

УДК 629.786.2:52.728

ПЕРВЫЙ ЭТАП КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА “БТН-НЕЙТРОН” НА БОРТУ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

© 2010 г. В. И. Третьяков¹, И. Г. Митрофанов¹, Ю. И. Бобровницкий², А. В. Вострухин¹,
Н. А. Гунько³, А. С. Козырев¹, А. В. Крылов⁴, М. Л. Литвак¹, М. Лопез-Алегрия⁵, В. И. Лягушин⁶,
А. А. Коновалов¹, М. П. Коротков², П. В. Мазуров⁶, М. И. Мокроусов¹, А. В. Малахов¹,
И. О. Нуждин¹, С. Н. Пономарева², М. А. Пронин⁶, А. Б. Санин¹, Г. Н. Тимошенко⁴,
Т. М. Томила², М. В. Тюрин⁶, А. И. Цыган³, В. Н. Швецов⁴

¹Институт космических исследований РАН, г. Москва

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва

³Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург

⁴Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

⁵Джонсоновский центр по космическим полетам НАСА, г. Хьюстон, Техас, США

⁶Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева, г. Королев

⁷Центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина, г. Звездный

Поступила в редакцию 28.08.2008 г.

Приводится описание целей и задач космического эксперимента “БТН-Нейтрон” по регистрации быстрых и тепловых нейтронов, рентгеновского и гамма-лучей на борту Российского сегмента Международной космической станции. Приводятся характеристики и краткое описание научной аппаратуры БТН-М1 для этого эксперимента и представляются первые результаты работы аппаратуры на станции за первые два года полета.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение нейтронного и гамма фона в околоземном пространстве на пилотируемых и автоматических орбитальных космических аппаратах началось с первых полетов в космос и продолжается в настоящее время. Такие эксперименты проводились и проводятся пассивным и активным методами. В первом случае измерения ведутся с помощью пассивных детекторов и к таким экспериментам можно отнести многочисленные эксперименты на орбитальной станции *Мир* [1, 2] и эксперимент SSNTD на борту *Международной космической станции (МКС)* [3]. Обработка детекторов на борту или на Земле дает интегральную информацию о спектрах частиц за время экспозиции, но этот метод не позволяет изучать временную динамику потоков нейтронов и гамма-лучей в зависимости от состояния солнечной активности. Второй, активный, метод предусматривает проведение бортовых экспериментов с помощью нейтронных и гамма спектрометров с непрерывной регистрацией потоков излучения и передачей данных измерений по радиоканалу на Землю. На основе второго метода были выполнены эксперименты DOSIMIR на станции *Мир* [4] и DOSTEL на *МКС* [5]. Этот метод позволяет получать значительно больший объем полезной научной инфор-

мации, хотя требует более сложной аппаратуры. Проведение измерений нейтронного и гамма фона в реальном времени позволяет успешно решать задачи радиационной защиты экипажа и аппаратуры во время длительного космического полета. К такому типу активных экспериментов относится космический эксперимент “БТН-Нейтрон”, первый этап которого проводится в настоящее время на борту Российского сегмента (РС) *МКС*.

Этот космический эксперимент “БТН-Нейтрон” по измерению потоков нейтронов на околоземной орбите в широком диапазоне от тепловых энергий до энергий выше 100 МэВ был предложен еще в 1997 году в ходе обсуждения научной программы *МКС*. Согласно исходной концепции, предложенной Институтом космических исследований РАН, в эксперименте предполагалась регистрация нейтронов в широком энергетическом диапазоне несколькими детекторами комплекса аппаратуры с общим названием Бортовой Телескоп Нейтронов (БТН). Эти измерения должны были обеспечить полный набор данных для физической интерпретации и однозначного отождествления различных компонентов нейтронного излучения в околоземном космическом пространстве — потока нейтронов от верхней атмо-

сферы, от конструкции *МКС* и от солнечных протонных событий (СПС).

В 2001 году NASA направило к Марсу космический аппарат *Mars Odyssey* для глобального изучения поверхности красной планеты с круговой полярной орбиты. В состав полезной нагрузки этого аппарата вошел комплекс гамма-спектрометра GRS для изучения гамма и нейтронного излучения с поверхности Марса. В комплекс GRS входят детектор гамма-излучения на основе охлаждаемого высокочистого германия, созданный в Университете штата Аризона США, нейтронный спектрометр для тепловых и эпитепловых нейтронов, созданный в Лос-Аламосской Национальной Лаборатории США и также российский детектор нейтронов высоких энергий ХЕНД (от английского High Energy Neutron Detector), созданный в ИКИ РАН. Возможность проведения таких измерений с околомарсианской орбиты допускает тонкая атмосфера Марса, которая свободно пропускает к поверхности планеты космические лучи и также практически без поглощения пропускающая в космос образовавшиеся в грунте вторичные нейтроны и гамма-фотоны, причем спектральная плотность потока вторичного ядерного излучения определяется элементным составом вещества грунта.

В настоящее время прибор ХЕНД продолжает успешно работать на борту аппарата *Mars Odyssey*, и по решению NASA научные измерения планируется продолжить как минимум до октября 2010 года. Полученные данные продемонстрировали высокий исследовательский потенциал методов ядерной физики для изучения состава и строения вещества верхнего слоя небесного тела, испытывающего бомбардировку энергичными частицами космических лучей. По данным измерений нейтронов прибором ХЕНД и другими приборами комплекса GRS было установлено, что приполярные районы Марса, расположенные выше 60-го градуса северной и южной широты, являются вечной мерзлотой с высоким содержанием водяного льда, количество которого в грунте может достигать 50–70% по массе [6]. Накопленные за более чем три марсианских года данные также позволили изучить динамику сезонных процессов конденсации снега из атмосферной углекислоты на поверхности Марса [7]. Данные прибора ХЕНД также позволили оценить вклад нейтронной компоненты в радиационный фон на марсианской орбите в условиях спокойного Солнца и во время СПС. Было показано, что мощные СПС могут внести основной вклад в суммарную годовую дозу радиации на поверхности Марса, и поэтому вопрос их прогнозирования и мониторинга будет иметь первостепенное значение при проектировании будущих межпланетных экспедиций.

После запуска космического аппарата *Mars Odyssey* в распоряжении ИКИ РАН остался запасной летный образец прибора ХЕНД, который было предложено использовать в качестве детекторного блока аппаратуры БТН-М1 для проведения первого этапа КЭ “БТН-Нейтрон”. Такой подход также позволяет провести синхронные измерения на околоземной и марсианской орбитах для одновременного “стереоскопического” наблюдения солнечной активности и изучения вариаций нейтронного фона.

Научная аппаратура БТН-М1 была разработана и изготовлена в ИКИ РАН. В создании аппаратуры принимали участие Специальное конструкторское бюро ИКИ РАН; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; Объединенный институт ядерных исследований; Институт медико-биологических проблем РАН. Отработка действий экипажа по монтажу детекторного блока на внешней поверхности модуля “Звезда” РС *МКС* во время внекорабельной деятельности (ВнеКД) проводилась в Центре подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина. Управление аппаратурой, сбор и хранение первичной телеметрической и целевой информации производится Центром Управления Полетами ЦНИИМАШ.

Важнейшим заключительным этапом подготовки эксперимента был монтаж научной аппаратуры на борту *МКС* участниками 14-ой основной экспедиции. Во-первых, эта работа включала установку блока электроники БТН-МЭ внутри модуля “Звезда” и прокладку внутренних кабелей для подключения к служебным системам станции. Эта работа была проделана экипажем *МКС* в ноябре 2006 года. Во-вторых, во время двух выходов экипажа *МКС* в открытый космос была проведена установка блока детектирования на внешней поверхности модуля “Звезда” и его подключение через герморазъемы к электрическим системам РС *МКС*. Во время первого выхода 23.XI.2006 года из-за насыщенной программы ВнеКД удалось провести только механическую установку блока детектирования и подключение кабеля энергопитания. Следует отметить, что решение о проведении этого подключения было предложено экипажем в критических условиях существенного превышения регламентной продолжительности пребывания в открытом космосе. Предложение экипажа было принято группой управления в ЦУП-М и благодаря этому было обеспечено электропитание автоматической системы обеспечения теплового режима (АСОТР) блока детектирования, что фактически предотвратило его выход из строя из-за переохлаждения в отключенном состоянии. Во втором выходе 22.II.2007 года экипаж успешно завершил подключение второго командно-телеметрического кабеля, после чего

по командам с Земли было проведено включение аппаратуры.

В настоящее время научная аппаратура БТН-М1 подключена к системам электропитания и сбора телеметрии и обеспечивает научные измерения в штатном режиме с ежесуточной передачей данных измерений и служебной информации на Землю.

2. НЕЙТРОНЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Известно, что нейтроны на высоте орбиты *МКС* образуются в трех физических процессах. Во-первых, энергичные протоны и ионы галактических космических лучей и радиационных поясов земной магнитосферы генерируют нейтроны с энергиями около 10–20 МэВ вследствие ядерных реакций в верхней атмосфере Земли. Образовавшиеся вторичные нейтроны замедляются в веществе атмосферы, часть из них поглощается в ядерных реакциях захвата с образованием новых ядер, другая часть распадается, но значительная доля покидает атмосферу и выходит в околоземное космическое пространство [8] формируя так называемое “нейтронное альbedo” Земли. Поток и энергетический спектр нейтронов альbedo меняются и во времени и в пространстве, так как они зависят от потока и энергии заряженных частиц в магнитосфере, а также от плотности, температуры и состава верхних слоев атмосферы.

Во-вторых, в окрестности *МКС* возникает собственное наведенное нейтронное излучение от взаимодействия энергичных заряженных частиц магнитосферы с веществом самой станции [9, 10]. Эти потоки локальных нейтронов присутствуют вокруг станции в области с характерным масштабом порядка ее размеров, и они также изменяются вдоль орбиты станции вследствие неоднородности потоков заряженных частиц.

Третья причина наличия нейтронов в околоземном космическом пространстве связана с активностью Солнца. Известно, что во время некоторых мощных СПС в активных областях Солнца генерируются потоки нейтронов высоких энергий [11]. Время жизни нейтрона — около 15 минут — сравнимо со временем пролета релятивистских частиц от Солнца до орбиты Земли, и поэтому значительная доля высокоэнергичных солнечных нейтронов может достичь окрестности Земли.

Впервые солнечные нейтроны были зарегистрированы во время солнечной вспышки 21.VI.1980 году прибором GRS, установленном на исследовательском спутнике *NASA Solar Maximum Mission (SMM)* [12]. Впоследствии солнечные нейтроны регистрировались этим же прибором на *SMM* [13], прибором *СОНГ* на космическом

аппарате *КОРОНАС-Ф* [14] и в совместных измерениях наземных нейтронных мониторов и аппаратуры космической обсерватории *Интеграл* [15]. Были измерены энергетические спектры и потоки нейтронов у Земли и были получены оценки полного потока нейтронов, генерируемых в активной области на Солнце. Эти оценки особенно важны в связи с тем, что потоки нейтральных нейтронов и гамма-лучей не искажаются межпланетным магнитным полем и отображают процессы ускорения заряженных частиц до релятивистских энергий в активных областях солнечных вспышек.

Следует учитывать, что во время СПС существенно (на порядки) возрастает протонная компонента космических лучей, и соответственно возрастают потоки вторичных нейтронов от атмосферы Земли и от самой станции. Поэтому для оценки доли солнечных нейтронов в общем числе регистрируемых частиц необходим детальный анализ вкладов всех трех источников нейтронного излучения в околоземном космическом пространстве — земной атмосферы, вещества станции и активных областей Солнца.

3. ЦЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Основные цели эксперимента. Основными целями эксперимента “БТН-Нейтрон” являются:

1) Построение карты вторичного нейтронного излучения верхней атмосферы Земли с учетом эффектов долготы и широты точки измерения, времени суток, состояния магнитосферы и верхней атмосферы.

2) Измерение нейтронной компоненты излучения Солнца во время СПС.

3) Построение физической модели локального фона нейтронов от *МКС* в различных условиях орбитального полета.

Дополнительными целями эксперимента на первом этапе являются:

4) Синхронные измерения приборами ХЕНД на марсианской орбите и БТН-М1 на околоземной орбите эффектов повышения нейтронной компоненты радиационного фона в космическом пространстве в окрестностях Марса и Земли во время СПС.

5) Регистрация космических гамма-всплесков в окрестности Земли для участия в программе межпланетной триангуляции для определения направления на вспыхнувший источник гамма-излучения.

6) Исследование радиационной стойкости образцов новых сцинтилляционных материалов для оценки возможности их использования для регистрации гамма-лучей и нейтронов в будущих космических экспериментах.

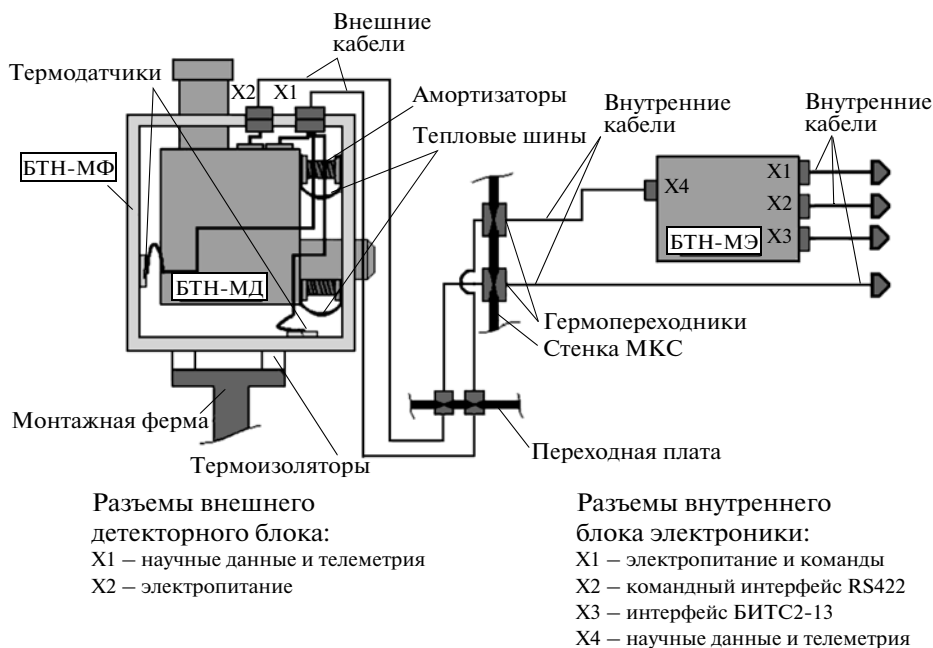


Рис. 1. Структурная схема научной аппаратуры.

3.2. Ожидаемые результаты первого этапа эксперимента. В ходе проведения первого этапа эксперимента “БТН-Нейтрон” предполагается проведение следующих исследований с целью получения практических результатов:

1) Изучение зависимости вторичного нейтронного излучения генерируемого в верхней атмосфере Земли под действием ГКЛ от долготы и широты точки измерения, от времени суток, от состояния атмосферы и характеристик потоков заряженных частиц в радиационных поясах. Исследование эффекта повышенного нейтронного фона в области Южной Атлантической магнитной аномалии (ЮАМА) и на высоких геомагнитных широтах в разных фазах солнечного цикла от минимума в 2007–2009 годах до максимума в 2012–2013 годах.

2) Построение модели генерации нейтронов в активных областях Солнца на основе сопоставления результатов измерений потоков высокоэнергичных нейтронов с данными измерений рентгеновского и гамма-излучения и регистрации высокоэнергичных протонов другими космическими аппаратами.

3) Создание оперативной модели нейтронной обстановки на борту МКС для контроля радиационных условий и выработки рекомендаций по минимизации дозы облучения экипажа.

4) Сравнение на основании данных экспериментов “БТН-Нейтрон” и ХЕНД нейтронной компоненты радиационного фона на околоземной орбите и на орбите около Марса для выработ-

ки прогноза вклада нейтронов в радиационную обстановку на борту межпланетного космического аппарата в разные периоды солнечной активности.

5) Предоставление данных о регистрации космических гамма-всплесков в международную программу межпланетной триангуляции и определения координат источников всплеска на небесной сфере.

6) Измерение эффектов радиационного поражения новых сцинтилляционных кристаллов $\text{LaBr}_3 : \text{Ce}^{3+}$, $\text{LaCl}_3 : \text{Ce}^{3+}$, $(\text{Lu}_{0.5}\text{Y}_{0.5})\text{AlO}_3 : \text{Ce}^{3+}$, $(\text{Lu}_{0.7}\text{Y}_{0.3})\text{AlO}_3 : \text{Ce}^{3+}$, $(\text{Lu}_2\text{SiO}_5) : \text{Ce}^{3+}$, $(\text{YAlO}_3) : \text{Ce}^{3+}$, $(\text{LuAlO}_3) : \text{Ce}^{3+}$ и $(\text{LuY})\text{SiO}_5 : \text{Ce}^{3+}$ в условиях космического полета для оценки их применимости в перспективных космических детекторах гамма-лучей и нейтронов, в том числе для последующих этапов космического эксперимента “БТН-Нейтрон”.

4. ОПИСАНИЕ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ БТН-М1

4.1. Состав аппаратуры БТН-М1. В состав научной аппаратуры БТН-М1 входят два блока: детекторная сборка БТН-МД-МФ с габаритными размерами $594 \times 462 \times 220$ мм, массой 11.5 кг и максимальным штатным энергопотреблением 14.7 Вт размещаемая на внешней поверхности модуля “Звезда” и внутренний блок электроники БТН-МЭ с габаритами $255 \times 265 \times 115$ мм, массой

3.4 кг и максимальным энергопотреблением 3.4 Вт (рис. 1).

Также в состав аппаратуры входят: комплект кабелей для подключения аппаратуры вне и внутри станции общей массой около 14.4 кг; две касеты с габаритами 110 × 140 × 195 мм и массами 1.9 кг и 0.8 кг соответственно, для размещения запасных плат блока электроники и для упаковки плат с дозиметрами и образцами сцинтилляторов при их возврате на Землю после экспозиции на орбите. Полная масса аппаратуры БТН-М1 составляет более 30 кг. Полное энергопотребление в режиме измерений составляет около 18 Вт.

4.2. Устройство внешней детекторной сборки БТН-МД-МФ. Детекторный блок БТН-МД смонтирован внутри коробчатой фермы БТН-МФ, которая выполняет несколько функций.

Во-первых, ферма БТН-МФ обеспечивает оптимальный тепловой режим блока БТН-МД при различных условиях освещенности на борту *МКС*. Для переноса выделяющегося тепла с блока БТН-МД на ферму БТН-МФ установлены медные шины сечением около 30 мм². Сама ферма для сброса тепла имеет два противоположно расположенных излучающих радиатора. АСОТР (Автоматическая Система Обеспечения Тепловых Режимов) блока БТН-МД обеспечивается отдельным энергопитанием от борта и работает независимо от остальной электроники прибора. АСОТР настроена на включение и выключение внутреннего нагревателя при температуре корпуса блока БТН-МД равной –23°C и –18°C, соответственно, что позволяет поддерживать температуру электроники в диапазоне выше –23°C. В блоке БТН-МД также предусмотрен дополнительный нагреватель мощностью 6 Вт, включаемый по дискретной команде с Земли, который используется в условиях сильного охлаждения блока, когда мощность тепловыделения АСОТР не может обеспечить допустимый тепловой режим прибора.

Для уменьшения теплообмена с внешними приборами модуля "Звезда", на которые монтируется детекторная сборка БТН-МД-МФ, на посадочные места фермы БТН-МФ установлены специальные теплоизолирующие втулки-мости. Сборка из блока БТН-МД и фермы БТН-МФ покрыта многослойной экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ), за исключением радиаторов, посадочных мест для стыковки с переходной платформой и электрических разъемов. Таким образом, внешняя детекторная сборка полностью теплоизолирована от *МКС* и имеет свою автономную систему терморегуляции. Во избежание переохлаждения блока БТН-МД на этапе установки во время ВнеКД оба радиатора фермы временно закрываются термоизолирующими чехлами из ЭВТИ. Чехлы снимаются экипажем после установки детекторного блока на

штатное место и подключения энергопитания. Для контроля температурного режима фермы БТН-МФ на одном из ее радиаторов и на посадочном месте размещены два термодатчика ТП-18-05, данные с которых передаются на Землю в составе служебной информации практически на каждом витке.

На этапе разработки аппаратуры проводилось численное моделирование тепловых условий работы внешнего детекторного блока для различных условий освещенности, и полученные результаты проверялись на этапе испытаний аппаратуры в термовакуумной камере Контрольно-испытательного стенда ИКИ РАН. Данные измерений после начала летных испытаний аппаратуры БТН-М1 подтвердили правильность выбранных технических решений обеспечения оптимального теплового режима блока для всех режимов полета *МКС*.

Во-вторых, ферма БТН-МФ также обеспечивает защиту узлов детекторов и электроники от разнообразных механических воздействий. Например, в связи с необходимостью демпфирования вибраций на борту *МКС*, которые могли привести к электрическим шумам от "микрофонного эффекта" в фотоэлектронных умножителях (ФЭУ), блок БТН-МД смонтирован внутри фермы БТН-МФ с использованием 4-х специальных механических амортизаторов, разработанных при непосредственном участии Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (г. Москва).

В-третьих, на ферме БТН-МФ размещены электрические разъемы X1 и X2 типа РС50, к которым изнутри подведены кабели с разъемов блока БТН-МД и с термодатчиков. Разъем X1 предназначен для передачи научных и телеметрических данных в блок БТН-МЭ и для получения с него команд управления. Разъем X2 предназначен для подачи электропитания на электронику и на АСОТР блока БТН-МД. Ферма БТН-МФ имеет также перемычку металлизации, которая крепится к кронштейну, обеспечивая тем самым, через замки переходной платформы, заземление внешнего детекторного блока на корпус станции.

Для выполнения научных задач требовалось, чтобы при штатной установке блок БТН-МД был сориентирован так, чтобы ось сцинтиллятора блока была направлена в зенит. К этому добавлялись требования временного хранения аппаратуры внутри *МКС*, возможности монтажа и демонтажа оборудования при работе в скафандре и обеспечения доступа к поручням после установки блока. С учетом этих требований конструкторы РКК "Энергия" создали специальное монтажно-установочное устройство, на которое монтировалась сборка БТН-МД-МФ, включающее кронштейн, переходную платформу и три быстрозъемных замка

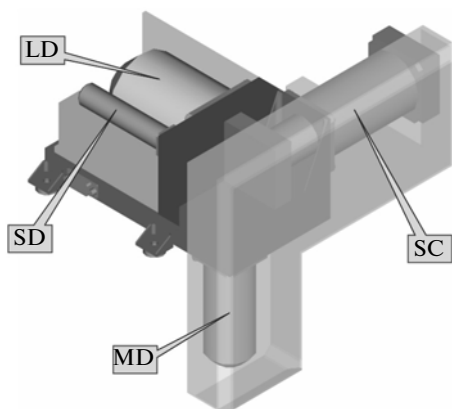
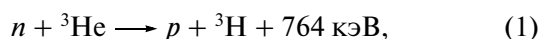


Рис. 2. Структурная схема блока БТН-МД.

4.3. Блок детектирования нейтронов и гамма-квантов БТН-МД. Блок детектирования БТН-МД представляет собой запасной летный образец прибора ХЕНД (рис. 2). Этот прибор представляет собой спектрометр с четырьмя независимыми детекторами нейтронов. Три детектора эпитепловых нейтронов (на рис. 2 обозначены как SD, MD, LD) представляют собой пропорциональные газовые счетчики на основе ^3He и четвертый детектор нейтронов высоких энергий (на рис. 2 обозначен как SC) изготовлен из стильбена $\text{C}_{14}\text{H}_{12}$, окруженного активной антисовпадательной защитой из кристалла $\text{CsI} : \text{Ti}^{3+}$.

Регистрации нейтронов в счетчиках на основе ^3He происходит в реакции захвата с образованием протона и ядра трития (тритона):



которые регистрируются благодаря вызываемой ими ионизации. Выделившаяся в этой реакции энергия 764 кэВ делится между тритоном и протоном в пропорции 1 : 3, т.е. 191 кэВ (25%) уносит тритон и 573 кэВ (75%) уносит протон. Если реакция происходит вблизи стенки счетчика, то частицы могут покинуть регистрирующий объем, и в счетчике может выделяться только часть исходной энергии. Поэтому спектр энергосодержания при регистрации нейтронов ^3He счетчиком имеет характерную форму с двумя пиками, начинающимися на энергии 191 кэВ (порог реакции) и энергии 764 кэВ (пик полного поглощения). Сечение реакции захвата (1) растет обратно пропорционально относительной скорости нейтрона и ядра ^3He , и поэтому эффективность регистрации нейтронов увеличивается при уменьшении энергии нейтрона и становится максимальной для тепловых нейтронов.

Сигналы со счетчика подаются на вход зарядочувствительного предусилителя и затем на аналого-цифровой преобразователь. Измерение энер-

гетического спектра реакции (1) позволяет надежно разделить события связанные с регистрацией нейтронов от вклада заряженных частиц и/или от электрических шумов.

Три детектора SD, MD и LD выполнены на основе промышленных нейтронных счетчиков LND2517, заполненных ^3He при давлении 6 атмосфер с небольшой добавкой CO_2 .

Эти детекторы имеют полиэтиленовые оболочки разной толщины, что обеспечивает разную степень замедления налетающих нейтронов до тепловых энергий, при которых их регистрация максимально эффективна. Каждый счетчик также окружен экраном из кадмиевой фольги, которая практически не пропускает нейтроны с энергиями < 0.4 эВ из-за очень большого сечения поглощения кадмия. Детектор SD с оболочкой из полиэтилена толщиной 2 мм имеет максимум чувствительности в диапазоне энергий нейтронов от 0.4 эВ до 1 кэВ. Детектор MD с полиэтиленовым замедлителем толщиной 15 мм имеет диапазон максимальной чувствительности для нейтронов с энергиями от 10 эВ до 100 кэВ. Детектор LD имеет толстый двойной замедлитель общей толщиной около 30 мм. Он имеет максимальную чувствительность в диапазоне энергий от 10 эВ до 1 МэВ.

Четвертым детектором нейтронов является сцинтиллятор на основе кристалла стильбена $\text{C}_{14}\text{H}_{12}$. Этот детектор предназначен для регистрации нейтронов высоких энергий в диапазоне от 400 кэВ до 10 МэВ в 16 спектральных каналах. Стильбен является органическим сцинтилляционным кристаллом с высоким содержанием водорода. При регистрации нейтрона с энергией E_n происходит выбивание из кристаллической решетки протона отдачи с энергией $E_p < E_n$, который создает сцинтилляционную вспышку, интенсивность которой пропорциональна энергии частицы (сигнал SC/IN/N) и которая регистрируется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) типа Hamamatsu R1924. В стильбене также может происходить поглощение гамма-квантов с образованием свободного электрона, который также вызывает вспышку (сигнал SC/IN/G). Формы электрических импульсов с ФЭУ при регистрации протонов и электронов существенно различаются [16]. Специальная электронная схема фиксирует это различие и позволяет разделить эти два класса событий с ошибкой, не превышающей 10^{-3} . Внешний сцинтиллятор обеспечивает работу схемы антисовпадения для защиты внутреннего детектора от регистрации внешних заряженных частиц. Внешний детектор выполнен из кристалла $\text{CsI} : \text{Ti}^{3+}$, обладающего большой плотностью и большим атомным номером и являющегося эффективным детектором для заряженных частиц с энергиями вы-

ше 50 кэВ [17]. Регистрация в стильбене отсчета от внешнего протона сопровождается сигналом регистрации заряженной частицы во внешнем сцинтилляторе. На основе этого сигнала отсчеты от протонов космических лучей исключаются из совокупности отсчетов для нейтронных событий. Регистрация всплесков в этом детекторе (сигнал SC/OUT) производится ФЭУ типа R1840 фирмы Hamamatsu.

Таким образом, при штатной работе и базовых настройках логической схемы блок детектирования БТН-МД производит шесть отдельных сигналов от пяти детекторов: три сигнала о регистрации эпитепловых нейтронов от пропорциональных счетчиков SD, MD и LD; сигнал SC/IN/N о регистрации нейтронов высоких энергий во внутреннем сцинтилляторе SC/IN; сигнал SC/IN/G о регистрации гамма фотонов в этом же сцинтилляторе; сигнал SC/OUT о регистрации фотонов и/или заряженных частиц во внешнем сцинтилляторе. В блоке БТН-МД проводится полная обработка всех указанных сигналов — от первичного усиления и амплитудно-цифрового преобразования в 16 спектральных каналах до формирования кадров с научными и телеметрическими данными для передачи в блок БТН-МЭ. За время накопления отдельного кадра в блоке формируются шесть суммарных 16-и канальных спектров отсчетов для каждого сигнала. Продолжительность времени накопления спектров определяется по команде с Земли и может меняться от 1 до 256 с.

В блоке детектирования БТН-МД также реализована логика “всплесковой ячейки”, которая во время накопления текущего кадра обеспечивает запись двух интегральных профилей сигналов SC/IN/G с временным разрешением 1.0 с и SC/OUT с разрешением 0.25 с. В случае если текущий темп счета этих сигналов превысил значение фонового темпа счета в установленное по команде число раз, то эти профили добавляются в кадр научной информации. Прибор также может быть переведен в режим, когда запись профилей при формировании каждого кадра происходит независимо от темпа счета.

Блок БТН-МД имеет только внутреннее время. Привязка данных изменений к бортовому времени МКС производится блоком БТН-МЭ, который раз в 5 минут синхронизирует внутреннее время прибора по метке времени, получаемой от бортового блока сервера полезной нагрузки (БСПН). Логикой работы блока предусмотрены три режима работы блока: “дежурный”, “основной научный” и “сокращенный научный” с запретом регистрации гамма-всплесков. В дежурном режиме научные измерения не проводятся. Электроника блока выполняет переданные ей команды, проводит измерения температуры в шести

точках аппаратуры и передает в систему телеметрии кадры служебной информации. В основном научном режиме, который также является режимом работы “по умолчанию”, в блоке БТН-МД формируются кадры научной информации, включающие данные измерений всех шести физических сигналов и гамма профили с временным разрешением 1.0 с и 0.25 с. Продолжительность накопления суммарных спектров отсчетов для каждого сигнала (продолжительность формирования отдельного кадра) определяется периодичностью подачи сигнала синхронизации в блок БТН-МД от БТН-МЭ. При получении указанного сигнала логический узел блока БТН-МД завершает накопление спектров и запись профилей отсчетов, передает сформированный кадр в блок БТН-МЭ и начинает запись нового кадра данных.

В третьем сокращенном режиме также проводятся измерения всех шести физических сигналов, но профили гамма сигналов не записываются, что обеспечивает экономное использование телеметрического ресурса на станции. Этот режим используется при наличии ограничений на точный объем передаваемых данных. Полное техническое описание электроники аппаратуры и программного обеспечения для него приведено в [18].

4.4. Блок электроники БТН-МЭ. Блок электроники БТН-МЭ содержит платы электроники, предназначенные для согласования электрических интерфейсов блока БТН-МД, которые соответствуют требованиям космического аппарата *Mars Odyssey* и интерфейсов электрических систем CM PC МКС. Внешние интерфейсы блока БТН-МЭ обеспечивают электрическое питание, передачу команд управления и телеметрии, а также трансляцию сигналов временной привязки от систем МКС. Внутренние интерфейсы обеспечивают энергопитание, передачу команд управления, прием кадров научной информации и синхронизацию формирования кадров для блока БТН-МД.

Блок БТН-МЭ обеспечивает решение следующих функциональных задач:

1. Выработку и передачу логического сигнала SYNC, по которому в детекторном блоке БТН-МД завершается запись предыдущего кадра измерений, происходит его считывание, и начинается запись следующего кадра. Промежуток времени между последовательными сигналами SYNC может быть установлен по цифровой команде в пределах от 1 до 256 с. Выбор этого промежутка определяет временное разрешение прибора (время накопления) и объем научной информации;

2. Считывание научных данных с внешнего блока БТН-МД, хранение и передачу телеметрической информации в БИТС2-12 в режиме непосредственной передачи (НП) на Землю. Объем

внутренней памяти блока БТН-МЭ составляет 1 Мбайт. При установке времени одного измерения 1 с (соответствует периодичности 1 с для посылки SYNC) полный суточный объем информации, включающей научные и служебные данные, составляет около 2.7 Мбайт. Для обеспечения непрерывности измерений в этом случае необходимо обеспечить как минимум 3 сеанса НП в сутки. Оптимальным для работы с системами РС МКС является режим измерений, при котором время накопления составляет 60 с. При этом полное время сброса суточной информации объемом около 1 Мбайт через системы передачи БИТС2-12 составляет порядка 3-х минут;

3. Прием и исполнение дискретных команд получаемых с бортовой системы БИТС2-12 и прием цифровых команд по интерфейсу RS-422 получаемых с сервера БСПН управляющего научной аппаратурой РС МКС. Часть этих цифровых команд транслируется во внешний блок для исполнения, другая часть исполняется самим блоком БТН-МЭ;

4. Размещение специальных плат с пассивными детекторными сборками (ПДС), включающими кристаллы для перспективных сцинтилляционных детекторов и пассивные дозиметры. Эти ПДС используются на первом этапе КЭ для исследования радиационной стойкости сцинтилляторов и оценки их применимости для создания аппаратуры для других КЭ, в том числе для последующих этапов КЭ “БТН-Нейтрон”.

На корпусе БТН-МЭ размещены электрические разъемы Х1–Х4 типа РС50, к которым изнутри подведены кабели от бортовых систем РС МКС. Разъем Х1 предназначен для электропитания, разъем Х2 — для получения цифровых команд и временной привязки с БСПН, разъем Х3 — для передачи дискретных команд и телеметрических данных в БИТС2-12. Через разъем Х4 осуществляется связь с внешним детекторным блоком, в том числе получение научных и телеметрических данных и передача команд управления.

5. УПРАВЛЕНИЕ АППАРАТУРОЙ И ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ

Аппаратура БТН-М1 управляется командами двух типов — дискретными (релейными) и цифровыми. Детекторный блок БТН-МД управляется внутренними цифровыми командами по интерфейсу RS-422, которые формируются и поступают от блока электроники БТН-МЭ. Блок электроники БТН-МЭ управляется внешними цифровыми командами также по интерфейсу RS-422 от БСПН и внешними дискретными командами от Системы управления бортовой автоматикой (СУБА) РС МКС. Внешние цифровые команды изменяют режим работы БТН-МД, устанавливают параметры

измерений (пороги дискриминатора, значения высокого напряжения на детекторах, продолжительность времени накопления, логику антисовпадения и др.), определяют условия работы АСОТР и пр. Внешние дискретные команды “Включение БТН-МЭ”, “Отключение БТН-МЭ”, “1-й полукомплект”, “2-й полукомплект”, “Сброс массива”, “Конец сброса массива” предназначены для управления блоком БТН-МЭ и для включения блока БТН-МД в научный режим в условиях, когда невозможна подача на него цифровых команд от БСПН, или когда необходимо провести диагностику работы логического цифрового интерфейса блока в нештатных ситуациях. При невозможности подачи цифровых команд для перевода блока в БТН-МД научный режим и его настройки предусмотрена возможность его включения в сокращенный научный режим с настройками “по умолчанию” с помощью циклограммы дискретных команд.

Для передачи на Землю данных измерений научная аппаратура БТН-М1 использует штатную систему телеметрии БИТС2-12 МКС. Кадры с научной и служебной информацией накапливаются в собственной памяти блока БТН-МЭ с объемом 1 Мбайт и передаются в БИТС2-12 и далее на Землю в сеансах радиосвязи. В зависимости от режима работы аппаратуры изменяется структура и размер единичного кадра телеметрии, содержащего научную и служебную телеметрическую информацию. В дежурном режиме кадр БТН-МД имеет размер 56 байт; в научном режиме с постоянно включенной регистрацией всплесков кадр имеет размер 512 байт; в сокращенном научном режиме кадр имеет размер 212 байт. При установке времени накопления 60 с суммарная информативность прибора за сутки составит 150 кбайт для дежурного режима и 850 кбайт/сутки для основного научного режима. К каждому кадру формируемому блоком БТН-МД блок электроники БТН-МЭ добавляет заголовок с собственной телеметрией объемом 64 байт. В этой дополнительной информации отображаются температуры на ферме БТН-МФ, внутри блока БТН-МЭ и также служебные данные о его состоянии.

6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРОВ И ФИЗИЧЕСКИЕ КАЛИБРОВКИ

При разработке блока БТН-МД для оценки чувствительности нейтронных детекторов использовались численные методы расчета на основе методов Монте-Карло. В численном моделировании, проведенном с участием ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и ОИЯИ использовались как самостоятельно созданные программы, так и общепринятая программа расчета ядерных процессов MCNPX распростра-

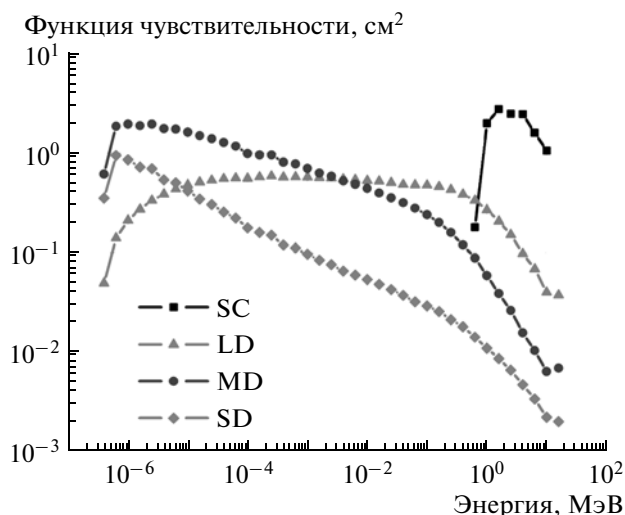


Рис. 3. Расчетные кривые функций чувствительности для нейтронных детекторов.

няемая Oak Ridge National Laboratory, США [http://rsicc.ornl.gov]. Целью моделирования было построение функций отклика детекторов нейтронов на всем энергетическом диапазоне от кадмиевого порога 0.4 эВ до 10 МэВ и сопоставление результатов численных расчетов с экспериментальными значениями, которые были получены для отдельных значений энергий нейтронов. На рис. 3 приведены расчетные кривые функций отклика для пропорциональных счетчиков и стильбенового сцинтиллятора. Видно, что прибор регистрирует нейтроны в широком диапазоне энергий от кадмиевого порога (около 0.4 эВ) до энергий более 10 МэВ с достаточно высокой эффективностью.

Для проверки расчетов в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (г. Дубна), были проведены физические калибровки детекторов прибора. Эти калибровки включали как измерения с использованием изотопных источников нейтронов на основе Cf^{252} и Pu-Be , так и измерения на пучке нейтронов от литиевой мишени на линейном ускорителе протонов. В последнем случае энергия нейтронов определялась геометрией рассеяния протонов на литии и для разных углов составляла около 100 кэВ, 500 кэВ и 900 кэВ. Детектор устанавливался на оси нейтронного пучка на расстояниях 50 см и 1.5 м от литиевой мишени. Во время всех измерений падающий поток нейтронов измерялся монитором нейтронов. На рис. 4 представлено сравнение расчетных кривых с физическими измерениями для пропорциональных счетчиков и стильбенового сцинтиллятора.

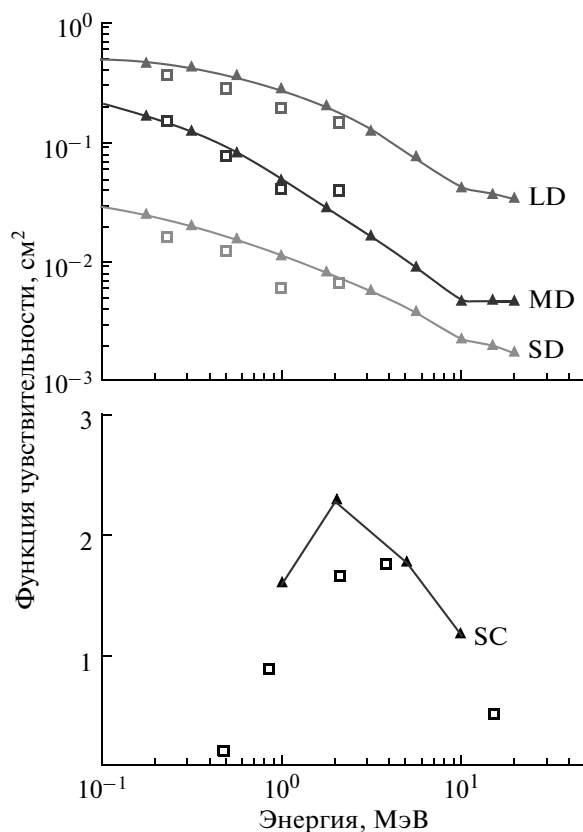


Рис. 4. Сравнение расчетных кривых функций отклика и результатов экспериментальных калибровок для пропорциональных счетчиков (верхний график) и стильбенового сцинтиллятора (нижний график). Квадратами показаны данные измерений, треугольниками – расчетные кривые.

7. НАЧАЛО КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

7.1. Первичная обработка данных измерений.

Первое включение аппаратуры было выполнено 26.11.2007 года. Включение в режим сокращенных научных измерений с настройками “по умолчанию” производилось дискретными командами. Привязка по времени производилась по времени включения детекторного блока. В настоящее время по данным телеметрии электроника детекторного блока и блока электроники работают в штатном режиме, температуры обоих блоков находятся в допустимых пределах.

Передаваемая 1–2 раза за сутки с борта *МКС* научная информация КЭ “БТН-Нейтрон” поступает на хранение в базу данных Информационно-справочной системы и базы данных космических экспериментов РС *МКС* в ЦУП-М. Туда же закладываются сопутствующие данные навигационной и баллистической поддержки, а также данные служебной телеметрии, поступающие в ЦУП по независимым каналам связи.

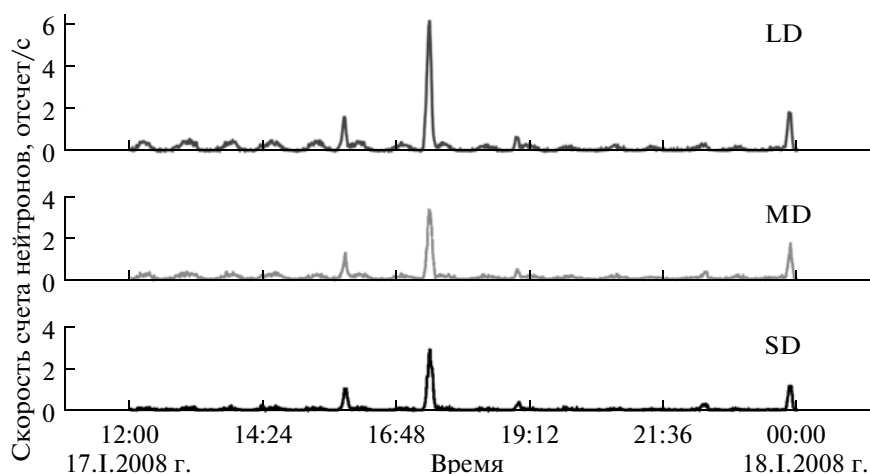


Рис. 5. Временные профили скорости счета нейтронов для пропорциональных счетчиков.

В настоящее время, с учетом потерь информации при передаче данных на Землю, общий объем научных данных и телеметрии без сбоев превышает 90%. Из ЦУП-М вся информация с аппаратуры БТН-М1 копируется в базу данных эксперимента “БТН-Нейтрон” в ИКИ РАН. Среднемесячный объем телеметрии и научных данных составляет от 40 до 60 Мбайт.

Координатная привязка производится на основе расчетов параметров орбиты *МКС* в геодезической системе координат по двухстрочным элементам формата TLE NORAD, представляемым NASA для общего доступа через Интернет [http://www.space-track.org/tle_format.html]. Эти элементы обновляются раз в сутки по данным радиолокационных измерений. Вследствие того, что потоки нейтронного и гамма-излучения в окрестности *МКС* анизотропны, в состав сопроводительной информации включены данные по текущей ориентации *МКС*, которые выдает система навигации РС. Орбитальные и ориентационные параметры для коротких участков орбиты в окрестности наземных информационных пунктов записываются службой слежения ЦУП-М несколько раз в сутки в виде набора координат *МКС*, компонент вектора скорости, кватерниона ориентации и бортового календарного времени в секундах от 6.I.1980 года. Они копируются в БД эксперимента в ЦУП-М и ИКИ РАН, экстраполируются на момент времени начала данного кадра измерений и приписываются к нему в базе ИКИ РАН.

Первичная обработка данных включает их предоставление в виде профилей темпов счета нейтронов и гамма-лучей и аппаратурных спектров отсчетов. На основе привязки профилей к координатам *МКС* происходит создание координатных карт фона нейтронного и гамма-излучения в окрестности *МКС*.

7.2. Первые научные результаты. На начальном этапе КЭ были созданы три основных “научных продукта” эксперимента:

- непрерывная последовательность аппаратурных спектров отсчетов во всех детекторах прибора со временем экспозиции 60 с, которая привязана к всемирному времени;
- непрерывные профили интегральных темпов счета во всех детекторах прибора с разрешением 60 с, которые привязаны к всемирному времени;
- карты для темпов счета в детекторах нейтронов и гамма-лучей с пространственным разрешением 5×5 градусов по долготе и широте в географических координатах.

За период 2007–2009 годов не наблюдались какие-либо проявления солнечной активности, поэтому все профили переменной отсчетов отображали только изменения фоновой обстановки вдоль орбиты *МКС*. На рис. 5 приведены примеры временных профилей отсчетов для детекторов SD, MD и LD для суточных интервалов времени 17.I.2008 года.

Отчетливо выделяется переменный характер профиля с периодом около орбитального периода *МКС*. Такой же периодический характер имеют профили сигналов от быстрых нейтронов и гамма-фотонов в сцинтилляционном детекторе. Периодичность сигналов объясняется пролетом *МКС* через северные и южные приполярные области земной магнитосферы, где увеличение потока заряженных частиц при приближении к полюсам вызывает возрастание потока вторичных нейтронов и гамма-квантов как от верхних слоев земной атмосферы, так и от самой станции. Кроме периодических пиков, на всех профилях наблюдаются возрастания темпов счета во время пролета станции над ЮАМА. Как известно, в районе этой ано-

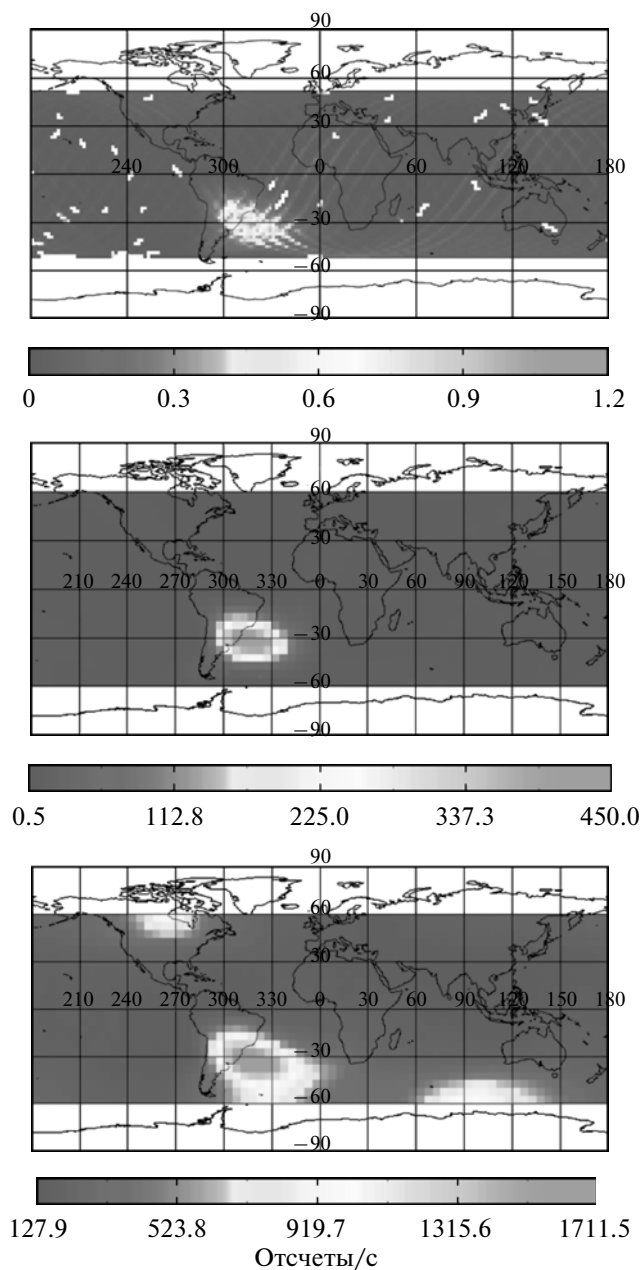


Рис. 6. Карты усредненного темпа счета эпитепловых нейтронов в детекторе MD (верхняя карта), быстрых нейтронов в стильбене (средняя карта) и гамма квантов в CsI : Tl^{3+} (нижняя карта). Разным тоном показаны скорости счета в детекторах. Неоднородности в карте для детектора MD вызваны большой зашумленностью сигнала и вырезанием шумов при построении карты.

малии наблюдается существенное ослабление магнитного поля, и поэтому в ее окрестности потоки заряженных частицы из радиационных поясов могут достигать верхней границы атмосферы.

На рис. 6 показаны карты усредненного темпа счета нейтронов в разных детекторах БТН-М1, построенные по данным за год работы прибора

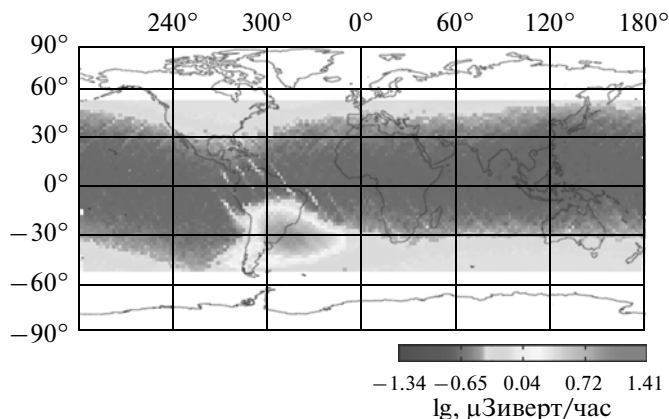


Рис. 7. Карта оценки нейтронной компоненты радиационной дозы на борту МКС по данным “БТН-Нейтрон” за период февраль 2007 года—март 2008 года.

для эпитепловых нейтронов 0.4 эВ—1 МэВ (счетчик MD), для быстрых нейтронов с энергиями 300 кэВ—10 МэВ (сигнал со стильбена SC/IN/N) и для гамма квантов в энергетическом диапазоне 300 кэВ—5 МэВ (сцинтиллятор CsI : Tl^{3+} детектора SC/OUT).

Из-за наклона орбиты МКС такие карты могут быть построены только для широтной полосы от 51° ю.ш. до 51° с.ш. На картах ярко выделяется значительное повышение скорости счета нейтронов и гамма фотонов в районе ЮАМА. Также заметно повышение темпа счета в приполярных областях к югу от Австралии и к северу от Канады, где заряженные частицы радиационных поясов проникают в верхнюю атмосферу в окрестности магнитных полюсов. Асимметричная картина на высоких широтах объясняется наклоном оси геомагнитного диполя к оси вращения Земли. Совокупность большого числа пролетов станции через район ЮАМА позволяет выполнить детальное “сканирование” нейтронного поля в этом районе. Известно, что проникновение заряженных частиц из радиационных поясов в атмосферу в районе аномалии возрастает в периоды солнечного минимума, когда интенсивность галактических космических лучей во внутренней области Солнечной системы особенно высока [19]. В 2007—2009 годах — в минимуме солнечной активности — вклад ЮАМА в формирование нейтронного альбеда Земли оказался весьма значителен. Поэтому данные измерений нейтронного излучения в районе ЮАМА представляются особенно важными — ведь следующая возможность таких измерений представится не раньше 2018 года.

На основе данных измерений нейтронов в энергетическом диапазоне от кадмиевого порога 0.4 эВ до энергий около 1 МэВ были получены усредненные оценки нейтронной компоненты

Измерения радиационной дозы от нейтронов на *МКС* и около Марса

Эксперимент, даты измерения, уровень солнечной активности	Условия измерений, детекторы, диапазон измерений	Оценка скорости накопления дозы на разных участках орбиты, мкЗв/час
Эксперимент BBND на <i>МКС</i> , 23.II.2001–15.XI.2001, максимум 23-го цикла	Внутри <i>МКС</i> , 6 датчиков ^3He , 0.03 эВ–15.0 МэВ	3.5 (экватор) 4.6 (приполярные участки) 12.0 (ЮАМА аномалия)
Эксперимент “БТН-Нейтрон” на <i>МКС</i> , 26.II.2007–настоящее время, половина цикла солнечной активности	Вне <i>МКС</i> , 3 датчика ^3He и один сцинтилляционный детектор, 0.4 эВ–10.0 МэВ	0.2 (экватор) 0.8 (приполярные участки) 5.0 (ЮАМА аномалия)
Эксперимент ХЕНД на <i>Mars Odyssey</i> , 23.X.2001–настоящее время, минимум солнечной активности	Вне <i>Mars Odyssey</i> , 3 датчика ^3He и один сцинтилляционный детектор, 0.4 эВ–10.0 МэВ	0.8–1.1

радиационной дозы в месте размещения аппаратуры БТН-М1 на борту *МКС* для районов с разными географическими координатами вдоль орбиты станции (рис. 7).

Очевидно, что максимальная доза от нейтронов наблюдалась в районе ЮАМА — в 2007 году скорость накопления дозы от нейтронов в этом районе составляла 5–6 мкЗв/час, что в почти в 25 раз превышает скорость накопления на экваторе. В таблице оценки скорости накопления радиационной дозы по данным БТН-М1 сравниваются с результатами измерений японского эксперимента BBND [20] в гермоотсеке лабораторного модуля американского сегмента *МКС* и также с оценкой нейтронной компоненты радиационной дозы полученной по данным измерений прибора ХЕНД на борту *Mars Odyssey* на орбите вокруг Марса.

В рамках выполнения дополнительной задачи эксперимента по регистрации космических гамма-всплесков проводился анализ данных гамма-профилей с детектора CsI : Ti^{3+} с временным разрешением 1 с и 0.25 с. На рис. 8 приведен пример регистрации гамма-всплеска от 15.XII.2008 года прибором БТН-М1 и гамма-детекторами на других космических аппаратах. Хорошо видно соответствие профиля переменности светимости источника гамма-всплеска полученного в эксперимента “БТН-Нейтрон” на *МКС* и на других космических аппаратах.

Так как основное производство нейтронов происходит из-за взаимодействия ГКЛ с атмосферой Земли (для БТН-М1 на *МКС*) и поверхно-

стью Марса (для ХЕНД на *Mars Odyssey*), то по изменению потоков альбедных нейтронов можно оценить изменение потока ГКЛ. В настоящее время Солнце находится в минимуме активности и, соответственно, галактические космические лучи — в максимуме [21]. На рис. 9 приведены графики увеличения потока нейтронов производимых ГКЛ на орбите около Марса и на орбите около Земли. Для эксперимента ХЕНД были взяты данные для периода 2002–2009 годов для приэкваториальной области Solis Planum, где переменность потоков нейтронов обусловлена только изменением потока ГКЛ, а не локальными вариациями состава грунта из-за сезонности. Для БТН-М1 данные взяты для периода 2008–2009 годов для приполярных (45° – 51° с.ш. и 45° – 51° ю.ш.) и приэкваториальных областей (15° ю.ш.– 15° с.ш.).

На том же рисунке приведен график измерений нейтронов производимых ГКЛ в атмосфере Земли по данным нейтронного монитора на антарктической станции Мак-Мердо для периода 2002–2009 годов [22]. Хорошо видно, что для БТН-М1 тренд ярче всего выражен в приполярных областях, где проникновение ГКЛ в атмосферу сильнее всего.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первый этап космического эксперимента “БТН-Нейтрон” с аппаратурой БТН-М1 позволил в 2007–2009 годах измерить нейтронный фон вне гермоотсека *МКС* и изучить его пространственные и временные вариации. В 2010–2012 годах предполагается продолжение этих исследова-

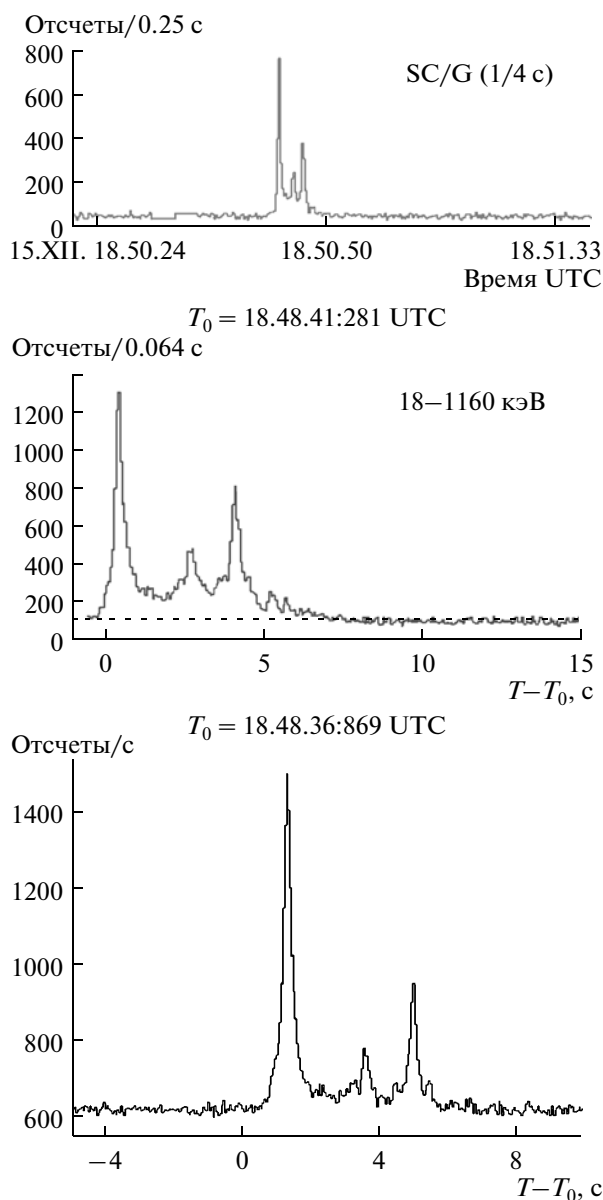


Рис. 8. Пример регистрации гамма-всплеска 15.XII.2008 года по данным БТН-М1 на *МКС* (вверху), прибора КОНУС на КА *Wind* (в середине) и прибора SPIACS на борту КА *Интеграл* (внизу).

ний в условиях начала очередного 24-го цикла солнечной активности. Особый интерес будут представлять данные регистрации нейтронных потоков во время солнечных вспышек, СПС и в периоды возмущений земной магнитосферы. Также будут продолжены работы по сопоставлению изменений потоков нейтронов и интенсивности ГКЛ с привлечением для анализа данных других КЭ и наземных нейтронных мониторов. С началом работ по регистрации гамма-всплесков произошло включение КЭ “БТН-Нейтрон” в международную сеть по локализации гамма-всплесков (GCN Network, [http://gcn.gsfc.nasa.gov]), основанную на методе межпланетной триангуляции для определения на-

правления на источник гамма-всплеска по сравнению данных с различных космических аппаратов.

В настоящее время прорабатываются варианты продолжения эксперимента с дооснащением *МКС* комплектом аппаратуры БТН-М2. В качестве прототипа детекторного блока предлагается использовать нейтронный и гамма-спектрометр НС ХЕНД создаваемый в ИКИ РАН для российской межпланетной автоматической станции *Фобос-Грунт*. Этот прибор предназначен для регистрации нейтронов в широком спектральном диапазоне от тепловых энергий до энергий около 15 МэВ и для измерения энергетического спектра гамма-лучей в энергетическом диапазоне от

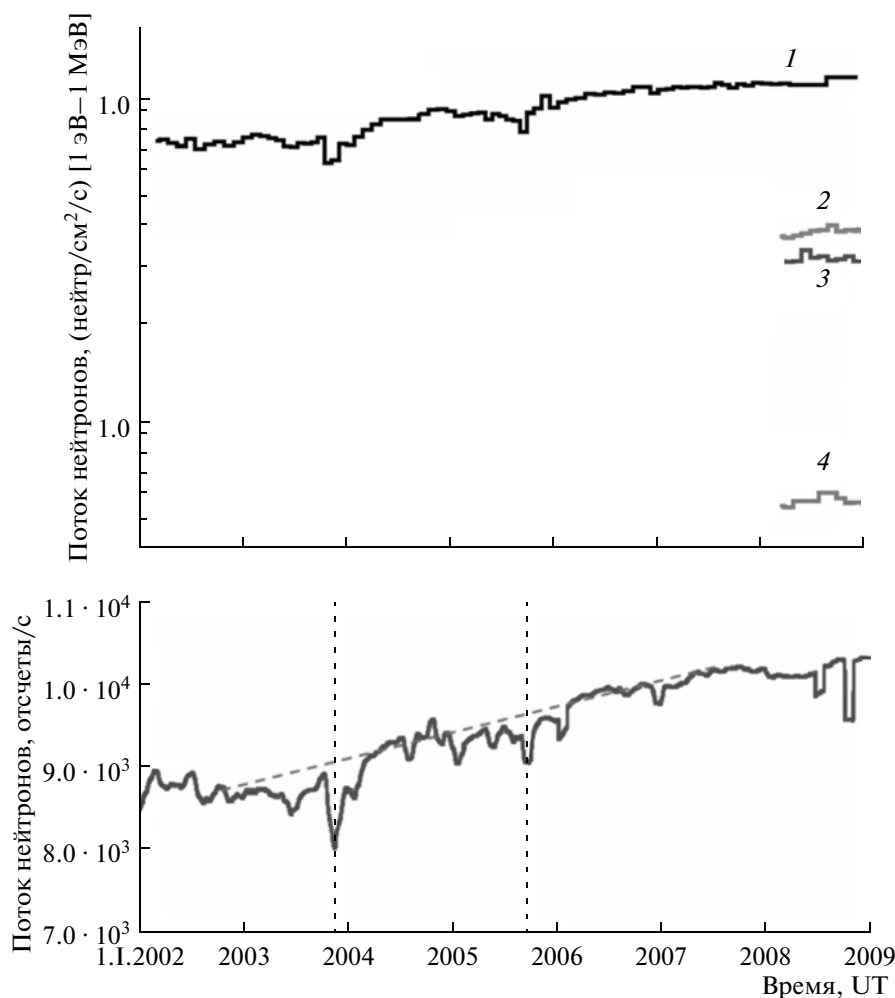


Рис. 9. Графики трендов нейтронных потоков производимых ГКЛ по данным прибора ХЕНД на борту *Mars Odyssey* (кривая 1 на верхнем графике) и БТН-М1 на *МКС* (кривая 2 — для южного региона, 3 — для северного региона и 4 — для экваториальной области). На нижнем графике показано изменение потока нейтронов по данным нейтронного монитора на американской станции Мак-Мердо в Антарктиде.

100 кэВ до 10 МэВ. В этом приборе для регистрации гамма квантов используется новый перспективный кристаллический сцинтиллятор на основе LaBr_3 , образцы которого были испытаны на радиационную стойкость в условиях космического полета на первом этапе эксперимента “БТН-Нейтрон” по программе экспедиций *МКС-14* и *МКС-15* [23]. Этот сцинтиллятор имеет уникально высокое спектральное разрешение около 3% на энергии 662 кэВ. Он предоставит возможность измерить основные линии гамма фона, как от верхней атмосферы Земли, так и от элементов конструкции *МКС*. Эти данные позволят разделить компоненты нейтронного излучения атмосферы и материалов *МКС* в общем нейтронном поле в окрестности станции.

Начало 2-го этапа эксперимента планируется на 2012–2013 годы. Аппаратура БТН-М2 будет размещена в гермоотсеке многоцелевого лабора-

торного модуля (МЛМ) РС *МКС*. В ее состав будет также включен набор экранов для защиты от нейтронов на основе водородсодержащих и борсодержащих соединений, эффективность которых будет испытана на борту *МКС*. Сравнение темпов счета в детекторах для различных вариантов и направлений экранирования позволит оценить пространственное и угловое распределение нейтронного фонового излучения в гермоотсеке МЛМ. Совместная обработка измерений аппаратурой БТН-М1 и БТН-М2 вне и внутри гермоотсеков *МКС* позволит построить трехмерную модель нейтронной и гамма компонент радиационного фона. Будут проведены натурные испытания вариантов радиационной защиты от нейтронного излучения на борту космического аппарата для выработки исходных данных по созданию бортовых радиационных убежищ для экипажей длительных лунных и межпланетных экспедиций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reitz G. European dosimetry activities for the ISS // *Physica Medica*. 2001. V. XVII. Suppl. 1. P. 283–286.
2. Benton E.R., Benton E.V., Frank A.L. Passive dosimetry aboard the MIR orbital station: external measurements // *Radiat. Meas.* 2002. V. 35. P. 457–471.
3. Pálfalvi J.K., Akatov Yu., et al. Cosmic particle induced reaction detection with SSNTD stacks exposed on-board of the International Space Station // 10th International conference on nuclear reaction mechanisms. Varenna. Italy. June 9–13. 2003.
4. Vana N., Schöner W., Fugger M., Akatov Yu. DOSIMIR – Radiation measurements inside the soviet space station MIR – First Results // International Space Year Conference. Munich. 1992. P. 193.
5. Beaujean R., Burmeister S., Petersen F., Reitz G. DOS-TEL Dosimetry data as a part of DOSMAP // 7th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station. Paris. France. 2–4 September 2002.
6. Mitrofanov I.G., Anfimov D.S., Kozyrev A.S. et al. Maps of subsurface hydrogen from High Energy Neutron Detector // *Science*. 2002. V. 297. P. 78–81.
7. Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Козырев А.С. и др. Сезонные вариации потока нейтронов в области полярных шапок Марса по данным российского прибора ХЕНД проекта НАСА 2001 Mars Odyssey // *Астрон. вестн.* 2003. Т. 37. № 5. С. 413–422.
8. Ныммик Р.А. Модель потоков частиц и усредненных энергетических спектров солнечных космических лучей // *Космич. исслед.* 1993. Т. 31. Вып. 6. С. 51–59. (Cosmic Research P. 630).
9. Panasyuk M.I., Bogomolov A.V., Bogomolov V.V. et al. Background fluxes of neutrons in near-space: experimental results of SINP // Preprint SINP MSY 2000-9/613. Moscow. 2000.
10. Севастьянов В.Д., Тарновский Г.Б., Лягушин В.И. Измерение энергетического спектра нейтронов на орбитальной станции “Мир” // *Космич. исслед.* 1997. Т. 35. № 2. С. 216. (Cosmic Research P. 201).
11. Ramaty R., Mandzhavidze N. Theoretical models for high-energy solar flare emission / J.M. Ryan, W.T. Vestrand (Eds.) // AIP Conference Proceedings. “High Energy Solar Phenomena. New Era of Spacecraft Measurements”. American Institute of Physics. New York. USA. 1994. № 294. P. 26–44.
12. Chupp E.L., Forrest D.J., Ryan J. et al. A direct observation of solar neutrons following the 01:18 UT flare on 1980 June 21 // *Astrophys. J.* 1982. V. 263. P. 95–99.
13. Chupp E.L. Solar neutron observations and their relation to solar flare acceleration problems // *Solar Physics*. 1988. V. 118. P. 137–154.
14. Kuznetsov S.N., Kudela K., Myagkova I.N. et al. First experience with SONG-M measurements on board CORONAS-F satellite // *Indian J. Radio Space Physics*. 2004. V. 33. P. 353–357.
15. Watanabe K. et al. Solar neutron events of 2003 October November // *The Astrophysical J.* 2006. V. 636. P. 1135–1144.
16. Богомолов А.В., Брутвич Г.И., Мягкова И.Н., Рюмин С.П. Идентификация нейтронов на фоне гамма-квантов при регистрации их детекторами на основе CsI : Tl^{+3} // *Приборы и техника эксперимента*. 1996. Т. 39. № 1. С. 13–19.
17. Богомолов А.В., Гудима К.К., Мягкова И.Н. и др. Восстановление спектров нейтронов по данным, полученным при помощи сцинтилляционных детекторов на основе CsI : Tl^{+3} // *Вестник МГУ. Сер. физ.-астрон.* 1994. Т. 35. № 3. С. 81.
18. Мокроусов М.И. и др. Аппаратура БТН-М1 для научного космического эксперимента “БТН-Нейтрон” на Российском сегменте Международной космической станции.
19. Крымский Г.Ф. Космические лучи и околоземное пространство // *Солнечно-земная физика*. 2002. Вып. 2. С. 42–45.
20. Chishiki A., Matsumoto H., Koshiishi H. et al. Analysis of the neutron radiation environment inside the International Space Station as obtained by a Bonner Ball Neutron Detector // 2nd International Workshop on Space Radiation Research. Nara. Japan. 1–15 March. 2002.
21. Ishkov V.N. The current 23 cycle of solar activity: its evolution and principal features // *Proceedings of ISCS “Solar Variability as an Input to the Earth’s Environment.”* ESA SP-535. Sept. 2003. P. 103–104.
22. Bieber J.W., Clem J. et al. Long-term decline of South Pole neutron rates // *J. Geophysical Research*. 2007. V. 112.
23. Owens A. The effect of long term radiation exposure on inorganic scintillator flown on the International Space Station // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*.