11 МэВ от изотопных гамма-источников и полученных методом нейтронной активации с использованием нейтронного стенда (рисунок 4), описанного в работе [11].

Проведенные измерения с фотоэлектронными умножителями различных типов показали, что наилучшее энергетическое разрешение для $LaBr_3$(Ce) детектора (3,2% на линии 662 кэВ) удается получить при применении ФЭУ R6233-100 фирмы Hamamatsu с бищелочным фотокатодом с повышенной до 35% квантовой эффективностью. $CeBr_3$ в сборе с ФЭУ R6233-100 показал разрешение 4,3% на линии 662 кэВ. Для CsI(Tl) наилучшие результаты показало

сочетание ФЭУ R6233-100 с комбинированной схемой светоотражающей упаковки: зеркальный отражатель VM-2000 на боковой поверхности кристалла и диффузный (материал Tyvek) на торце (энергетическое разрешение линии 662 кэВ составило 5,9%).

Также было показано, что оптимальное соотношение энергетического разрешения к загрузочной способности детектора CsI(Tl) достигается при времени интегрирования сигнала около 8 мкс: энергетическое разрешение на линии 662 кэВ составляет 6,4%, что удовлетворяет требованиям для высокоэнергетичного канала ГРИС, а приемлемый уровень искажения формы спектра из-за наложений сигналов сохраняется вплоть до загрузки детектора 8,5× 10^3 отсч./с, что примерно соответствует предельной ожидаемой загрузке СКВ при регистрации солнечных вспышек.

В результате для прототипов СКН и СКВ были получены следующие зависимости для энергетического разрешения (*ΔE/E*), использовавшиеся в дальнейшем как входные параметры для моделирования:

$$(\Delta E/E)^2 = \begin{cases} \frac{0{,}55\pm0{,}01}{E(\text{кэВ})} + (1{,}9 \pm 0{,}1) \times 10^{-4} & \textit{LaBr}_3\textit{(Ce) детектор} \\ \frac{0{,}87\pm0{,}01}{E(\text{кэВ})} + (1{,}9) \times 10^{-4} & \textit{CeBr}_3\ \textit{детектор} \\ \frac{2{,}51\pm0{,}04}{E(\text{кэВ})} + (2{,}7 \pm 0{,}3) \times 10^{-4} & \textit{CsI(Tl) детектор (8мкс)} \end{cases} \qquad (4)$$

На рис.3 и 4 показаны результирующие энергетические разрешения и калибровочные спектры прототипов СКН и СКВ. На рис.3 точки – измеренные относительные ПШПВ калибровочных гамма-линий, сплошная линия – полное разрешение детекторов, пунктир – вклад статистического слагаемого в формуле 1 (пропорционального *1/E*).

Прототип СКВ показал высокую способность разделения сигналов от α и γ-излучения по форме импульсов. Наибольшее разделение было достигнуто при времени начала интегрирования медленного компонента сигнала t_0 = 2,25 мкс, параметр разделения (см. формулу 1 в работе [12]) составил 7.4.

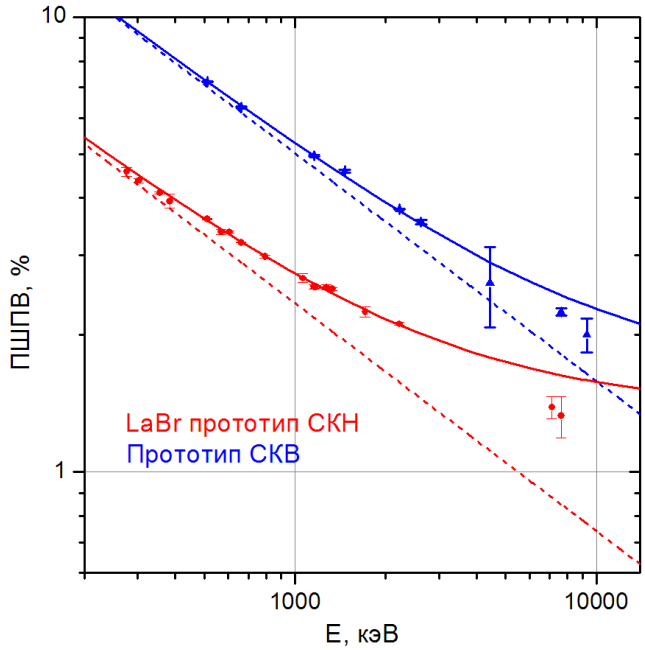

Рис.3 Энергетическое разрешение прототипов СКН и СКВ в диапазоне 0,5-9 МэВ.

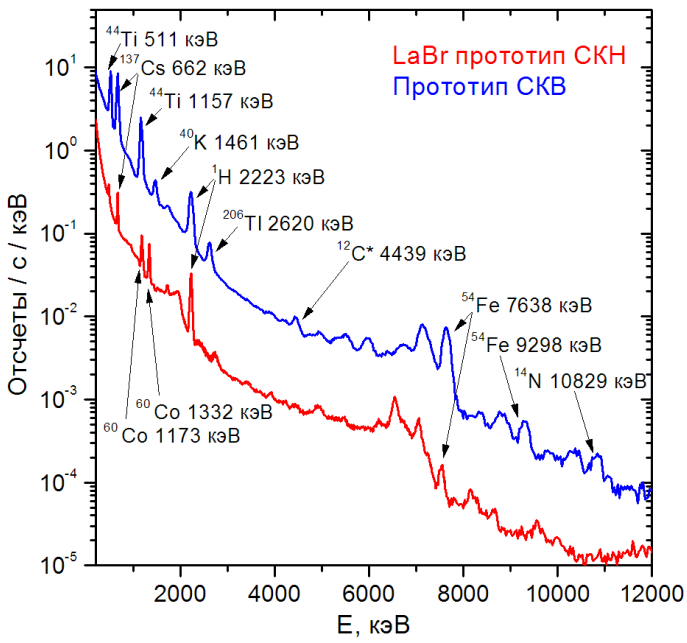

Рис.4 Измеренный спектр нейтронного стенда и источников ^{137}Cs, ^{44}Ti и ^{60}Co.

В главе 4 обсуждаются результаты численного моделирования отклика детекторов НА ГРИС на потоки ионизирующего излучения, проводившегося с помощью программного пакета Geant4 [13].

Для оценки фоновых условий во время работы НА ГРИС на борту РС МКС был разработан метод расчета фонового космического излучения на экваториальном участке орбиты посредством численного моделирования отклика детекторов на основные компоненты космического излучения: протоны космических лучей, альбедное нейтронное, электронное, позитронное и гамма-излучения, диффузное космическое гамма-излучение. С целью учета вклада в фоновую загрузку вторичных частиц локального происхождения модель, помимо вещества блока детекторов НА ГРИС, также учитывала распределение вещества модулей станции в радиусе 10 м от блока детекторов.

Верификация предложенного метода расчета фона по данным прибора «Наталья-2М» на КА КОРОНАС-ФОТОН [14] показала хорошее согласие с экспериментальными данными. Заметное (в 2-4 раза) превышение измеренной скорости счета над расчетной наблюдалось только для энергий <2МэВ, что,

вероятнее всего, обусловлено недооценкой вклада долговременной активации материалов детекторов и окружающих конструкций, возникающей при прохождении внутреннего радиационного пояса Земли в Южно-атлантической аномалии.

Минимальная фоновая загрузка детекторов будет наблюдаться на близких к экватору участках орбиты. Тогда как, согласно данным прибора «Наталья-2М», в высоких широтах (в окрестности 50° для МКС) возрастание скорости счета от космического фона оценивается на уровне 2-6 раз (в зависимости от энергии регистрируемого излучения). Исходя из трех факторов: космического фонового излучения, его широтной вариации и долговременной активации была проведена оценка фоновой загрузки детекторов НА ГРИС на экваториальном и высокоширотном участках орбиты, приведенная в Таблице 1.

Таблица 1 Оценка фоновых загрузок каналов НА ГРИС (отсч./с)

	СКН-1 0,03-2 МэВ	СКН-2 0,4-15 МэВ	СКВ-1 0,2-10 МэВ	СКВ-2 10-200 МэВ
Экватор	$(7,5\text{-}22)\times10^2$	$(1\text{-}3)\times10^2$	$(7\text{-}15)\times10^2$	17
Выс. широты	$(22\text{-}37)\times10^2$	$(3\text{-}7)\times10^2$	$(11\text{-}26)\times10^2$	$(0,7\text{-}1)\times10^2$

Проведенные по результатам моделирования фона расчеты показали высокую эффективность полистирольных АСЗ-детекторов в области энергий в десятки и сотни МэВ: их применение приводит к снижению фоновой загрузки СКВ в окрестности 100 МэВ в 17 раз. При регистрации менее энергичного излучения эффективность АСЗ-детекторов резко снижается: в окрестности 6 МэВ подавление фона происходит только в 1,6 раза. По этой причине было принято решение отказаться от их применения для СКН.

На рис.5 представлены результаты моделирования отклика СКН на вспышку SOL2002-07-23(X4.8) с ярко выраженными гамма-линиями в спектре [9,15], а также модельные фоновые спектры на экваториальном участке орбиты. Видно, что в диапазоне энергий <2 МэВ интенсивность вспышечного спектра превосходит фон от космического излучения. Собственный фон $LaBr_3$(Ce),

ухудшает условия измерений в области вспышечных гамма–линий, значительно повышая фоновую загрузку детектора в диапазоне 0,7 – 3 МэВ.

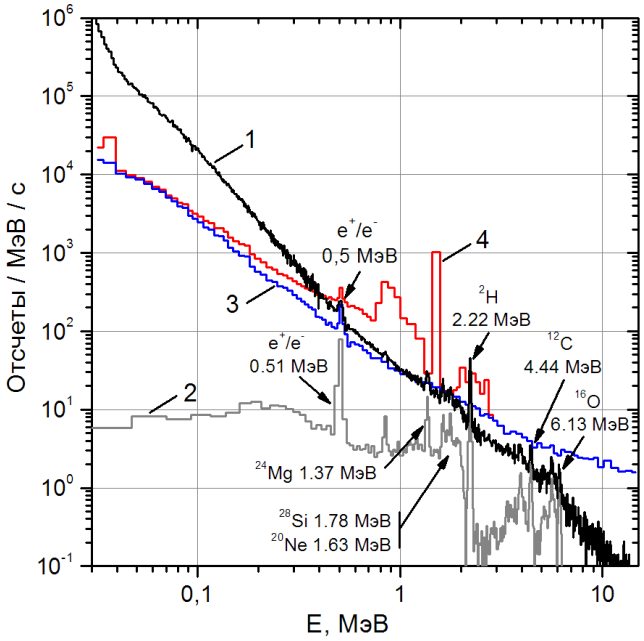

Рис.5 Результаты моделирования отклика СКН на вспышку SOL2002-07-23(X4.8). 1 – спектр вспышки, 2 – спектр вспышечных гамма-линий, 3 –косм. фон на экваторе, 4 – косм. фон + собст. фон $LaBr_3(Ce)$.

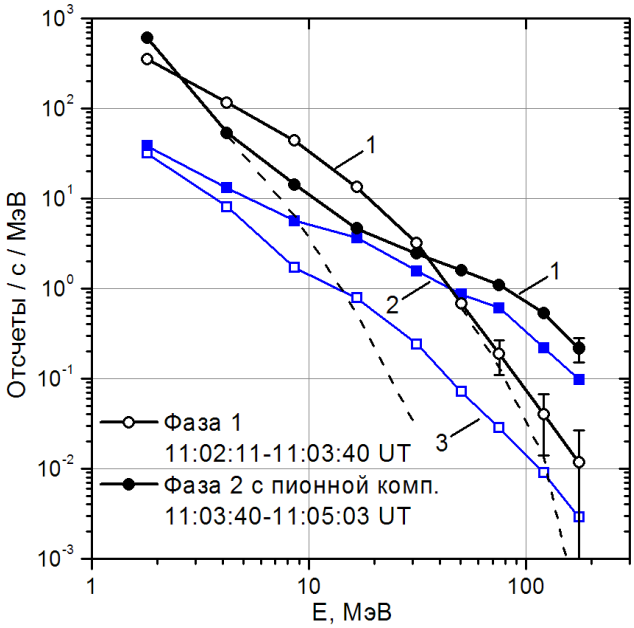

Рис.6 Отклик СКВ на вспышку SOL2003-10-28(X17): 1 – спектр вспышки, 2 – косм. фон на экваторе, АСЗ выкл. 3 – косм. фон на экваторе, АСЗ вкл.

Результаты моделирования отклика детектора СКВ на очень мощную вспышку SOL2003-10-28(X17) с ярко выраженным высокоэнергичным пионным компонентом спектра [1] представлены на рис.6. Приведены две фазы вспышки: в первой доминирует непрерывный компонент спектра (обозначен пунктиром), во второй присутствует мощный пионный компонент. Детектор СКВ показывает хорошее выделение компонента, связанного с распадами пионов, благодаря достаточно большой высоте кристалла (около 8 радиационных длин). Использование АСЗ эффективно подавляет фон, обеспечивая чувствительность к гамма-излучению >90 МэВ на уровне 10^{-3} – 10^{-4} фотон/см^2/с.

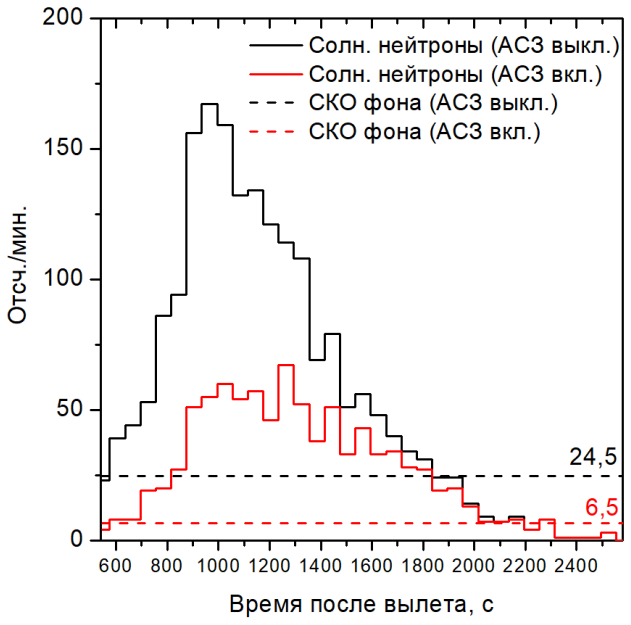

Рис.7 Временной профиль отклика СКВ на солнечные нейтроны. T = 0 – момент генерации нейтронов на Солнце.

Предложенный метод моделирования разделения нейтронного и гамма-излучения по форме импульса на основе соотношения интенсивностей быстрого и медленного компонентов сигнала CsI(Tl), приведенного в работе [16], позволил рассчитать отклик СКВ на солнечные нейтроны для вспышки подобной по числу ускоренных протонов SOL2002-07-23(X4.8) (Np = 2×10^{32}). Спектрометр ГРИС показал высокую чувствительность к солнечным нейтронам: максимальная скорость счета нейтронов примерно в семь раз превысила СКО фона (рис.7).

В главе 5 обобщаются результаты, полученные экспериментальными и расчетными методами. На основе предложенного в главе 2 метода рассматривается вопрос выбора типа кристалла для детектора СКН.

Первый критерий метода – оценка погрешности измерения энергии вспышечных гамма-линий по формуле 1 рассчитывался по данным моделирования отклика ГРИС на солнечную вспышку SOL2002-07-23(X4.8), результатам моделирования фоновой загрузки детекторов на экваториальном участке орбиты и результатам измерения энергетического разрешения прототипов детекторов ГРИС (формула 4). Спектр собственного фона $LaBr_3$(Ce) ø7,6×7,6 см был взят из работы [17]. Для всех линий оба варианта детектора СКН показали примерно одинаковую погрешность измерения (рис.8): для большинства линий наблюдается незначительное (1 – 2 кэВ) преимущество $LaBr_3$(Ce) над $CeBr_3$. Однако относительный выигрыш $LaBr_3$(Ce) снижается с

ростом энергии, достигая уровня 4-5% для наиболее энергичных гамма-линий 4,4 МэВ (^{12}C) и 6,1 МэВ (^{16}O).

Несмотря на худшее энергетическое разрешение детектор СКВ не уступает по данному критерию обоим вариантам СКН в области низкоэнергичных гамма-линий, а для высокоэнергичных линий 4,4 МэВ (^{12}C) и 6,1 МэВ (^{16}O) демонстрирует примерно в два раза меньшую погрешность по сравнению с детектором СКН, но сопоставимую с результатами измерений RHESSI. В целом, критерий показывает, что для детекторов ГРИС доступны измерения красного смещения только для линий 4,4 МэВ (^{12}C) и 6,1 МэВ (^{16}O). Достоверное измерение красных смещений менее энергичных гамма-линий едва ли возможно с помощью НА ГРИС, так как смещения близки к погрешностям измерений или же значительно меньше них.

Преимущество высокого разрешения детектора СКН проявляется при применении второго критерия, показывающего возможность разделения комплекса близко расположенных линий в области 1,6 МэВ – 1,8 МэВ. Параметр спектрального разделения (η, формула 2) принимает значения: 1,82 для $LaBr_3$(Ce), 1,59 для $CeBr_3$ и 0,99 для CsI(Tl). То есть оба варианта СКН разделяют близкорасположенные пики, тогда как детектору СКВ не хватает энергетического разрешения для надежного разделения: $\eta = 0{,}99$ показывает, что суммарная ширина пиков в интервале энергий 1,63 – 1,78 МэВ примерно равняется расстоянию между ними.

Для расчета чувствительности детектора к солнечным вспышкам малой и средней мощности согласно третьему критерию (формула 3) использовались результаты моделирования фоновой загрузки детекторов ГРИС на экваториальном участке орбиты, и результаты измерения энергетического разрешения прототипов детекторов (формула 4). Энергетическая зависимость эффективной площади регистрации в фотооптике (S_{phot}) рассчитывалась с помощью программного пакета Geant4

Результаты расчета *FOM* при регистрации излучения единичной интенсивности в течение 1 с. представлены на рис.9. Видно, что в области

энергий до 300 кэВ и выше 3 МэВ оба варианта детектора СКН показывают практически одинаковую чувствительность. В диапазоне 0,3-3 МэВ, благодаря превалированию собственного фона $LaBr_3$(Ce) над вкладом от внешних источников фона (красная кривая на рис.5), $CeBr_3$ имеет в 1,5-3 раза большую чувствительность. За счет большей площади и высоты кристалла CsI(Tl) детектор СКВ показывает большую чувствительность во всем измеряемом диапазоне энергий.

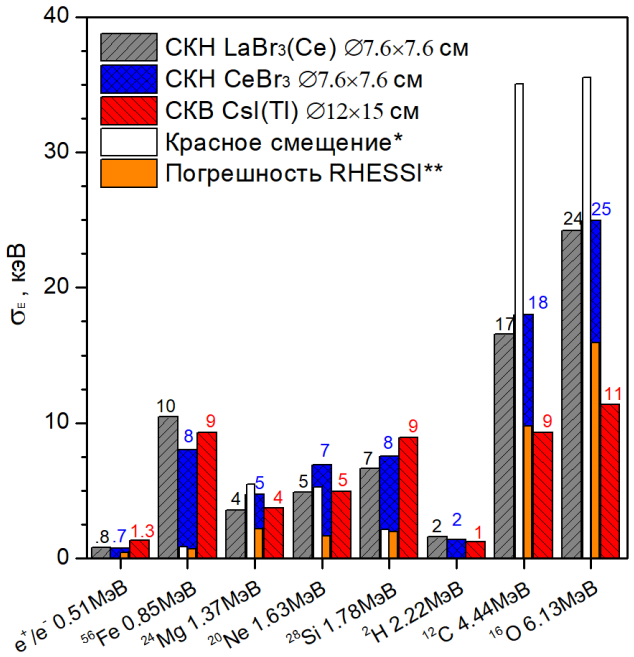

Рис.8 Погрешности измерения энергии гамма-линий в спектре вспышки SOL2002-07-23(X4.8) для детекторов ГРИС и RHESSI, а также красное смещение линий. – по данным [9]*

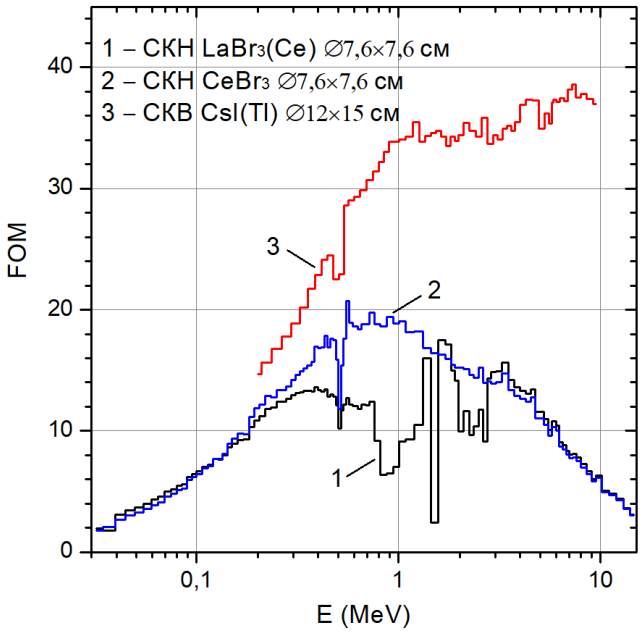

Рис.9 Статистическая значимость данных детекторов СКН ($LaBr_3$(Ce) и $CeBr_3$ варианты) и СКВ (подробнее смотри текст).

Исходя из предложенного метода выбора типа низкоэнергетичного детектора для СКН был выбран кристалл $CeBr_3$, который, удовлетворяет первым двум критериям в той же степени, что и $LaBr_3$(Ce), но обеспечивает большую чувствительность к излучению вспышек средней и малой мощности.

Детектор СКВ превосходит оба варианта СКН по первому и третьему критериям за счет большей эффективной площади детектора. Однако кристалл CsI(Tl) не обладает достаточным энергетическим разрешением для разделения

комплекса линий в области 1,63 – 1,78 МэВ (второй критерий). Также стоит отметить, что примерно на порядок большее мертвое время детектора на один импульс CsI(Tl) (10 мкс, против 1 мкс для детектора СКН) не удовлетворяет требованию по быстродействию к низкоэнергетичному детектору солнечных вспышек.

Результаты численного моделирования позволили определить оптимальные величины энергетических порогов для спектрометра НА ГРИС: для СКН – 20 кэВ и для СКВ – 100 кэВ. Данные пороги обеспечивают максимальную чувствительность ГРИС к вспышкам средней и малой мощности и, одновременно, приемлемую долю мертвого времени при регистрации события, подобного SOL2002-07-23(X4.8), которое можно рассматривать как типичный пример мощной солнечной вспышки. Максимальная скорость счета СКН в этом случае составит ~10^5 отсч./с, что соответствует доле мертвого времени 10% при времени регистрации единичного сигнала (τ) 1 мкс. Для СКВ с порогом 100 кэВ загрузка составит ~10^4 отсч./с, а доля мертвого времени также ~10% при τ = 10 мкс.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило возможность достижения целей научного эксперимента ГРИС-ФКИ-1 с помощью разработанного спектрометра. Было показано, что применение детекторов двух типов позволяет обеспечить регистрацию различных компонентов спектров солнечных вспышек в широком диапазоне энергий: интенсивных потоков тормозного рентгеновского излучения, благодаря высокому быстродействию детектора СКН, высокоэнергичного гамма-излучения от распада пионов, благодаря достаточно большому размеру детектора СКВ, и вспышечных гамма-линий с помощью обоих детекторов спектрометра ГРИС.

Экспериментальными и расчётными методами были подтверждены и обоснованы следующие характеристики спектрометра ГРИС:

- энергетические диапазоны (СКН – 0,02-15 МэВ,СКВ – 0,1-200 МэВ) и быстродействие детекторов (≤ 1мкс/фотон для СКН, ≤ 10 мкс/фотон для СКВ), обеспечивающие оптимальный динамический диапазон регистрации вспышек от M1 до X10 по шкале GOES;
- рекордное для детекторов на основе неорганических сцинтилляторов, использовавшихся для измерения спектров солнечных вспышек, энергетическое разрешение в диапазоне вспышечных гамма-линий (≤ 4,5% на линии 662 кэВ);
- возможность регистрации красных смещений вспышечных линий 4,4 МэВ (^{12}C) и 6,1 МэВ (^{16}O);
- высокая чувствительность ГРИС к высокоэнергичному гамма-излучению солнечных вспышек (10^{-3} – 10^{-4} фотон/см^2/с в диапазоне 90 – 200 МэВ:) и солнечным нейтронам.

Разработанный метод расчета фона детекторов в энергетическом диапазоне от десятков кэВ до нескольких ГэВ, возникающего в результате взаимодействия первичного и вторичного фонового космического излучения с веществом РС МКС позволил определить вклады от различных компонентов космического излучения в фоновую загрузку детекторов ГРИС. Полученные результаты были использованы для оценки и оптимизации характеристик спектрометра.

В соответствии с разработанным методом выбора типа детектора для солнечного гамма-спектрометра впервые проведен сравнительный анализ детекторов $LaBr_3$(Ce) и $CeBr_3$ по следующим параметрам: погрешность измерения энергии вспышечных гамма-линий, спектральное разделение близкорасположенных гамма-линий и чувствительность детектора к солнечным вспышкам малой и средней мощности с учетом собственного фона детекторов и вклада фона космического излучения. Было показано, что в диапазоне до 0,3 МэВ и свыше 3 МэВ метод не выявил значимого различия детекторов, а в диапазоне 0,3-3 МэВ детектор $CeBr_3$ показал 1,5-3 раза лучшую чувствительность при сопоставимой разрешающей способности и точности измерения энергии гамма-линий, что позволило обосновать выбор $CeBr_3$ в качестве детектора для СКН.

Список литературы

1. Kuznetsov S.N., Kurt V.G., Yushkov B.Y. et al. "Gamma-Ray and High-Energy-Neutron Measurements on CORONAS-F during the Solar Flare of 28 October2003" // 2011. Solar Phys. Vol. 268. P. 175.

2. Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J. et al. "The Reuven Ramaty high-energy solar spectroscopic imager (RHESSI) // 2002. Solar Phys. Vol. 210. P. 3-32

3. Atwood W.B., Abdo A.A., Ackermann M. "The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-ray Space Telescope mission" // 2009. ApJ. Vol. 697. P. 1071-1102.

4. Meegan C., Lichti G., Bhat P.N. et al. "The Fermi Gamma-ray Burst monitor" // 2009. ApJ. Vol. 702. P. 791-804.

5. Kotov Yu.D., Yurov V.N., Trofimov Yu.A. et al. "Solar gamma-ray spectrometer GRIS onboard the International Space Station" // 2015. Adv. Space Res. Vol. 56. P. 1797-1804.

6. Quarati F.G.A., Dorenbos P., Biezen J. et al. "Scintillation and detection characteristics of high-sensitivity $CeBr_3$ gamma-ray spectrometers"// 2013. NIM-A. Vol. 729. P. 596-604.

7. Kozyrev A., Mitrofanov A., Owens A. et al. "A comparative study of $LaBr_3(Ce^{3+})$ and $CeBr_3$ based gamma-ray spectrometers for planetary remote sensing applications" // 2016 Rev. Sci. Instr. ***87*** *085112.*

8. Trofimov Yu.A., Kotov Yu.D., Yurov V.N. et al. "Simulation of GRIS spectrometer response to the solar gamma-ray flare of 23 July 2002" // 2017. IOP Conf. Series: J. of Phys. Vol. 798.

9. Smith D.M., Share G.H., Murphy R.J. "High-resolution spectroscopy of gamma-ray lines from the X-class solar flare of 2002 July 23" // 2003. ApJ. Vol. 55. P. 81-84.

10. Glyanenko A.S., Lupar E.E., Trofimov Yu. A. et al. "Service data acquisition and onboard control for "GRIS-BD" unit in "GRIS" space experiment" // 2017. J. of Phys.: Conf. series. Vol. 798.

11. Трофимов Ю.А., Лупарь Е.Э., Юров В.Н. "Линейность энергетической шкалы детектора на основе сцинтиллятора $LaBr_3(Ce)$" // 2013. ПТЭ. №2. С. 34-38.

12. Flaska M., Faisal M., Wentzloff D. and Pozzi S. "Influence of sampling properties of fast-waveform digitizers on neutron – gamma-ray, pulse-shape discrimination for organic scintillation detectors" // 2013. NIM-A. Vol. 729. P. 456-462.

13. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. "Geant4 – a simulation toolkit" // 2003. NIM-A Vol. 506. P. 250-303.

14. Котов Ю.Д. "Высокоэнергичные вспышечные процессы на Солнце и их исследование на российских спутниках КОРОНАС" // 2010. УФН. Том 180. №6. С. 647 – 661.

15. Share G.H., Murphy R.J., Skibo J.G. et. al. "High-resolution observation of the solar positron-electron annihilation line" // 2003b. ApJ. Vol. 595 P. 85-88.

16. Богомолов А.В., Бритвич Г.И., Мягкова И.Н. и Рюмин С.П. “Идентификация нейтронов на фоне гамма-квантов при регистрации их детекторами на основе CsI(Tl)” // 1996. ПТЭ. №1. С. 13-19.

17. Quarati F.G.A., Owens A., Dorenbos P. et al. “High energy gamma-ray spectroscopy with $LaBr_3$ scintillation detectors” // 2011. NIM-A. Vol. 629. P. 157-169.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. Юров В.Н., Трофимов Ю.А., Лупарь Е.Э. и др. “Метрологические характеристики спектрометра гамма-излучения на основе $LaBr_3$(Ce) для использования в наземных измерениях и в космических экспериментах” // 2013. Яд. Физ. И Инж. Т.4. №1. С. 91-96.

2. Трофимов Ю.А., Лупарь Е.Э., Юров В.Н. “Линейность энергетической шкалы детектора на основе сцинтиллятора $LaBr_3$(Ce)” // 2013. ПТЭ. №2. С. 34-38.

3. Котов Ю.Д., Юров В.Н., Гляненко А.С. и др. “Рентгеновский и гамма-спектрометр ГРИС на Российском сегменте Международной Космической Станции” // 2012. Вест. НИЯУ «МИФИ». Том 1. № 2. С. 139-145.

4. Kotov Yu.D., Yurov V.N., Trofimov Yu.A. et al. “Solar gamma-ray spectrometer GRIS onboard the International Space Station” // 2015. Adv. Space Res. Vol. 56. P. 1797-1804.

5. Trofimov Yu.A., Kotov Yu.D., Yurov V.N. et al. “Simulation of GRIS spectrometer response to the solar gamma-ray flare of 23 July 2002” // 2017. IOP Conf. Series: J. of Phys. Vol. 798.