

УДК 629.786.2:52.728

ВТОРОЙ ЭТАП КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА “БТН НЕЙТРОН” НА БОРТУ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ: АППАРАТУРА БТН-М2

© 2022 г. М. И. Мокроусов¹ *, И. Г. Митрофанов¹, А. А. Аникин¹, Д. В. Головин¹, Н. Е. Карпушкина¹, А. С. Козырев¹, М. Л. Литвак¹, А. В. Малахов¹, А. Н. Пеков¹, А. Б. Санин¹, В. И. Третьяков¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: mokromax@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 03.09.2021 г.

После доработки 04.11.2021 г.

Принята к публикации 24.11.2021 г.

Как показали последние исследования на борту различных космических аппаратов, единственной нерешенной технической проблемой пилотируемых межпланетных полетов на данный момент является высокий радиационный фон межпланетного пространства, который, как например в случае пилотируемой миссии на Марс, может оказаться критически опасным для экипажа. Работы по данной тематике ведутся во всех космических агентствах, одним из таких космических экспериментов является аппаратура “БТН-Нейтрон” на борту Российского сегмента *Международной космической станции*. Основным результатом работы явилось создание аппаратуры БТН-М2 для создания эффективной радиационной защиты на борту перспективных пилотируемых космических аппаратов, создания инженерной модели радиационного фона как внутри, так и снаружи *МКС*, и для регистрация гамма-лучей и нейтронов во время солнечных вспышек и космических гамма-всплесков.

DOI: 10.31857/S0023420622050041

1. ВВЕДЕНИЕ

В ноябре 2006 г. на борту Российского сегмента *Международной космической станции* начал работу нейтронный спектрометр БТН-М1, установленный снаружи гермоотсека (ГО) модуля “Звезда” Российского сегмента *МКС*. Этот прибор был создан для проведения первого этапа эксперимента “БТН-Нейтрон” [1–3], который продолжается и в настоящее время. В его научные задачи в первую очередь входит непрерывный мониторинг нейтронной компоненты радиационного фона в широком спектральном диапазоне, включая поиск ее пространственной (пролеты на разных геомагнитных широтах, в том числе над Южно-Атлантической Магнитной Аномалией) и временной переменности (на разных временных масштабах, включая эпизоды сильных солнечных протонных событий).

Нейтронная компонента радиационного фона в окрестности *МКС* возникает в результате взаимодействия заряженных частиц (протоны из радиационных поясов, заряженные частицы галактических и солнечных космических лучей) с веществом, из которого состоит *МКС*. Нейтронный спектрометр БТН-М1 позволяет измерить потоки нейтронов в разных спектральных диапазонах,

от надтепловых до быстрых нейтронов, и по ним восстановить энергетический спектр нейтронов, после чего может быть проведена оценка мощности нейтронной компоненты радиационной дозы и выполнено ее сопоставление с данными других экспериментов на *МКС* [2, 13]. В космосе за пределами земной магнитосферы основной вклад в радиационную дозу на борту космических аппаратов вносят заряженные частицы, а нейтроны составляют лишь небольшую долю около 1–5% (см., например, [8, 9]). Для больших космических станций на низкой околоземной орбите, таких как *МКС*, это соотношение может существенно измениться. Было показано, что пассивная алюминиевая защита с толщиной порядка 20 г/см² не снижает уровень радиационного облучения космонавтов, поскольку эквивалентные значения дозы увеличиваются за счет переработки первичных заряженных частиц во вторичное излучение нейтронов [10]. Измерения показывают, что средняя мощность дозы по заряженным частицам на *МКС* составляет около 650 мкЗв/сут, в то время как нейтронная компонента может достигать ~140 мкЗв/сут [10–12]. Таким образом, для *МКС* вклад нейтронной составляющей достигает около 20% от полной дозы.

В процессе проведения эксперимента БТН-М1 на протяжении более пятнадцати лет были изучены вариации нейтронной компоненты космического фона снаружи *МКС*, что позволило оценить пространственную переменность (пролеты над высокими геомагнитными широтами и ЮАМА) и долгопериодические вариации в течение одиннадцатилетнего солнечного цикла [2, 13]. Было показано, что мощность нейтронной компоненты радиационной дозы возрастает в ~ 100 раз при пролетах над ЮАМА по сравнению с пролетами над экваториальными районами с небольшим индексом геомагнитного обрезания. В течение одиннадцатилетнего солнечного цикла мощность нейтронной компоненты радиационной дозы менялась в пределах 1.5–1.6 раз (от минимума к максимуму солнечной активности) [2, 13]. Полученные данные хорошо коррелируют с данными, полученными другими дозиметрами [2].

Таким образом, уже при получении первых результатов с аппаратуры БТН-М1 стало понятно, что эксперимент “БТН-Нейтрон” существенно выиграет в научном плане, если на борту *МКС* появится аналогичная аппаратура, но установленная внутри гермоотсека и регистрирующая как вторичные нейтроны, так и гамма-лучи. Это позволит одновременно получать и сопоставлять измерения радиационного фона снаружи и внутри *МКС*. Поэтому было принято решение о продолжении эксперимента “БТН-Нейтрон” в части создания дополнительной научной аппаратуры, которая получила название БТН-М2.

Функциональные возможности предлагаемой аппаратуры было предложено расширить, чтобы не ограничиваться только анализом радиационной обстановки на *МКС* на орбите Земли, а также получить дополнительные данные о возможных средствах защиты от вторичной нейтронной радиации на борту космического аппарата, на основе которых можно было бы планировать будущие пилотируемые экспедиции в дальний космос к Луне и Марсу.

Создание постоянно действующей лунной базы и подготовка будущих экспедиций к Марсу активно обсуждается различными космическими агентствами. Как показывают последние исследования, одной из важнейших задач была и остается задача обеспечения радиационной безопасности экипажа в условиях дальнего космоса [4–5]. И если при работах на орбите Земли (при невысоких наклонениях орбит – ниже 60°) этот вопрос частично решен благодаря экранированию космических лучей земной магнитосферой, то в условиях межпланетных перелетов и работах в радиационных поясах Земли безопасность экипажа напрямую зависит от окружающей радиационной обстановки.

В состав аппаратуры БТН-М1 входит сцинтилляционный детектор на основе кристалла CsI.

Его основное предназначение – это использование в схеме антисовпадений для защиты детектора быстрых нейтронов от заряженных частиц (в основном протонов). Но этот детектор также эффективно регистрирует гамма-кванты с энергиями от 60 кэВ до нескольких МэВ с достаточно высоким временным разрешением ($1/4$ с), что позволяет использовать его для наблюдений за профилями сильных солнечных гамма-вспышек и космическими гамма-всплесками. Эта возможность также сохранена и в аппаратуре БТН-М2.

Кроме этого, за время проведения первого этапа космического эксперимента “БТН-Нейтрон” начала активно развиваться смежная область исследований, связанная с принципиально новым космическим явлением, которое наблюдается в верхних слоях земной атмосферы. Это явление связано с наземными гамма-вспышками, или НГВ (или TGF, от Terrestrial Gamma Flares) [15, 16]. Предполагается, что гамма-излучение НГВ возникает за счет тормозного излучения релятивистских электронов, которые ускоряются в сильном электрическом поле от разряда, созданного молнией. Энергия фотонов может достигать 20 МэВ, а характерная длительность НГВ может составлять несколько миллисекунд, поэтому аппаратура БТН-М1 не может их регистрировать. При разработке электроники аппаратуры БТН-М2 было специально заложена возможность пофотонной регистрации гамма-лучей с очень высоким временным разрешением так, чтобы эксперимент “БТН-Нейтрон” на борту РС *МКС* принял участие в международной программе исследований НГВ.

Таким образом, основные цели второго этапа эксперимента БТН-Нейтрон были определены следующим образом:

- Исследование радиационно-защитных свойств различных материалов для разработки эффективной радиационной защиты на борту перспективных космических аппаратов и для создания радиационных убежищ для будущих пилотируемых экспедиций на Луну и Марс;
- Создание инженерной модели радиационного фона нейтронов как внутри гермоотсеков РС, так и снаружи в различных условиях полета *МКС* на околоземной орбите по данным БТН-М1 и БТН-М2.
- Регистрация гамма-лучей и нейтронов во время солнечных вспышек и солнечных протонных событий (совместно с БТН-М1);
- Регистрация событий НГВ и измерение спектров гамма-лучей этих событий, проверка гипотезы о наличии у части НГВ компоненты нейтронного излучения;
- Регистрация космических гамма-всплесков.

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ АППАРАТУРЫ

2.1. Общая структура

При разработке второго этапа эксперимента была использована концепция, хорошо себя зарекомендовавшая на первом этапе эксперимента “БТН-Нейтрон”: за основу берется уже разработанный и прошедший летные испытания прибор, к которому разрабатывается “оболочка” для адаптации интерфейсов с бортом РС *МКС*. В данном случае в качестве детекторной части был использован нейтронный и гамма-спектрометр МГНС для Европейской миссии БепиКоломбо [6, 14], отличие заключается лишь в том, что для задач регистрации космических и земных гамма-вспышек была использована электроника спектрометра с быстрой обработкой сигнала, также заимствованная от летного образца прибора АДРОН-ЛР российской миссии “Луна-Глоб” (Луна-25) [7]. Таким образом, вся детекторная часть гамма и нейтронного спектрометра (ГНС) прибора БТН-М2 базируется на уже проверенных технических решениях, прошедших все стадии разработок, квалификационных испытаний, наземных отработок и летных испытаний. Это минимизирует все риски, связанные с выявлением проблем на поздних этапах испытаний и отработок.

Одной из важнейших новых частей конструкции прибора являются съемные экраны, которые содержат внутри себя сборки материалов для исследования их защитных свойств от нейтронного излучения. В процессе проведения эксперимента с аппаратурой БТН-М2 предполагается довозка на РС *МКС* второй серии экранов с другими вариантами защитных материалов, разработанными на основе результатов эксперимента с первой серии экранов.

Детекторная часть внутри экранируемого объема закреплена на механическую ферму (рис. 1), обеспечивающую целостность всей конструкции. Эта ферма обеспечивает закрепление съемных защитных экранов, а также крепление прибора на узкую модуль-полку малого лабораторного модуля внутри гермоотсека. Сменные защитные экраны представляют собой полностью пассивные элементы механической конструкции, и на рис. 1 не показаны. Фотография всей аппаратуры БТН-М2 в сборе с защитными экранами приведена на рис. 2.

Общая блок-схема электроники прибора БТН-М2 показана на рис. 3. Аппаратура БТН-М2 представляет собой дублированное устройство с двумя полуккомплектами, один из которых находится в холодном резерве. Подача первичного питания (+27 вольт) и переключение полуккомплектов электроники производится подачей релейных команд от системы управления бортовым комплексом (СУБК). Подтверждение работы первого

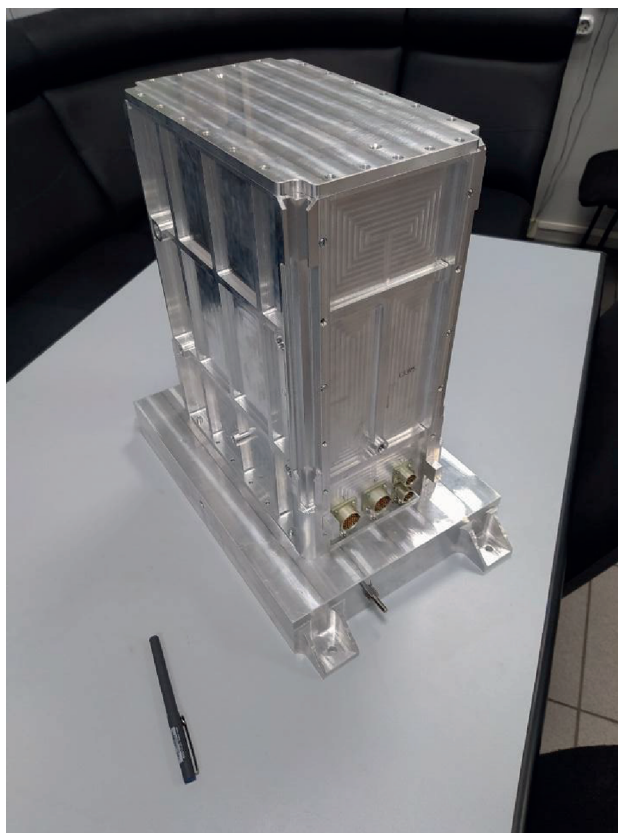


Рис. 1

или второго полуккомплекта соответственно, а также мониторинг тепловых режимов прибора производится системой бортовых измерений (СБИ) РС *МКС*. Обмен командной и телеметрической информацией реализован с помощью резервированного интерфейса Ethernet 10/100 Мбит. Для переключения на резервный полуккомплект электроники прибора необходимо физическое переключение интерфейсного кабеля на резервный разъем средствами экипажа *МКС*. Сводные характеристики аппаратуры БТН-М2 приведены в табл. 1.

2.2. Устройство детекторной части

Структурная схема детекторной части ГНС приведена на рис. 4, а внешний вид — на рис. 5. Как уже отмечалось выше, основной детекторный блок (ГНС) представляет собой практически полную копию прибора МГНС, состоящего из пяти детекторных узлов, цифрового ядра управления и обработки сигналов, резервированных источников вторичного питания и резервированного командно-телеметрического интерфейса.

Детектирование нейтронов низких энергий производится с помощью трех сенсоров, которые имеют одинаковые гелиевые счетчики фирмы



Рис. 2

LND 25169 с давлением газа 20 атмосфер и различные конструкции внешних частей:

- Сенсор SD1 не имеет оболочки и детектирует тепловые и эпитепловые нейтроны с энергия-

ми от 0.025 эВ до верхнего порога чувствительности <500 эВ;

- Сенсор SD2 имеет оболочку из листа кадмия толщиной 1 мм и детектирует только эпитеп-

Таблица 1. Характеристики аппаратуры БТН-М2

Параметр	Значение
Габаритные размеры	266 × 450 × 480 мм
Масса	Не более 42 кг (вместе с защитными экранами)
Потребляемая мощность	Не более 15 Вт
Напряжение питания	15–50 В
Пусковой ток	Не более 700 мА
Рабочий температурный диапазон	–40...+50°C
Командно-телеметрический интерфейс	Ethernet 10/100 mbit
Объем телеметрической информации	Не более 4 Мбайт/сут
Количество команд	Не более 5 команд/сут
Объем внутренней памяти, Мбайт	2 Гбайт
Место установки	ПГО 1 МЛМ РС МКС, УРМ-В, узкая модуль-полка
Радиационная стойкость	Не менее 5 крад
Назначенный ресурс	Не менее 35000 ч
Вероятность безотказной работы	Не менее 0.9

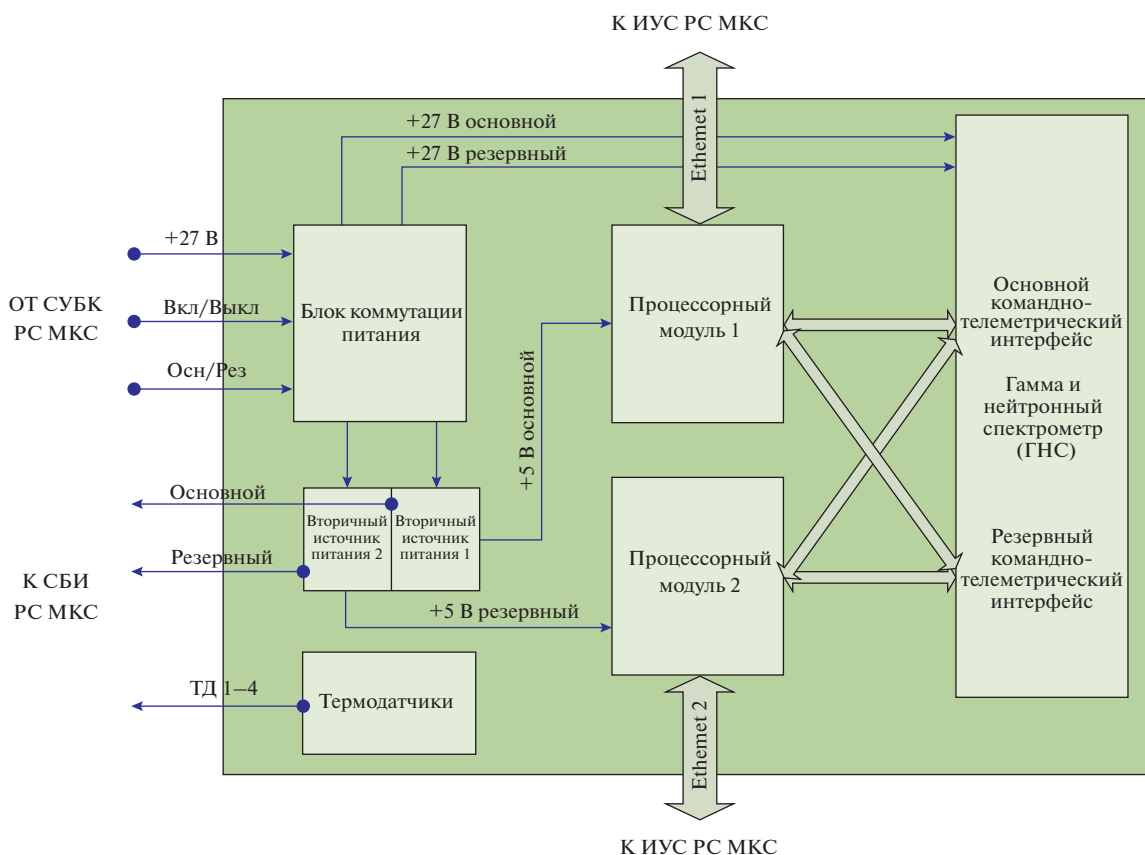


Рис. 3

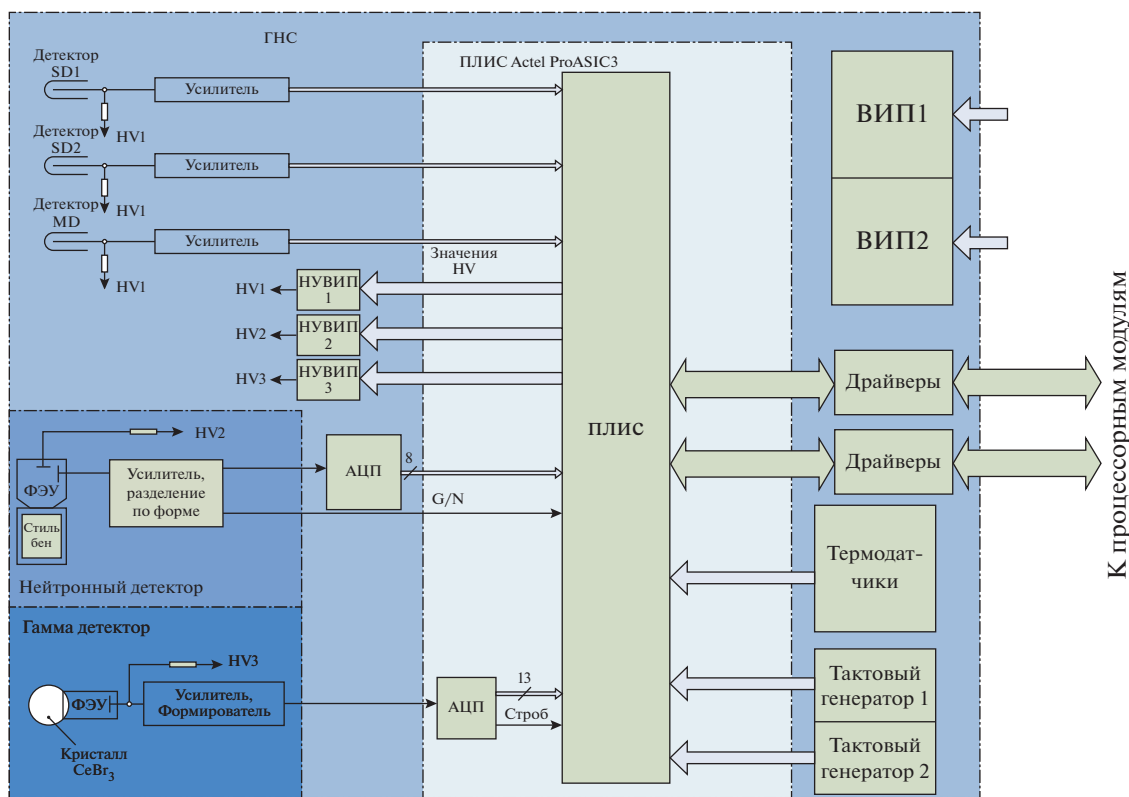


Рис. 4

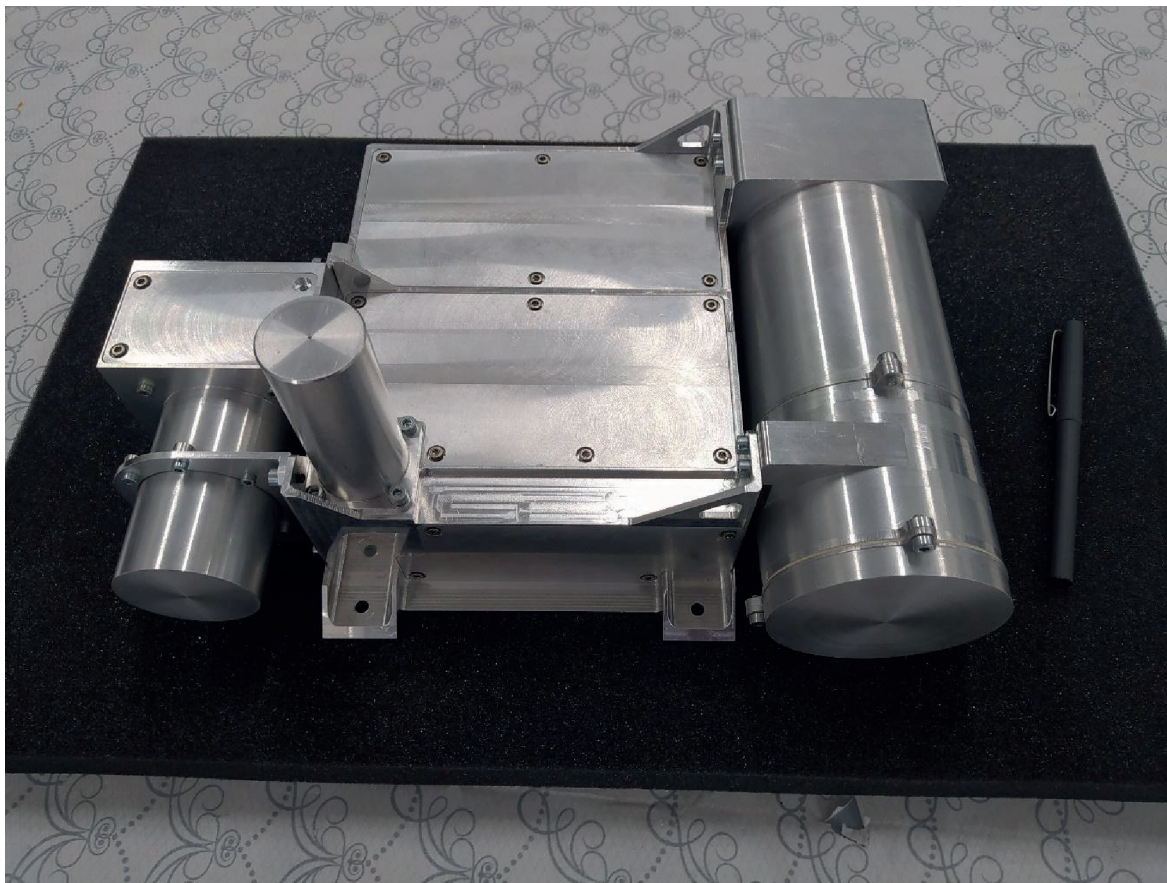


Рис. 5

вые нейтроны с энергиями от 0.4 эВ (порог кадмиевого поглощения) до 500 эВ. Сопоставление данных измерений детекторов SD1 и SD2 позволяет определить поток тепловых нейтронов;

- Сенсор MD имеет оболочку из листа кадмия толщиной 1 мм и толстую оболочку замедлителя нейтронов из полиэтилена высокого давления с толщиной 10 мм; этот сенсор детектирует нейтроны с энергиями 10 эВ–1 МэВ.

Детектирование нейтронов разных энергий одними и теми же нейтронными счетчиками обеспечивается специальными физическими свойствами оболочек указанных сенсоров: так, полиэтилен высокого давления, имеющий в своем составе большое количество водорода, хорошо замедляет исходные нейтроны до тепловых и эпитепловых энергий, тем самым смещая исходный спектр в область более низких энергий, где счетчик имеет максимальную эффективность регистрации. Оболочка из листа кадмия толщиной не менее одного миллиметра обеспечивает защиту SD2 и MD от потока нейтронов с энергиями <0.4 эВ.

Сцинтилляционный детектор нейтронов высоких энергий 0.1–8 МэВ выполнен на основе составного детектора из стильбена и органического

пластика с ФЭУ Hamamatsu R5611. В данном детекторе применена схема дискриминации сигналов по форме для разделения нейтронных событий в сцинтилляторе от событий заряженных частиц. Таким образом, своими нейтронными детекторами прибор покрывает энергетический диапазон энергий от 0.025 эВ до 8 МэВ.

В сцинтилляционном гамма детекторе используется кристалл бромида церия CeBr_3 размером 3×3 дюйма. На данный момент этот сцинтиллятор имеет одно из наилучших спектральных разрешений из всех сцинтилляционных детекторов. Устройством считывания сигнала является фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) с усиленной прочностью Hamamatsu R1307. Данная пара “детектор-ФЭУ” уже неоднократно демонстрировала в нескольких предыдущих разработках свою надежность, низкий собственный шум и спектральное разрешение на уровне 4.3% на 662 кэВ (рис. 6). Как уже отмечалось выше, в данном приборе используется спектрометр с уменьшенным мертвым временем обработки сигнала (<4 мкс.) для записи профилей гамма событий с высоким временным разрешением, а энергетический диапазон гамма канала составляет 0.2–10 МэВ.

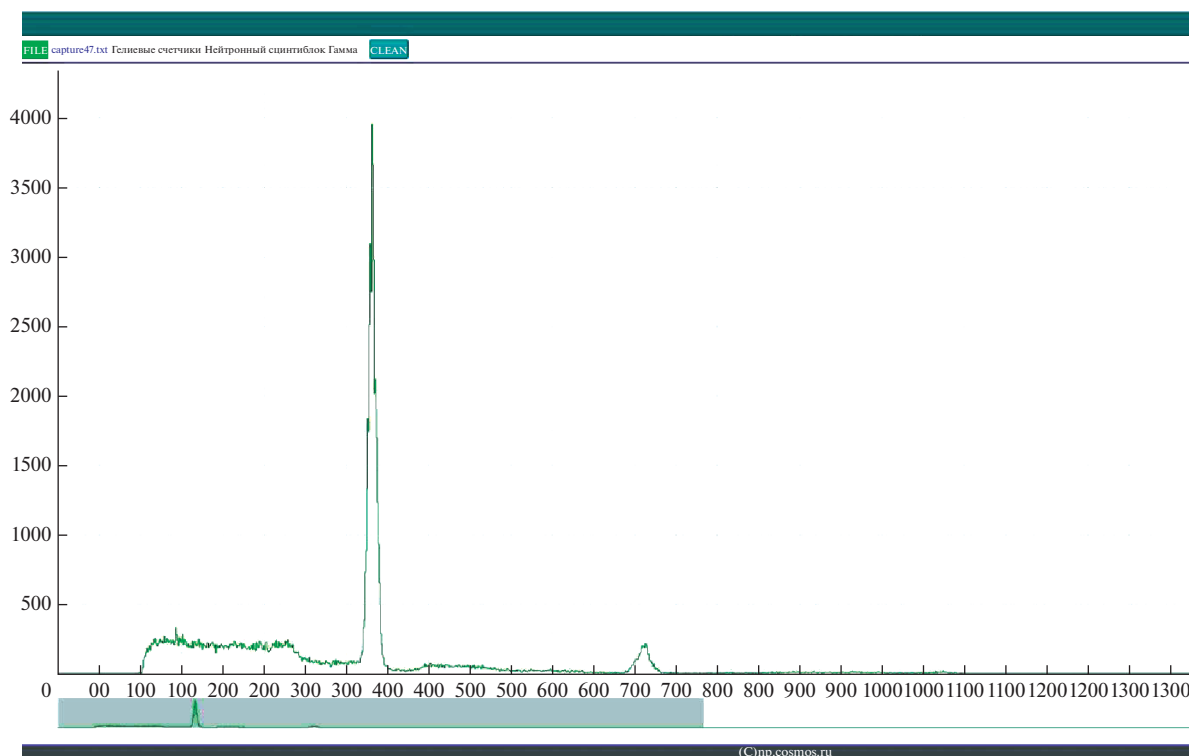


Рис. 6. Спектр гамма детектора с источником Cs-137. Ось X – каналы спектрометра, ось Y – отсчеты.

Для всех пяти детекторных узлов требуется высокое напряжение с различными значениями (600–1100 В), которое формируется внутри прибора с помощью слаботочных миниатюрных высоковольтных преобразователей фирмы PICO Electronics. Каждый из преобразователей имеет несколько фиксированных значений напряжений для подбора оптимального режима измерений каждого из детекторов. Значения высокого напряжения могут быть изменены командами с Земли.

Электронным ядром прибора является программируемая логическая интегральная микросхема (ПЛИС) фирмы Actel объемом 3 млн. вентилей, благодаря которой реализованы практически все основные функции прибора:

- Прием и выполнение команд;
- Обработка и запись в память событий от пяти детекторов;
- Формирование и передача фотонных слов процессорным модулям;
- Формирование и передача служебной телеметрической информации (значения термодатчиков, отказы высоковольтных преобразователей, статус прибора и пр.).

В режиме измерений детекторный блок ГНС формирует “сырую” информацию в виде битового потока фотонных и нейтронных “слов” с данными о событиях регистрации в пяти детекторах

для последующей обработки этой информации программным обеспечением процессорных модулей. Каждое нейтронное (фотонное) слово состоит из 10 байт информации в строго определенном формате, в котором присутствуют: синхромаркер (1 байт), номер канала детектора (1 байт), значение амплитуды с детектора (2 байта) и внутреннее время ГНС с дискретностью привязки 20 нс.

Для предотвращения потери данных при больших нагрузках детекторов (солнечные события, гамма-вспышки и пр.) в ГНС организован буфер для хранения научных данных на тридцать две тысячи зарегистрированных событий.

2.3. Устройство защитных экранов

Одним из важнейших элементов конструкции прибора БТН-М2 являются защитные экраны от вторичного потока нейтронов на борту МКС, эффективность которых намечено измерять во время проведения эксперимента.

На начальном этапе эксперимента с аппаратурой БТН-М2 будет применяться первая серия экранов из слоя полиэтилена высокого давления, работающего как замедлитель нейтронов, и слоя порошка изотопа бора ^{10}B , работающего как поглотитель нейтронов низких энергий. Данная двуслойная пара уже подтвердила свою высокую эффективность в таких космических экспери-

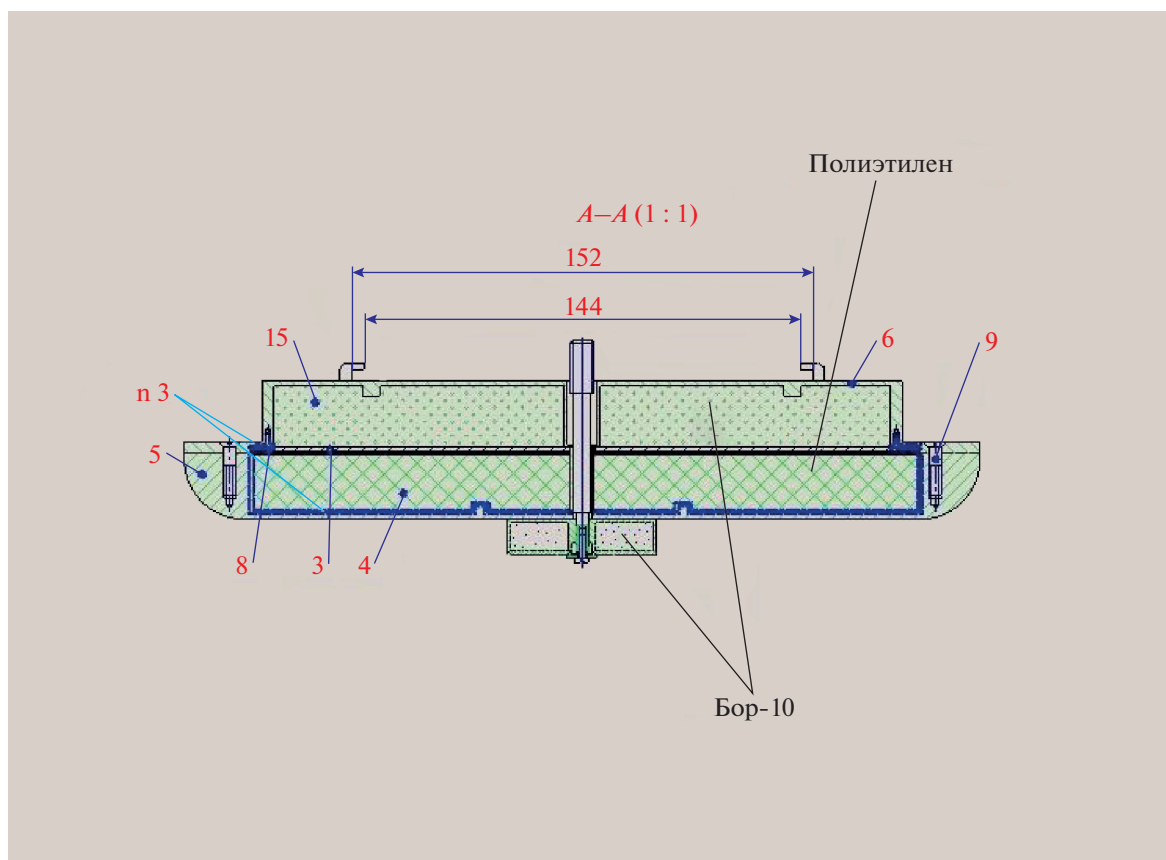


Рис. 7

ментах как ЛЕНД (миссия NASA LRO) и ФРЕНД (российско-европейская миссия ЭкзоМарс-2016). На начальном этапе эксперимента БТН-М2 планируется экспериментально оценить экранирующие свойства первой серии экранов с точки зрения биологической защиты. В дальнейшем, с учетом данных измерений, планируется создать вторую серию экранов с возможным увеличением толщины слоев и/или добавлением слоев из других веществ, поглощающих нейтроны.

Сечение конструкции одного из защитных экранов приведено на рис. 7. Толщины и отношения защитных слоев рассчитывались исходя из оптимального соотношения экранирующих свойств и массовых характеристик — слой полиэтилена составляет 2 см (свыше этой толщины повышение эффективности замедления нейтронов космического спектра резко падает), а толщина поглощающего борового слоя занимает всю оставшуюся доступную массу аппаратуры. На предварительном этапе были проведены натурные испытания экранирующих свойств экранов с источником нейтронов $PuBe$ со спектром, показанном на рис. 8 [17]. Эти испытания показали ослабление потока тепловых нейтронов на 60% и для эпитепловых ней-

тронов на 35–40%. Эффективность защиты от нейтронов высоких энергий составила более 50%.

Особенностью конструкции экрана и всего прибора в целом является то, что не существует ни одного прямого луча прохождения радиоактивной частицы, который бы миновал защитные слои экранов. Поскольку данные экраны являются съемными и сменными, то методика проведения эксперимента подразумевает сравнение радиационного фона в окрестности прибора без защитных экранов и с установленными экранами для разных направлений потока нейтронов внутри станции.

Измерения гамма-лучей и нейтронов в различных конфигурациях аппаратуры позволит оценить степень анизотропии вторичного излучения на разные условия космического полета. Очевидно, что изменение конфигурации экранов потребует активного участия космонавтов-исследователей в проведении эксперимента.

На последующем этапе эксперимента планируется доставка на борт МКС второй серии экранов с другими защитными материалами, разработанных с учетом результатов, полученных на начальном этапе. В итоге выполнения эксперимента будут найдены оптимальные комбинации состава за-



Рис. 8

медляющих и поглощающих нейтроны материалов для их последующего применения на борту пилотируемых космических аппаратов в дальнем космосе.

2.4. Устройство интерфейса с бортовыми системами МКС

Для соответствия требованиям МКС в части командно-телеметрического интерфейса в приборе использованы резервированные промышленные процессорные модули Cool SpaceRunner-LX800 фирмы Lippert, работающие в режиме холодного резервирования. Данные модули осуществляют командно-телеметрический обмен с информационно-управляющей системой (ИУС) МКС по интерфейсу Ethernet 10/100 Мбит, прием “сырой” информации от детекторного блока ГНС по интерфейсу RS-422 (на скорости до 1.5 Мбит/с), а также предварительную обработку полученной научной информации в зависимости от заданного режима работы. Процессорные модули работают под управлением операционной системы Debian 10, в программных модулях применены все возможные методы повышения надежности работы, а также предусмотрена возможность обновления программного обеспечения в полете.

3. КОМАНДНАЯ И ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Командование прибором БТН-М2 осуществляется с помощью ИУС посылками фиксированного формата с частотой посылок не чаще одной команды в секунду; все команды подразделяются на команды для детекторного блока ГНС и для интерфейсных процессорных модулей (ПМ), производящих обработку информации. Общий список команд приведен в табл. 2. Получение и

исполнение каждой поданной на прибор команды подтверждается ответным статусным пакетом с кодом результата выполнения команды.

Для управления прибором БТН-М2 предусмотрены следующие команды:

1. Команда установки уровня дискриминаторов устанавливает уровень шума аналоговой части в каждом из аналоговых трактов детекторов для дискриминации полезного сигнала от шума;

2. Команда регулировки высокого напряжения на детекторах обеспечивает возможность подбора оптимального режима измерений. Для сцинтилляционных детекторов увеличение (уменьшение) высокого напряжения увеличивает (уменьшает) коэффициент усиления ФЭУ и тем самым сужает (расширяет) энергетический диапазон измерений соответствующего канала измерений. Для гелиевых счетчиков регулировка высокого напряжения позволяет компенсировать тепловые неустойчивости аналогового тракта;

3. Команда выбора режима позволяет устанавливать режимы работы прибора: режим передачи исходных данных; режим накопления спектров; режим всплесков.

Выбор режима работы будет продиктован доступным объемом передаваемой на Землю телеметрической информации. Так, для режима передачи исходных данных объем телеметрии максимален, аппаратура записывает в телеметрию каждое отдельное событие в детекторе, ему присваивается бортовое время с высокой точностью. В этом режиме процессорный модуль передает данные в ИУС без дополнительной обработки, полученные на Земле данные предполагают самый широкий спектр пост-обработки, включая точное пофотонное воспроизведение временных профилей. Оценочный объем суточной телемет-

Таблица 2. Список команд аппаратуры БТН-М2

Номер	Команда	Получатель команды	Назначение команды
1	Установка уровней дискриминаторов	ГНС	Устанавливает нужный уровень дискриминатора для конкретного канала детектора
2	Установка уровней высокого напряжения	ГНС	Устанавливает нужный уровень высокого напряжения для конкретного детектора
3	Режим работы	ПМ	Устанавливает режим обработки “сырых” данных и тип производимой информации
4	Время накопления спектра	ПМ	Устанавливает время накопления спектра при режиме генерации спектров
5	Параметры всплесков	ПМ	Устанавливает параметры и критерии триггеров всплесковой логики
6	Образ системы	ПМ	Устанавливает номер образа системы при следующей загрузке активного процессорного модуля
7	Размер файла	ПМ	Устанавливает максимальный размер файла данных на флэш-диске активного процессорного модуля
8	Канал обмена с ГНС	ПМ	Устанавливает активный канал обмена с блоком ГНС (основной/резервный)
9	Перезагрузка	ПМ	Команда на принудительную перезагрузку процессорного модуля

рии в этом режиме при спокойной солнечной активности может достигать 2 Гбайт/сут.

В режиме накопления спектров для уменьшения телеметрической нагрузки на радиоканал МКС процессорные модули производят накопление спектров с каждого из детекторов на борту за установленное время, которое задается командой с Земли, с последующей передачей в ИУС. В этом режиме объем суточной телеметрии минимален (порядка 50 Мбайт/сут. для времени накопления спектра 20 с), но отсутствует какая-либо возможность записи временных профилей солнечных событий и всплесков в высоком временном разрешении, объем телеметрии в данном режиме можно регулировать путем изменения времени накопления спектров.

Режим всплесков – паллиативный режим, имеющий невысокий телеметрический объем, но записывающий временные профили всплесковых событий с высоким временным разрешением при выполнении заданных критериев всплесковой логики;

4. Команда на изменение времени накопления спектра; эта команда актуальна только в режиме всплесков и накопления спектров;

5. Команда на изменение параметров всплесковой логики; эта команда актуальна только в режиме всплесков;

6. Команда на загрузку нового программного обеспечения процессорных модулей; команда мо-

жет понадобиться в полете для расширения функциональности аппаратуры в будущем;

7. Команда управления размером файла для передачи научных данных из БТН-М2 в ИУС происходит по протоколу NFS (network file system), где БТН-М2 выступает в роли сервера, хранящего файлы данных. Через определенные промежутки времени ИУС забирает с флэш-диска прибора новые файлы, максимальный размер этих файлов регулируется этой командой;

8. Команда выбора канала обмена с ГНС позволяет выбрать основной или резервный канал RS-422.

9. Команда перезагрузки процессорного модуля производит перезагрузку всего программного обеспечения прибора.

Дополнительно БТН-М2 производит синхронизацию бортового времени по протоколу NTP с одним из бортовых серверов МКС для записи кода бортового времени (КБВ) в каждое из нейтронных или фотонных слов, а также для привязки служебной телеметрической информации к траекторным данным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент опытный образец аппаратуры БТН-М2 проходит полный цикл конструкторско-доводочных испытаний (КДИ), включающий вибрационные, ударные, климатические испытания, а также испытания на электромагнитную совместимость в соответствии с общими

требованиями РКК “Энергия” для космической аппаратуры, устанавливаемой на РС МКС. Начало работы штатного образца аппаратуры (ШО) на борту модуля МКС “Наука” запланировано на 2023–2024 г.

Второй этап космического эксперимента “БТН-Нейтрон” с комплексом аппаратуры БТН-М1 вне гермоотсека модуля “Звезда” и БТН-М2 в гермоотсеке модуля “Наука” позволит:

- Измерить потоки нейтронов и широком диапазоне энергий вдоль различных направлений внутри и вне гермоотсека МКС в различных геомагнитных условиях орбитального полета МКС как во время спокойного Солнца, так и в условиях солнечных вспышек или протонных событий.

- Изучить поглощающие характеристики различных защитных экранов от вторичного нейтронного на борту МКС. Данные, полученные в условиях полета на высоких геомагнитных широтах или в области ЮАМА, позволят экспериментально воспроизвести условия на межпланетном космическом аппарате под воздействием галактических космических лучей.

- Измерить энергетические спектры потоков вторичных гамма-лучей вдоль разных направлений внутри гермоотсека МКС в различных геомагнитных условиях орбитального полета МКС во время спокойного Солнца или в течение солнечных вспышек или протонных событий.

- Измерить потоки и энергетические спектры гамма-лучей от солнечных вспышек, наземных гамма-вспышек НГВ и космических гамма-всплесков КГВ с предельно высоким временным разрешением; проверить гипотезу о возможном спорадическом нейтронном излучении земной атмосферы во время НГВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьяков В.И. и др. Первый этап космического эксперимента “БТН-Нейтрон” на борту российского сегмента *Международной космической станции* // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 6. С. 291.
2. Литвак М.Л. и др. Наблюдение пространственных и временных вариаций спектральной плотности нейтронного потока вне российского сегмента *Международной космической станции* по данным космического эксперимента “БТН-Нейтрон” // Космич. исслед. 2017. Т. 48. № 6. С. 291.
3. Mitrofanov I., Litvak M., Tretyakov V. et al. Neutron components of radiation environment in the near-Earth and near-Mars space // *Planetary and Space Science*. 2009. V. 57. P. 1993–1995.
4. Semkova J. et al. Charged particles radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FRENDO instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and in high elliptic Mars orbit // *Icarus*. 2018. V. 303. P. 53–66.
5. Semkova J. et al. Results from radiation environment measurements aboard ExoMars Trace Gas Orbiter in Mars science orbit in May 2018–December 2019 // *Icarus*. 2021. V. 361. P. 114264.
6. Kozurev A. et al. A comparative study of LaBr₃(Ce³⁺) and CeBr₃ based gamma-ray spectrometers for planetary remote sensing applications // *Review of Scientific Instruments*. 2016. V. 87. P. 085112.
7. Литвак М.Л. и др. Наземные измерения с активным гамма- и нейтронным спектрометром “АДРОН”, предназначенным для лунных и марсианских посадочных миссий // *Астрономический вестник*. 2017. Т. 51. № 3. С. 189–203.
8. Köhler J. et al. Measurements of the neutron spectrum in transit to Mars on the Mars science laboratory // *Life Sciences in Space Research*. 2015. V. 5. P. 6–12.
9. Litvak M.L. et al. Mars neutron radiation environment from HEND/Odyssey and DAN/MSL observations // *Planetary Space Science*. 2020. V. 184. P. 104866.
10. Slaba T.C. et al. Optimal shielding thickness for galactic cosmic ray environments // *Life Sciences in Space Research*. 2017. V. 12. P. 1–15.
11. Berger T. et al. DOSIS & DOSIS 3D: Radiation measurements with the DOSTEL instruments onboard the Columbus Laboratory of the ISS in the years 2009–2016 // *J. Space Weather and Space Climate*. 2017. V. 7. P. A08.
12. Shurshakov V.A. et al. Evaluation of the spectrometric and dose characteristics of neutron fields inside the Russian segment of the ISS by fission detectors // *Cosmic Research*. 2016. V. 54. P. 111–117.
13. Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Головин Д.В. и др. Долгопериодические вариации нейтронной компоненты радиационного фона в окрестности международной космической станции по данным космического эксперимента “БТН-Нейтрон” // *Космич. исслед.* 2022. Т. 60. № 3. С. 206–217.
14. Mitrofanov I.G. et al. The Mercury Gamma and Neutron Spectrometer (MGNS) onboard the Planetary Orbiter of the BepiColombo mission // *Planetary and Space Science*. 2010. V. 58. P. 116–124.
15. Fishman G., Bhat P., Mallozzi R. et al. Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin // *Science*. 1994. V. 264. P. 1313–1316.
16. Smith D. M., Lopez L.I., Lin R.P. et al. Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed up to 20 MeV // *Science*. 2005. V. 307. P. 1085–1088.
17. Griffin M. A. et al. Characterization of a plutonium beryllium source for use in neutron damage studies // *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2008. V. 276. № 3. P. 807–811.