

АДРОН: АКТИВНЫЙ СПЕКТРОМЕТР НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЛУНЫ И МАРСА

*М. И. Мокроусов¹, Д. В. Головин², И. Г. Митрофанов, А. А. Аникин,
А. С. Козырев, М. Л. Литвак, А. В. Малахов, С. Ю. Никифоров,
А. Н. Пеков, А. Б. Санин, В. И. Третьяков*

Институт космических исследований РАН, Москва

В настоящее время запланированы несколько космических экспериментов по активному зондированию состава грунта Луны и Марса с бортов посадочных аппаратов «Луна-25», «Луна-27» и «ЭкзоМарс-2020» приборами серии АДРОН. В данной статье приводится описание метода активного нейтронного и γ -каротажа, основные цели и задачи этих экспериментов, состав аппаратуры, а также описание конструкции и электроники указанных приборов.

At present, several space experiments are planned for active probing of the Moon and Mars soil composition onboard Luna-25, Luna-27 and ExoMars-2020 landers using instruments of the ADRON series. This article describes the method of active neutron and gamma-ray logging, the main goals and objectives of these experiments, the composition of the equipment, as well as the design and electronics of these instruments.

PACS: 07.85.Nc; 29.30.-h

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач планетных исследований является определение элементного состава вещества планет и тел Солнечной системы. Информация о химическом составе грунта, полученная с помощью нейтронной и γ -спектрометрии на основе ядерно-физических методов (в частности, пассивного и активного нейтронного зондирования), позволяет судить о процессах образования планет и геологических процессах формирования их поверхности в разные периоды их эволюции.

Регистрация ядерного излучения нейтронов или γ -лучей от вещества небесных тел, которое подвержено бомбардировке галактическими космическими лучами с борта орбитального или посадочного космического аппарата (КА), позволяет оценить ядерный состав этого вещества и степень присутствия в нем водорода, а также оценить содержание в веществе естественных радиоактивных элементов. Такой метод пассивных измерений позволяет «заглянуть внутрь» вещества под поверхность небесного тела на глубину около 1 м и измерить его состав без бурения и забора образцов грунта.

¹E-mail: mokromax@iki.rssi.ru

²E-mail: golovin@np.cosmos.ru

Существенным преимуществом использования импульсного нейтронного генератора (ИНГ) непосредственно на поверхности планеты по сравнению с пассивными измерениями с орбиты или с поверхности является возможность применения метода нейтрон-нейтронного и нейтрон- γ -каротажа, который широко используется в геофизических исследованиях [1]. Этот подход позволяет увеличить перечень идентифицируемых элементов, повысить точность оценки их массовой доли, а также изучить слоистую структуру грунта, поскольку существенно повышается интенсивность потока зондирующих нейтронов и возникает динамический характер нейтронного альbedo при импульсном облучении исследуемого вещества.

Быстрые нейтроны, излученные нейтронным генератором, проникают в подповерхностные слои планетного грунта и взаимодействуют с пороодообразующими элементами в процессах упругого и неупругого рассеяния. Для генераторов с тритиевой мишенью энергия излучаемых нейтронов примерно равна 14 МэВ. В результате взаимодействия нейтронов с ядрами вещества изменяется их направление движения и уменьшается кинетическая энергия, т. е. нейтроны замедляются. Часть замедлившихся нейтронов излучается с поверхности, формируя так называемое динамическое (или послеимпульсное) альbedo нейтронов. Выход альбедных нейтронов происходит после импульса нейтронного генератора в течение определенного интервала времени, варьирующегося от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд в зависимости от их энергии. За счет случайного характера замедления нейтронов в планетном грунте энергия альбедных нейтронов меняется в широком диапазоне от тепловых значений $\sim 0,025$ эВ до 14 МэВ. Быстрые нейтроны выходят из грунта практически сразу после импульса генератора, испытав одно или несколько соударений с ядрами вещества грунта. Для замедления нейтронов до надтепловых энергий (десятки и сотни электронвольт) требуется характерное время порядка десятка микросекунд. Наконец, для тепловой компоненты альбедных нейтронов время выхода может составлять сотни микросекунд и более.

Наличие водорода в грунте влияет на замедление быстрых нейтронов, так как при столкновении с легким ядром водорода (протоном) ядру передается значительная доля исходной энергии — вплоть до всей кинетической энергии налетающего нейтрона. Даже небольшое количество ядер водорода может существенно увеличить количество альбедных нейтронов в области тепловых энергий и понизить количество альбедных эпитепловых и быстрых нейтронов. Распределение водорода по глубине также влияет на профиль излучения послеимпульсного альbedo, поскольку для приповерхностных слоев грунта, обогащенных водородом, пик альбедных тепловых нейтронов может наблюдаться раньше по времени. Таким образом, форма профиля послеимпульсного альbedo отражает как количество ядер водорода, так и их распределение по глубине в исследуемом планетном веществе.

Важную роль при формировании профиля послеимпульсного альbedo также играет наличие некоторых химических элементов — эффективных поглотителей тепловых нейтронов. Принимая во внимание распространенность различных химических элементов в типичном планетном веществе, в качестве таких эффективных поглотителей имеем прежде всего хлор и железо, а также редкоземельные элементы (например, гадолиний), достаточно малая концентрация которых компенсируется огромными величинами сечения захвата тепловых нейтронов. Присутствие в грунте поглотителей тепловых нейтронов существенно отражается на профиле послеимпульсного альbedo

и приводит к тому, что количество отсчетов в детекторах тепловых нейтронов значительно падает. Это позволяет использовать анализ формы профиля послеимпульсного альbedo для оценки суммарной концентрации элементов-поглотителей. Обычно для описания этой величины используется эквивалентная концентрация хлора как элемента, достаточно распространенного в планетном веществе (концентрации могут достигать нескольких процентов) и имеющего достаточно высокое сечение захвата тепловых нейтронов [2]. Его вклад в суммарное воздействие на профиль послеимпульсного альbedo, как правило, является определяющим. В этом случае при анализе данных измерений концентрации других элементов-поглотителей предполагаются постоянными, а их вариации описываются положительными или отрицательными поправками к оценке массовой доли хлора как основного поглотителя (см. детали [2]).

В результате взаимодействия нейтронов с ядрами порообразующих элементов происходят реакции неупругого рассеяния, радиационного захвата и образования короткоживущих изотопов, которые приводят к образованию ядер в возбужденном состоянии, которое снимается за счет излучения характеристического γ -кванта с определенной энергией. Поэтому импульсы нейтронного генератора сопровождается выходящий с поверхности поток вторичных γ -квантов, спектр которых содержит характеристические γ -линии, соответствующие излученным γ -квантам. Спектр вторичного γ -излучения может быть зарегистрирован γ -детектором, входящим в состав прибора. По энергиям и интенсивностям отождествленных характеристических γ -линий можно определить элементный состав грунта. Время выхода альбедных γ -квантов из поверхности грунта после импульса нейтронов зависит от реакции, в ходе которой они образовались, и их распределения по глубине испустивших их ядер. Реакции неупругого рассеяния возникают только на быстрых нейтронах, поэтому соответствующие γ -линии могут возникать либо во время нейтронного импульса, либо сразу после него. Реакции радиационного захвата происходят на тепловых нейтронах, поэтому соответствующие линии в послеимпульсном спектре γ -лучей появляются спустя сотни микросекунд, когда быстрые нейтроны замедляются до тепловых энергий. γ -излучение от короткоживущих радиоактивных изотопов возникает после их распада, поэтому соответствующие линии могут появляться спустя продолжительное время после окончания нейтронного импульса. Кроме того, неоднородное распределение основных порообразующих ядер по глубине может приводить к тому, что в течение послеимпульсного γ -излучения амплитуда соответствующей γ -линии может меняться, и анализ этого поведения позволяет определить глубину, на которой находится максимальная концентрация данного элемента.

Таким образом, комбинацию нейтронных детекторов тепловых и эпитепловых нейтронов с высоким временным разрешением можно использовать для определения как среднего содержания воды, так и ее распределения по глубине с детализацией и точностью, недоступной для обычных пассивных измерений собственного нейтронного альbedo поверхности под воздействием галактических космических лучей. Добавление в состав прибора γ -детектора с высоким энергетическим и временным разрешением позволит определить элементный состав основных порообразующих элементов и их распределение по глубине, опять же с точностью и детализацией, недоступной при измерениях собственного альbedo поверхности.

Первым примером проведения активных космических ядерно-физических измерений с использованием импульсного нейтронного зондирования вещества другого

космического тела стала научная аппаратура (НА) ДАН («Динамическое альbedo нейтронов»), которая установлена на борту марсохода НАСА «Curiosity» и успешно работает в марсианском кратере Гейл с августа 2012 г. [3, 4]. В состав научной аппаратуры ДАН входит блок импульсного нейтронного генератора ИНГ-10 для зондирования поверхностного слоя Марса нейтронами с энергией 14 МэВ и последующей регистрации альбедного нейтронного излучения блоком детекторов и электроники (ДЭ) с высоким временным разрешением. Блок ИНГ-10 разработан во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматики им. Н. Л. Духова (ВНИИА) и представляет собой отдельное устройство, соединенное с блоком ДЭ с помощью двух межблочных кабелей питания и цифровой коммуникации. ВНИИА является мировым лидером в создании нейтронных генераторов, которые находят применение в аппаратуре исследования скважин нефтегазовых и рудных месторождений, в приборах элементного анализа веществ и материалов, а также в ядерной медицине [5–6].

В состав ИНГ прибора ДАН входит нейтронная трубка и высоковольтная электроника, создающая импульсное ускоряющее электрическое поле с напряжением 120 кВ для ускорения ионов дейтерия, вылетающих из анода вакуумной трубки под действием ускоряющего напряжения. Импульс нейтронов с энергией 14 МэВ генерируется в ядерной реакции $D + T = 4He + n$ при столкновении ускоренных ионов дейтерия с титановой мишенью, обогащенной тритием. В результате импульса электрического поля вырабатывается импульс нейтронов с интенсивностью $\sim 10^7$ нейтронов и частотой следования импульсов до 10 Гц, длительность отдельного нейтронного импульса составляет ~ 1 мкс.

Данная статья посвящена описанию серии приборов АДРОН, предназначенной для активного нейтронного зондирования вещества поверхности Луны и Марса. Основными научными задачами космических экспериментов с применением прибора АДРОН является определение массового содержания воды в грунте и входящих в него основных породообразующих элементов с борта космических аппаратов (КА) на поверхности небесного тела, а также оценка их распределения по глубине в приповерхностном слое с толщиной ~ 1 м. Для решения этих задач прибор должен быть установлен как можно ближе к поверхности планеты и по возможности удален от основных массивных элементов конструкции КА для снижения величины фонового излучения и увеличения точности проводимых измерений. Так, прибор АДРОН-ЛР установлен на КА «Луна-Глоб» на дополнительной научной палубе в нижней части аппарата на высоте около 30 см над лунной поверхностью [7], а блоки ИНГ и ДЭ прибора АДРОН-ЭМ для посадочной миссии «ЭкзоМарс-2022» расположены в нижней части посадочной платформы на высоте примерно 70 см над поверхностью Марса.

Предметом данной статьи является описание конструкции и основных свойств приборов серии АДРОН, представление их основных параметров и характеристик. В частности, указано, что электронные блоки таких приборов могут также обеспечивать работу другой ядерно-физической аппаратуры на борту КА. Так, в отличие от прибора АДРОН-ЛР для лунной посадочной миссии в состав НА АДРОН-ЭМ входит блок дозиметра «Люлин-МЛ», основной задачей которого является мониторинг радиационной обстановки в месте посадки на Марсе и сравнение данных с измерениями аналогичного дозиметра в составе российского прибора ФРЕНД на борту европейского орбитального аппарата ТГО [8].

1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРИБОРОВ АДРОН

1.1. Общее описание приборов и их структурные элементы. Конструктивно приборы серии АДРОН состоят из двух блоков: детекторного блока и блока импульсного нейтронного генератора. На рис. 1–3 приведен внешний вид детекторных блоков приборов АДРОН-ЛР, АДРОН-ЭМ и блока нейтронного генератора ИНГ-10 соответственно, где отмечены основные функциональные блоки, каждый из которых подробнее будет описан ниже: 1 — детекторы нейтронов тепловых и эпитепловых энергий; 2 — детектор γ -лучей на основе сцинтилляционного кристалла CeBr_3 или LaBr_3 ; 3 — быстродействующий γ -спектрометр с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) и платой делителя напряжения; 4 — плата вторичного источника питания; 5 — блок высокого напряжения; 6 — основная цифровая плата; 7 — блок нейтронного генератора.

Основные характеристики приборов АДРОН приведены в табл. 1. Как можно заметить, механические конструкции двух приборов очень похожи между собой, различия в электронной конструкции более значимы. Основные различия в механической конструкции в основном касаются размера γ -детектора. Так, для удовлетворения требованиям технического задания (ТЗ) для прибора АДРОН-ЭМ в части массовых

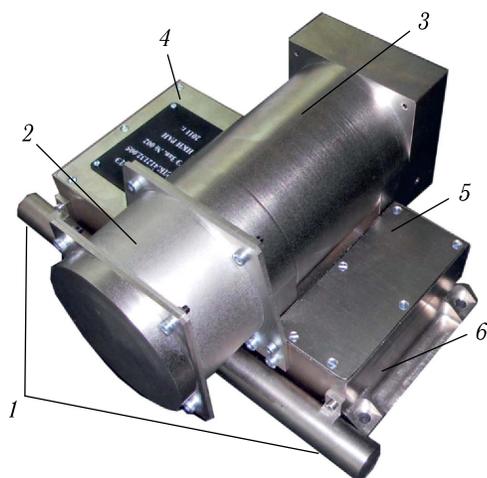


Рис. 1. Внешний вид детекторного блока прибора АДРОН-ЛР и его функциональные блоки

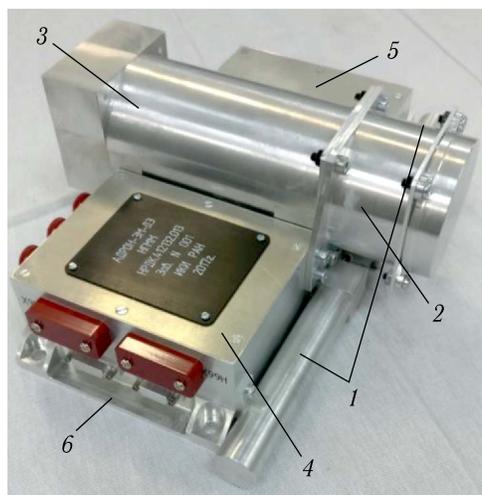


Рис. 2. Внешний вид детекторного блока прибора АДРОН-ЭМ и его функциональные блоки



Рис. 3. Блок нейтронного генератора ИНГ-10

Таблица 1. Основные характеристики приборов АДРОН

Параметр	АДРОН-ЛР	АДРОН-ЭМ
Диапазон энергий (нейтроны)	< 0,1 эВ – 500 кэВ (16 каналов на детектор)	< 0,1 эВ – 500 кэВ (32 канала на детектор)
Диапазон измеряемых энергий, МэВ (гамма)	0,15–10 (4095 каналов)	0,15–10 (4095 каналов)
Энергетическое разрешение, % (гамма)	4,2 (662 кэВ)	4,2 (662 кэВ)
Габаритные размеры, мм		
АДРОН-ДЭ	270 × 215 × 110	269 × 200 × 86
АДРОН-ИНГ	340 × 125 × 45	340 × 125 × 45
АДРОН-ДМ	—	174 × 114 × 46
Масса, кг		
АДРОН-ДЭ	< 3,8	< 2,5
АДРОН-ИНГ	< 2,7	< 2,7
АДРОН-ДМ	—	< 0,55
Потребляемая мощность, Вт		
АДРОН-ДЭ	7	7
АДРОН-ИНГ	14	14
АДРОН-ДМ	—	3,5
Напряжение питания, В	18–50	18–50
Температурный диапазон, С°		
Рабочий	–40–+50	–45–+45
Хранение	–40–+50	–55–+60
Командно-телеметрический интерфейс	RS-422	RS-422
Радиационная стойкость, крад	> 20	> 20
Вероятность безотказной работы за 1 год	> 0,95	> 0,95

ограничений пришлось уменьшить кристалл γ -детектора с размера 3 × 2 дюйма для АДРОН-ЛР до 2 × 2 дюйма для АДРОН-ЭМ.

При разработке электроники приборов серии АДРОН активно использовались все наработки, созданные для предыдущих приборов пассивного и активного нейтронного каротажа. Блок-схемы электроники приборов АДРОН-ЛР и АДРОН-ЭМ приведены на рис. 4 и 5. Они имеют три основных различия:

— в связи с переходом на отечественную электронную базу основным ядром прибора АДРОН-ЭМ является не программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), а микроконтроллер, который также несет на себе основную функциональную нагрузку;

— в связи с наличием дополнительного дозиметрического блока АДРОН-ЭМ-ДЭ этот же микроконтроллер должен обеспечивать командование этим блоком и промежуточное хранение телеметрической информации;

— из-за различия в тепловых условиях прибор АДРОН-ЭМ имеет собственную автономную систему подогрева критических узлов прибора.

Однако остальные научные и технические параметры у обоих приборов одинаковы:

— нейтронный генератор излучает импульсы нейтронов с энергиями 14 МэВ, с частотой 10 Гц и интенсивностью 10^7 нейтронов в импульсе;

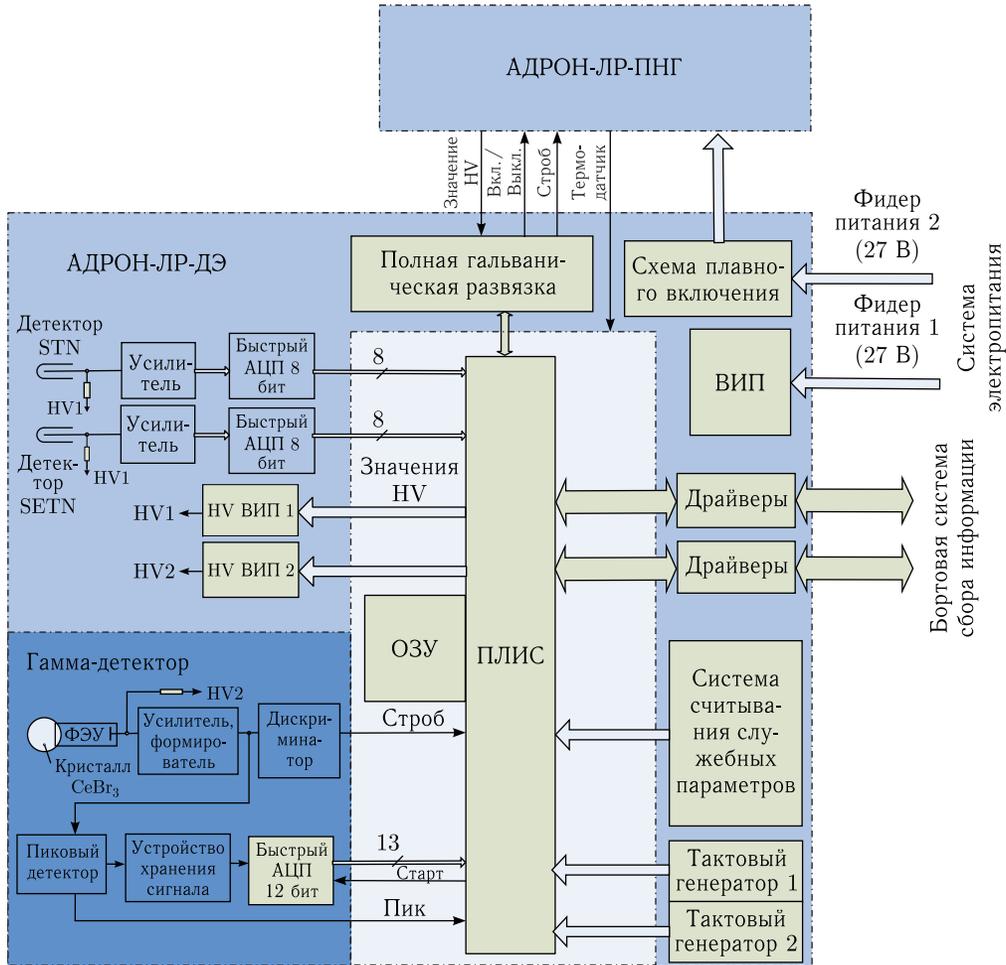


Рис. 4. Блок-схема электроники прибора АДРОН-ЛР

— два детектора нейтронов на базе пропорциональных счетчиков с ^3He имеют энергетические диапазоны от 0,025 до 500 эВ и от 0,4 до 500 эВ для детектора тепловых и эпитепловых нейтронов соответственно, тракт обработки аналоговых сигналов обеспечивает временное разрешение менее 3 мкс;

— γ -детектор на основе сцинтиллятора CeBr_3 обеспечивает энергетический диапазон 0,2–10 МэВ с разрешением не хуже 4,5 % (на линии ^{137}Cs) и временное разрешение менее 4 мкс;

— цифровой блок обеспечивает сбор, обработку и хранение данных с детекторов: режим обработки (пассивный, активный), а также временные характеристики шкалы развертки в активном режиме задаются командами;

— цифровой блок обеспечивает управление пульсированием нейтронного генератора с временными параметрами, управляемыми по командам с Земли;

— цифровой блок обеспечивает временную привязку данных к коду бортового времени с точностью не хуже 1 мс;

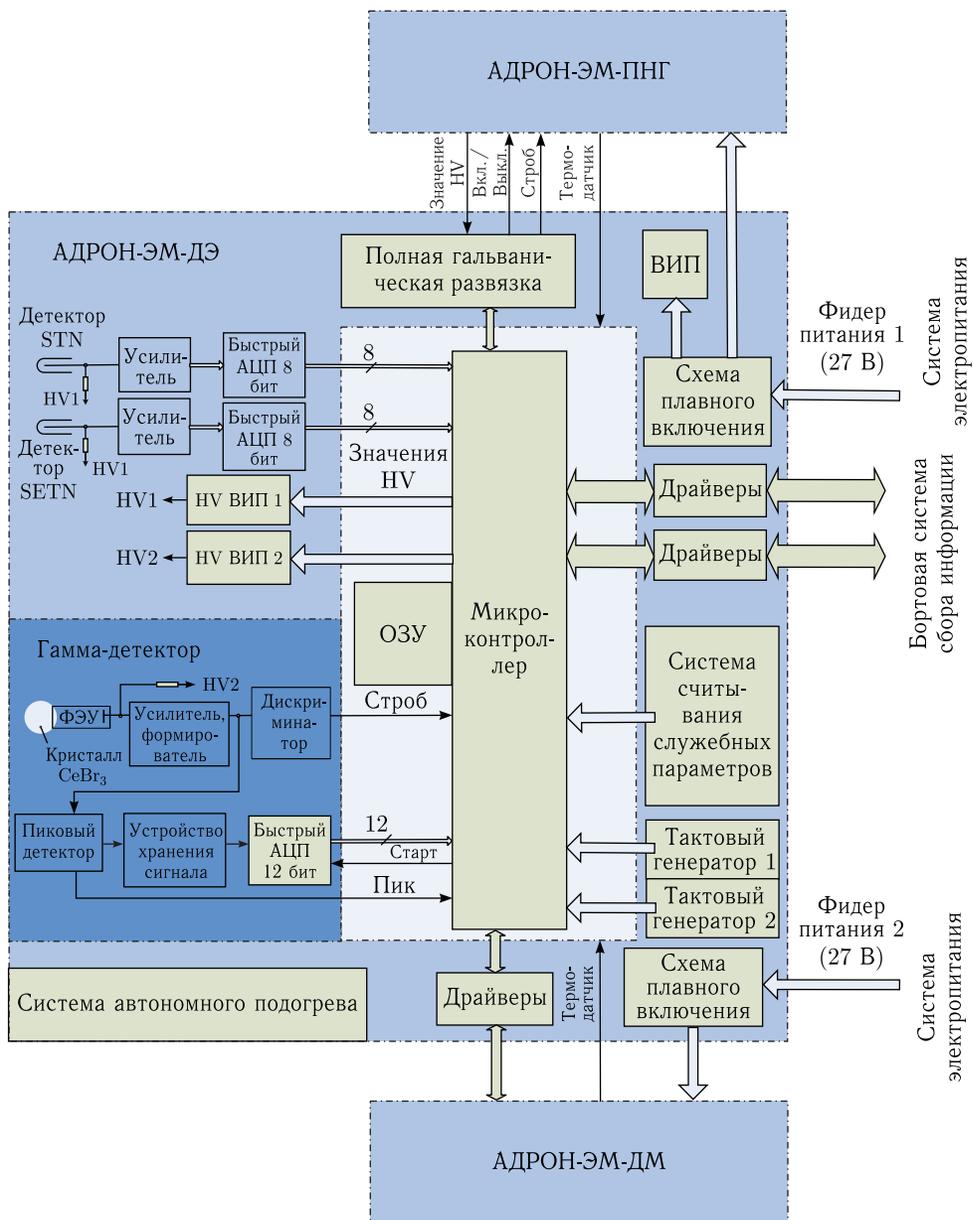


Рис. 5. Блок-схема электроники прибора АДРОН-ЭМ

— цифровой блок обеспечивает обмен командной и телеметрической информацией с бортовыми управляющими системами аппарата.

Приборы собраны с применением электрорадиоизделий (ЭРИ), обеспечивающих высокую стойкость к специальным внешним воздействующим факторам (СВВФ).

В качестве блока нейтронного генератора для приборов АДРОН используется нейтронный генератор ИНГ-10, исходно разработанный для прибора ДАН миссии «Curiosity». Опыт его применения показал высочайшую надежность и безотказность функционирования, при этом он многократно перекрыл назначенный ресурс работы.

1.2. Описание детекторных узлов приборов АДРОН. *1.2.1. Нейтронные детекторы.* Для выбора параметров нейтронных детекторов использовался опыт создания прибора ДАН: для увеличения статистики отсчетов в нем применялись гелиевые счетчики большого диаметра (50 мм) и давлением около 3 атм. Однако опыт работы в паре с нейтронным генератором показал сильное послеимпульсное насыщение таких детекторов — в течение нескольких микросекунд после начала нейтронного импульса у таких счетчиков наблюдается потеря эффективности регистрации. Это время определяется временем дрейфа электронов на катод счетчика (т.е. геометрическими размерами и формой счетчика), давлением рабочего газа, а также коэффициентом усиления детектора. По этой причине в приборе ДАН приходилось работать на минимально возможном коэффициенте усиления счетчиков и, как следствие, со слабым полезным сигналом с детектора. Чтобы избежать этого эффекта, в приборах АДРОН были применены гелиевые счетчики другой геометрии и с другим давлением рабочего газа.

Нейтронная детекторная часть приборов АДРОН состоит из двух пропорциональных гелиевых счетчиков фирмы LND 25169 с давлением газа 20 атм (рис. 6) и различными внешними оболочками. Применение детекторов малого диаметра (12,5 мм) с высоким давлением рабочего газа (20 атм) позволило сильно ослабить эффект послеимпульсной потери эффективности регистрации при сохранении эффективности детектирования. Детектор эпитепловых нейтронов (SETN — counter of epithermal neutrons) окружен оболочкой из кадмия толщиной 1 мм, благодаря чему он регистрирует только эпитепловые нейтроны с энергиями от 0,4 эВ (порог кадмиевого поглощения) до 500 эВ. Детектор тепловых нейтронов (CTN — counter of thermal neutrons) имеет составную оболочку из сегментов из кадмия и свинца: свинцовый сегмент составляет угол 180° и конструктивно направлен в сторону изучаемой поверхности грунта (рис. 7). Этот сегмент обеспечивает детектирование нейтронов с энергиями от 0,025 до 500 эВ со стороны поверхности. Интегральная разница отсчетов детекторов CTN и SETN равна потоку тепловых нейтронов из телесного угла, соответствующего свинцовому сегменту детектора CTN. Свинец в сегменте детектирования CTN используется для поглощения возможного потока заряженных частиц в детектор, отсчеты от которых могли бы внести значительный фон в полезный нейтронный сигнал.



Рис. 6. Внешний вид гелиевого счетчика LND 25169

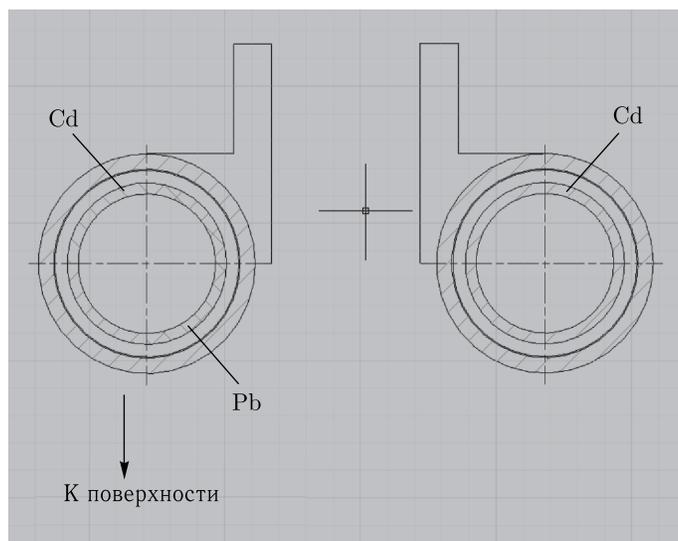


Рис. 7. Конструкция оболочек детекторов нейтронов

Здесь необходимо отметить, что давление рабочего газа в нейтронных счетчиках даже из одной поставочной партии варьируется в пределах $\pm 20\%$, и, как следствие, все счетчики при одном и том же значении рабочего напряжения имеют различную эффективность регистрации нейтронов. Для повышения достоверности научных данных перед установкой детекторов в прибор необходим попарный подбор нейтронных детекторов по характеристикам, а также проведение специальных наземных калибровок после финальной сборки и отладки аппаратуры.

Обработка электронных импульсов регистрации происходит по вполне традиционной схеме (рис. 8): сигнал с гелиевого счетчика через разделительный высоковольтный конденсатор поступает на зарядочувствительный усилитель Amptek A225 с постоянной времени формирования 2,6 мкс. Далее сигнал поступает на усилитель-формирователь и дискриминатор низкого уровня Amptek A206. В схеме предусмотрена подача двух различных уровней дискриминации полезного сигнала от шумов: низкий уровень используется во время нормальной работы, повышенный применяется для подавления повышенных шумов в аналоговом тракте детектора в случае неблагоприятной электромагнитной обстановки.

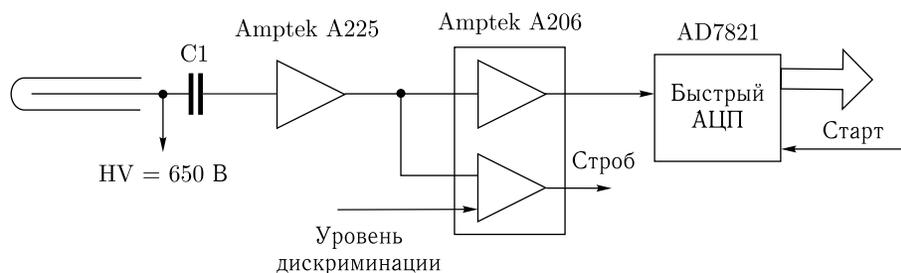
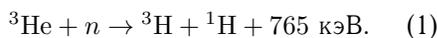


Рис. 8. Схема обработки сигналов с гелиевых счетчиков

Оцифрованные спектры отсчетов регистрируются в 16 или 32 спектральных каналах (для АДРОН-ЛР и АДРОН-ЭМ соответственно). Известно, что форма спектров отсчетов гелиевых счетчиков не соответствует спектру энергий зарегистрированных нейтронов, а отражает ядерную реакцию взаимодействия нейтрона с ядром ${}^3\text{He}$ (рис. 9):



Этот спектр отражает энергию, оставленную внутри рабочего объема нейтронного счетчика двумя результирующими частицами (триконом и протоном) в реакции (1). Пик в точке А (пик полного поглощения) соответствует всей суммарной энергии двух частиц (765 кэВ), а левое «плато» соответствует реакциям с частичным выходом одной из частиц из рабочего объема детектора (пристеночные эффекты). Оцифровка и запись формы спектра нейтронных счетчиков крайне необходима и во время штатной работы прибора и позволяет убедиться в отсутствии шумов в аналоговом тракте, отсутствии регистрации заряженных частиц в нейтронном детекторе и пр.

1.2.2. Детектор γ -лучей. В части спектрометрических измерений γ -излучения для приборов АДРОН был использован опыт создания меркурианского гамма- и нейтронного спектрометра (МГНС) на борту Европейского космического аппарата «БеппиКоломбо», который в настоящее время находится на перелетной траектории к Меркурию [9].

В γ -детекторе применяется перспективный сцинтиллятор CeBr_3 , который обладает несколько худшим разрешением, чем его аналог из LaBr_3 (4,5% против 3,2% на линии ${}^{137}\text{Cs}$), однако он не имеет собственной радиоактивности в районе энергии 1,4 МэВ. Этот энергетический диапазон включает линию от ${}^{40}\text{K}$, измерение которой важно при проведении планетных исследований [10].

В качестве устройства съема сигнала используется традиционный вакуумный ФЭУ: для прибора АДРОН-ЛР с трехдюймовым кристаллом — это Hamamatsu R1307-13, для прибора АДРОН-ЭМ с двухдюймовым кристаллом — это ET Enterprises 9272В. Основная сложность при выборе ФЭУ для ядерных приборов космического применения заключается в воздействии на них высоких вибрационных нагрузок во время старта ракетносителя и вывода аппарата на расчетную орбиту [11] — выбор ФЭУ усиленной конструкции крайне невелик, а для отдельных размеров сцинтилляторов и вовсе отсутствует. Но даже при использовании усиленных ФЭУ необходима

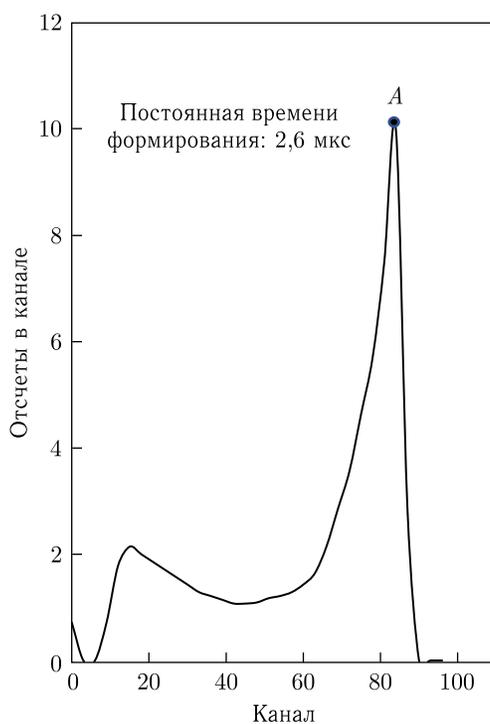


Рис. 9. Пример спектра отсчетов нейтронного детектора на основе ${}^3\text{He}$

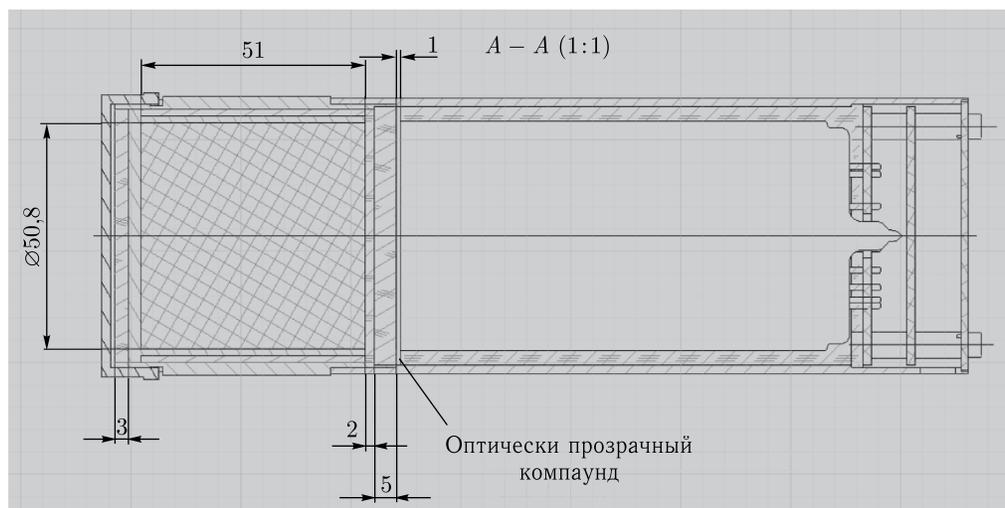


Рис. 10. Конструкция сцинтиблока прибора АДРОН-ЭМ

особая конструкция детектора, смягчающая вибрационные и ударные нагрузки, а также предотвращающая разгерметизацию кристалла CeBr_3 (рис. 10). Такие кристаллы являются в высшей степени гигроскопичными, и даже минимальная потеря герметичности влечет за собой на первых порах ухудшение разрешения, а впоследствии и полное разрушение кристалла.

Важной характеристикой γ -спектрометров для планетных исследований является линейность энергетической шкалы, определяющая связь спектральных каналов с энергиями отсчетов. Хорошо известно, что одно из преимуществ сцинтилляционных детекторов на основе бромидов — очень высокий световыход [12]. Однако при использовании с этими кристаллами ФЭУ, включенного по стандартной схеме со всеми подключенными усилительными динодами и анодом на энергиях свыше 5–6 МэВ, возникает эффект насыщения последних динодов, что приводит к потере линейности энергетической шкалы и фактической потере спектрометрической функции прибора. Для решения этой проблемы было предложено подключить ФЭУ с использованием уменьшенного количества динодов, а неиспользуемые диноды подключить к потенциалу предпоследнего используемого (рис. 11). Благодаря этому общий коэффициент усиления ФЭУ снижается, насыщения последних используемых динодов не происходит, а высокий световыход сцинтиллятора позволяет обеспечить необходимый коэффициент усиления. Общее количество необходимых динодов определяется экспериментально и зависит от конкретной модели ФЭУ. В конкретных случаях приборов АДРОН использовалось 5 динодов из 8 для ФЭУ R1307-13 (АДРОН-ЛР) и 8 из 10 для ФЭУ 9272В (АДРОН-ЭМ).

Для быстрой привязки и обработки аналогового сигнала (менее 4 мкс) с применением спектрометрической шкалы с 4095 каналами (12 бит) используется техника Track-and-Hold со схемой быстрого сброса заряда (см. рис. 11): полезный сигнал от отсчета после предусилителя и срабатывания компаратора дискриминации попадает на схему поиска пика. Для предотвращения наложений сигнала от другого отсчета

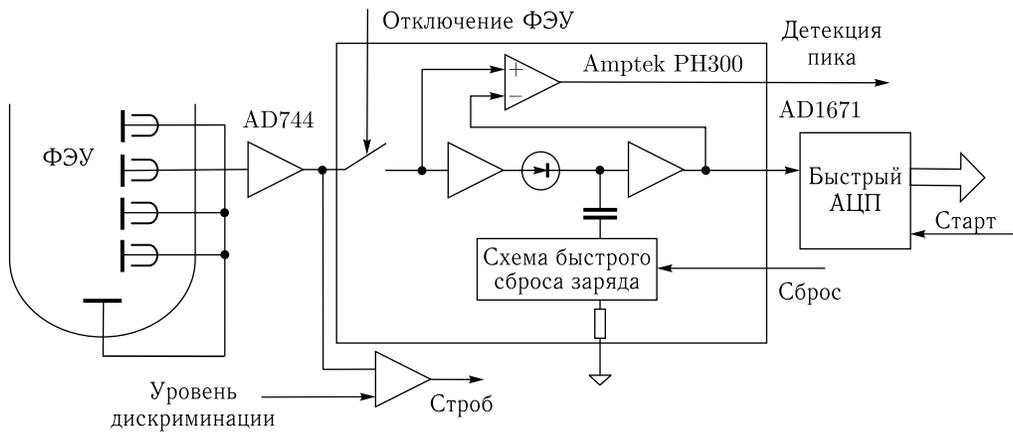


Рис. 11. Схема обработки сигнала γ -детектора

эта схема после нахождения пика заряда отключается от ФЭУ. После оцифровки сигнала быстрым АЦП и считывания его происходит сброс накопленного заряда. Получено, что общее мертвое время в такой схеме не превышает 4 мкс. Обеспечение в приборе такого быстродействия очень важно для применения γ -спектрометра для измерения послепикового γ -излучения с высоким временным разрешением.

1.2.3. Узел высокого напряжения. Для работы всех трех детекторов нейтронов и γ -лучей необходимо высокое напряжение: 600–700 В для нейтронных счетчиков и около 1,4 кВ для ФЭУ. Поскольку оценка содержания водорода в исследуемом грунте получается путем вычитания измерений пропорциональных счетчиков нейтронов, нецелесообразно использование отдельных источников высокого напряжения для каждого счетчика отдельно: при отказе любого из них результат теряется. Исходя из этого в конструкции приборов предусмотрено применение только двух неза-

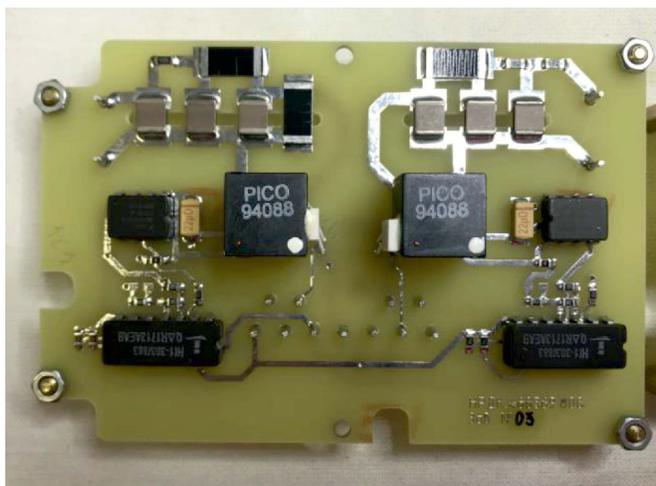


Рис. 12. Плата высоких напряжений прибора АДРОН-ЭМ

висимых источников высокого напряжения — для двух детекторов нейтронов и для γ -спектрометра. Это позволило улучшить габаритно-массовые параметры и снизить общее энергопотребление прибора.

В высоковольтных схемах приборов используются хорошо себя зарекомендовавшие вторичные высоковольтные преобразователи фирмы PICO Electronics моделей AV — эти источники имеют крайне малые габариты (менее 0,1 куб. дюйма в объеме), высокую радиационную стойкость. За все суммарное время полной эксплуатации (более 60 лет) в составе приборов ХЕНД, БТН-М1, ЛЕНД, ДАН, ФРЕНД и МГНС в условиях космического полета не было отмечено ни одного отказа (рис. 12). Для возможного компенсирования деградации уровня высокого напряжения в условиях космической радиации в конструкции высоковольтных блоков заложено два фиксированных уровня выходных напряжений.

1.3. Устройство цифровой части детекторного блока. Как указывалось выше, имеются три основных отличия между приборами АДРОН-ЛР и АДРОН-ЭМ, и на каждом из них необходимо остановиться подробнее.

Первым и самым важным отличием является использование различных по своей архитектуре центральных вычислительных узлов. В связи с более ранними сроками разработки прибора АДРОН-ЛР (2010–2012 гг.) ядром такого блока прибора является радиационно-стойкая ПЛИС фирмы Актел RT3PE3000L объемом 3 млн эквивалентных логических вентилях. Для программирования структуры данной микросхемы использовался язык VHDL, и в финальной реализации микросхема представляет собой достаточно сложную машину состояний. Можно отметить, что исходный код данного проекта составляет более 8,5 тыс. строк кода. Прибор АДРОН-ЭМ разрабатывался гораздо позже (2016–2017 гг.), уже в условиях необходимого импортозамещения. Было принято решение заменить ПЛИС на отечественный радиационно-стойкий микроконтроллер фирмы «Миландр» 1986VE8T. Микроконтроллер имеет гибкий алгоритм функционирования, определяемый программным обеспечением, однако является однозадачным, что для этого микроконтроллера компенсируется высокой производительностью и большим количеством аппаратных периферийных блоков. Он содержит встроенные блоки АЦП, ЦАП, интерфейсов UART, SPI и пр.

Вторым важным отличием приборов является наличие у прибора АДРОН-ЭМ дополнительного дозиметрического блока АДРОН-ДМ разработки Института космических исследований и технологий Болгарской академии наук (ИКИТ БАН), что повлекло за собой, во-первых, изменение алгоритма работы программного обеспечения и системы командования прибором и, во-вторых, увеличение оперативной памяти для хранения результатов измерений дозиметра до их передачи в бортовую массовую память космического аппарата.

Третьим же важным отличием является наличие у прибора АДРОН-ЭМ собственной автономной системы обогрева критических узлов прибора, которая работает в полностью автоматическом режиме. Ее включение/выключение осуществляется с помощью термостатического элемента на базе биметалла. Эта система для повышения живучести и надежности прибора не связана с его цифровой электроникой.

Все остальные функции центральных вычислительных узлов приборов серии АДРОН совпадают:

— прием, проверка корректности и выполнение команд от бортовой командной системы;

- обработка и запись в память событий от двух нейтронных счетчиков с быстрой обработкой данных;
- обработка и запись в память событий от γ -детектора с быстрой обработкой данных;
- управление импульсным нейтронным генератором в режиме активных измерений;
- контроль после каждого импульса нейтронов параметров высокого напряжения (уровня и временных параметров зарядки высокого напряжения) и тепловых режимов ИНГ в режиме активных измерений;
- управление блоками высокого напряжения (включение/выключение и установка уровней);
- управление дискриминаторами аналоговых цепей детекторов нейтронов и γ -лучей;
- формирование и передача кадров научных данных и служебной информации (статус прибора, режимы работы, значения термодатчиков и пр.) в бортовую массовую память КА;
- для прибора АДРОН-ЭМ: выделение и передача команд для блока дозиметра, прием, промежуточное хранение кадров, а также последующая передача дозиметрической телеметрии в бортовую массовую память КА.

2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПРИБОРОВ, КОМАНДНАЯ И ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Прибор АДРОН имеет три режима работы: дежурный, пассивный и активный.

В дежурном режиме отсутствует какая-либо измерительная активность, и прибор передает на борт только информацию о значениях его служебных параметров (температуры в различных частях прибора, напряжения питания и пр.).

В пассивном режиме прибор осуществляет измерения детекторами нейтронов и γ -лучей с накоплением спектров отсчетов без развертки по времени. При работе в активном режиме прибор ведет накопление спектров нейтронов и γ -лучей для интервалов временной шкалы, начало которой синхронизировано с началом каждого нейтронного импульса. Во время измерений для всех детекторов используется единая временная шкала, которая содержит 58 временных интервалов. Первый из них самый короткий и накапливает энергетический спектр сразу после импульса ИНГ (5 мкс по умолчанию), а 58-й соответствует практически фоновым измерениям. Он продолжается от завершения 57-го временного интервала и до начала следующего импульса ИНГ (рис. 13). Для гибкой настройки временной шкалы возможно изменение длины первого интервала и изменение продолжительностей последующих интервалов единым настроечным множителем.

В активном режиме с частотой пульсирования 10 Гц нейтронного генератора потребление приборов АДРОН составляет 21 Вт для АДРОН-ЛР и 24,5 Вт для АДРОН-ЭМ (см. табл. 1). Постоянная работа приборов на борту КА при таком энергопотреблении может оказаться невозможной. Как альтернатива активному режиму возможна работа приборов в режиме пассивных измерений, в котором потребление прибора значительно снижается до 7 Вт для АДРОН-ЛР и 10,5 Вт для АДРОН-ЭМ.

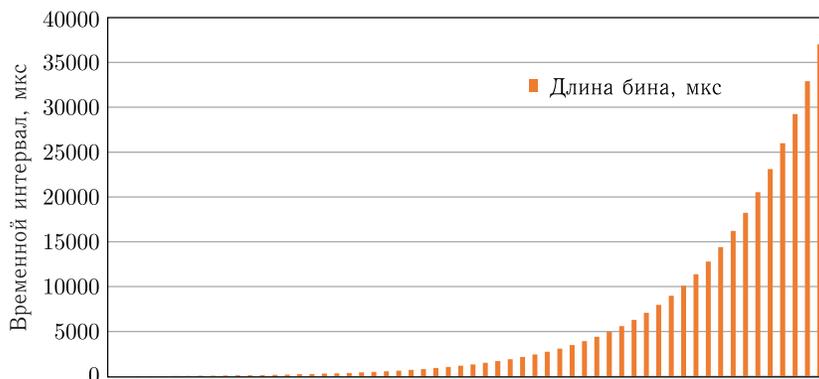


Рис. 13. Пример шкалы временной развертки при работе в активном режиме. Зависимость длины временного интервала от его номера

Таблица 2. Список команд приборов АДРОН

Мнемоника команды	Описание команды
ADRON_SET_MODE	Установка необходимого режима работы аппаратуры: дежурный, пассивный или активный (работа с ИНГ)
ADRON_SET_HV	Установка уровней высокого напряжения для конкретного детектора
ADRON_SET_DESCR	Установка уровней дискриминаторов для конкретного детектора
ADRON_SET_ACC_TIME	Установка времени накопления и передачи кадров телеметрии
ADRON_SET_BIN	Установка параметров псевдологарифмической временной шкалы при работе в активном режиме
PNG_SET_PT	Установка максимального времени пульсирования ИНГ в активном режиме
PNG_SET_PNG_F	Установка частоты пульсирования ИНГ в активном режиме
PNG_SET_NP	Установка максимального количества импульсов ИНГ в активном режиме
PNG_ENABLE	Установка сигнала разрешения пульсирования для ИНГ
PNG_PROTECTION	Разрешение/запрет контроля параметров ИНГ в активном режиме
PNG_START_PULSING	Старт/стоп пульсирования в активном режиме
DOSI_READOUT_TIME*	Установка времени опроса данных дозиметрического блока
DOSI_CMD*	Команда для передачи в дозиметрический блок

* Команды только для АДРОН-ЭМ.

Объемы одного кадра научной и служебной информации и их содержание приведены в табл. 3. Кадры дозиметрического блока прибора АДРОН-ЭМ замешиваются, добавляются к телеметрической информации прибора и в данной таблице не учтены.

Командование приборами АДРОН осуществляется от бортовых систем аппаратов с помощью посылок длиной 4 байта (1 байт — код команды, 3 байта — параметры команды) с частотой посылок не чаще 1 команды в секунду, общий список ко-

Таблица 3. Содержание телеметрической информации и объемы кадров

Содержание информации	Режим работы		
	Дежурный	Пассивный	Активный
Служебные параметры	Счетчики кадров, временные привязки бортового времени к внутреннему, история последних 10 полученных команд, 10 значений температур, счетчики принятых и отвергнутых команд, все текущие значения параметров прибора, история значений высокого напряжения ИНГ (254 байта)	То же	То же
Научные данные	—	Бортовое время начала накопления, бортовое время окончания накопления, внутреннее время начала накопления, внутреннее время окончания накопления, 2 спектра от счетчиков нейтронов, 1 спектр от γ -детектора (8352 байта)	Бортовое время начала накопления, бортовое время окончания накопления, внутреннее время начала накопления, внутреннее время окончания накопления, 2×58 спектров от счетчиков нейтронов, 58 спектров от γ -детектора (482 592 байта)
Объем кадра, байт	254	8606	482 846

манд приведен в табл. 2. Получение и исполнение каждой команды сопровождается ответом-квитанцией с прибора с кодом результата выполнения команды.

В связи с наличием в составе приборов ИНГ, который является потенциально опасным источником нейтронов с точки зрения радиационной безопасности технического персонала на всех этапах отработок и испытаний приборов, особое внимание было уделено формированию набора команд, переводящих прибор в активный режим работы. Для перевода ИНГ в режим генерации нейтронов была разработана специальная последовательность команд, практически исключающая возможность непреднамеренного включения генератора. При нарушении последовательности или значения одного из параметров центральный вычислительный узел полностью блокирует работу ИНГ. Последовательность команд при этом такова:

- 1) установка частоты пульсирования (опционально, 10 Гц по умолчанию);
- 2) установка параметров псевдологарифмической шкалы (опционально);

- 3) установка разрешения/запрещения контролируемых параметров ИНГ (опционально);
- 4) установка максимального времени пульсирования;
- 5) установка максимального количества импульсов;
- 6) установка сигнала разрешения пульсирования;
- 7) установка активного режима;
- 8) старт пульсирования.

Остановка импульсной генерации нейтронов происходит в трех случаях: по команде остановки пульсирования, по достижении максимального количества импульсов или времени пульсирования (в зависимости от того, что произойдет быстрее). Также прекращение работы ИНГ происходит в случае нарушения границ значений его контролируемых параметров (уровня высокого напряжения ИНГ, времени зарядки высоковольтного конденсатора, температуры ИНГ).

Для записи спектров нейтронных счетчиков используется 32 энергетических канала двухбайтовой длины, для спектров γ -детектора — 4095 каналов также двухбайтовой длины. Отсюда следует, что в каждом канале может быть записано до 65536 отсчетов за кадр измерений. Объем накопленной научной информации в одном кадре активного режима (с разверткой в 58 временных интервалов) составляет 7424 байта для двух нейтронных счетчиков и 475 136 байт для γ -детектора. С учетом служебной информации одно активное измерение соответствует кадру данных с полным объемом 552 298 байт. Используя команду установки времени накопления кадров (см. табл. 2), можно гибко регулировать общий объем телеметрической информации. В пассивном режиме данные измерений записываются без временной развертки и размер одного кадра измерений составляет 10 190 байт.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ КАЛИБРОВКИ ПРИБОРОВ

Перед поставкой летных образцов аппаратуры АДРОН были проведены всесторонние калибровки прибора с использованием реперных нейтронных и γ -источников. Основной целью этих калибровок являлось определение основных физических характеристик детекторов приборов АДРОН, сопоставление получаемых прибором измерений калиброванному физическому воздействию, позволяющих предсказать темпы счета в различных детекторах прибора и оценить эффективность приборов в различных условиях измерений [13]. Оценка эффективности детекторов НА АДРОН в ходе наземных калибровок позволит при выполнении космического эксперимента при перелете и на поверхности Луны и Марса корректно пересчитывать измерения отсчетов в детекторах в соответствующие физические величины (спектральную плотность потока нейтронов и γ -лучей), а данные калибровок (включая температурные зависимости нейтронных и γ -спектров, дифференциальную нелинейность амплитудной шкалы и др.) будут необходимы для точного учета всех значимых инструментальных эффектов и внесения различных поправок в измерения прибора при обработке поступающих данных. Всего в процессе калибровок были выполнены следующие работы:

- произведена точная оценка значения дискриминаторов нейтронных детекторов для всех конфигураций прибора;
- измерены формы амплитудных спектров нейтронных детекторов для разных значений высокого напряжения и для крайних значений рабочих температур (рис. 14);

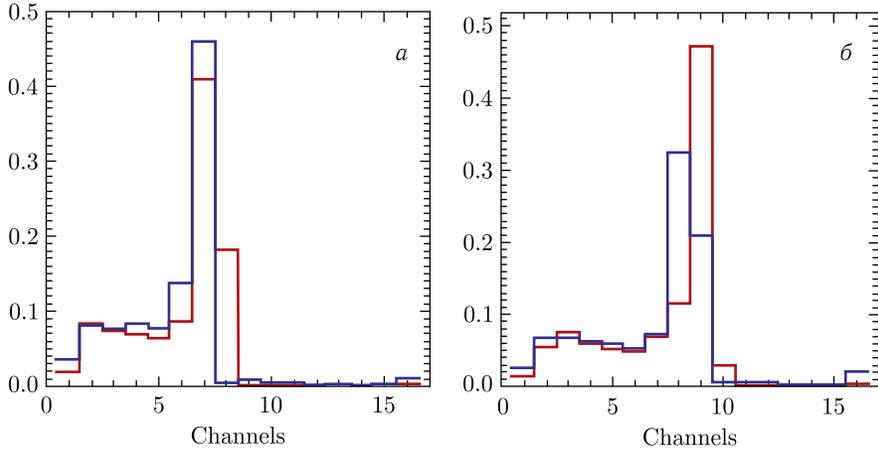


Рис. 14 (цветной в электронной версии). Пример нормированных спектров в эпителивном (синий) и тепловом (красный) детекторах при нижнем (а) значении высокого напряжения и верхнем (б)

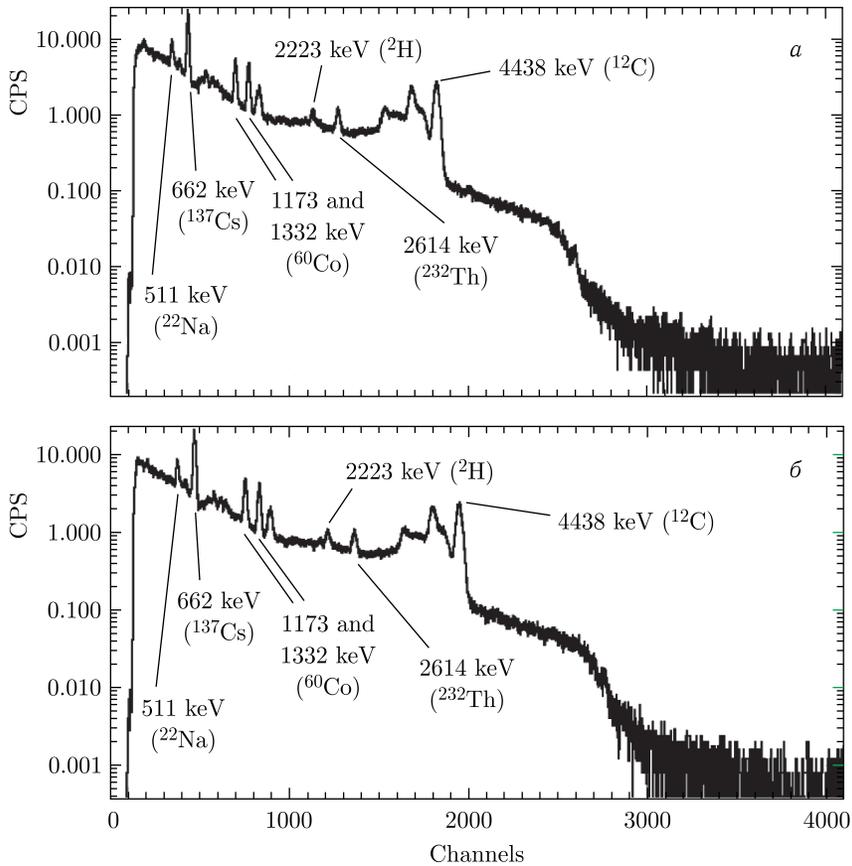


Рис. 15. γ -спектры при нижнем (а) значении высокого напряжения и при верхнем (б)

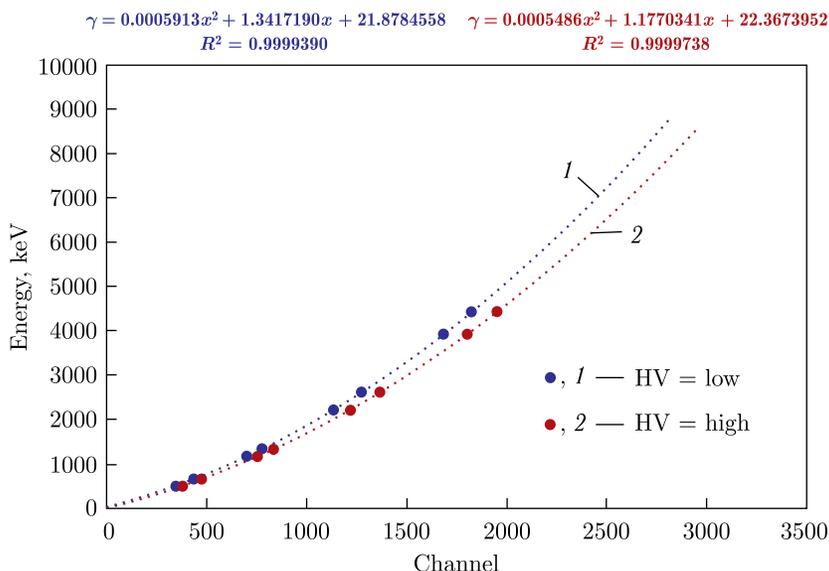


Рис. 16 (цветной в электронной версии). Зависимости канал–энергия для нижнего (синий, 1) и верхнего (красный, 2) значений высокого напряжения в γ -детекторе и аппроксимирующие функции

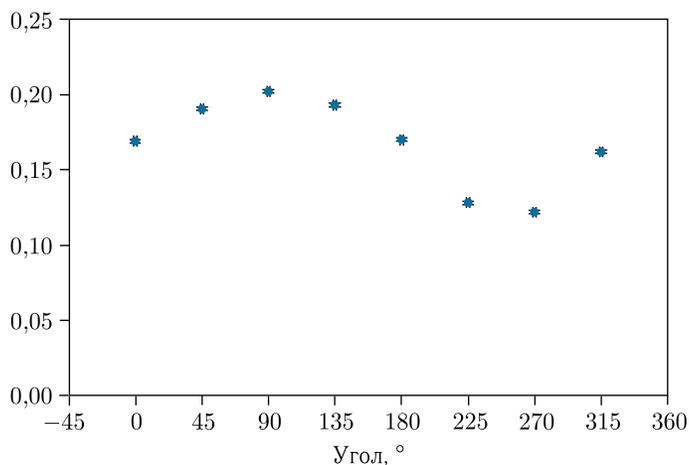


Рис. 17. Пример угловой зависимости эффективности γ -детектора для энергии 662 кэВ

— произведена калибровка спектральной шкалы γ -детектора для разных значений высокого напряжения (использовался нейтронный источник и γ -источники ОСГИ ^{23}Na , ^{137}Cs и ^{60}Co , рис. 15);

— были построены зависимости канал–энергия для обоих значений высокого напряжения в γ -детекторе и найдены аппроксимирующие функции (рис. 16);

— коэффициент корреляции для обеих функций очень близок к 1, что позволяет пересчитывать каналы в энергию с высокой точностью 1–3 кэВ в диапазоне 0,5–5 МэВ;

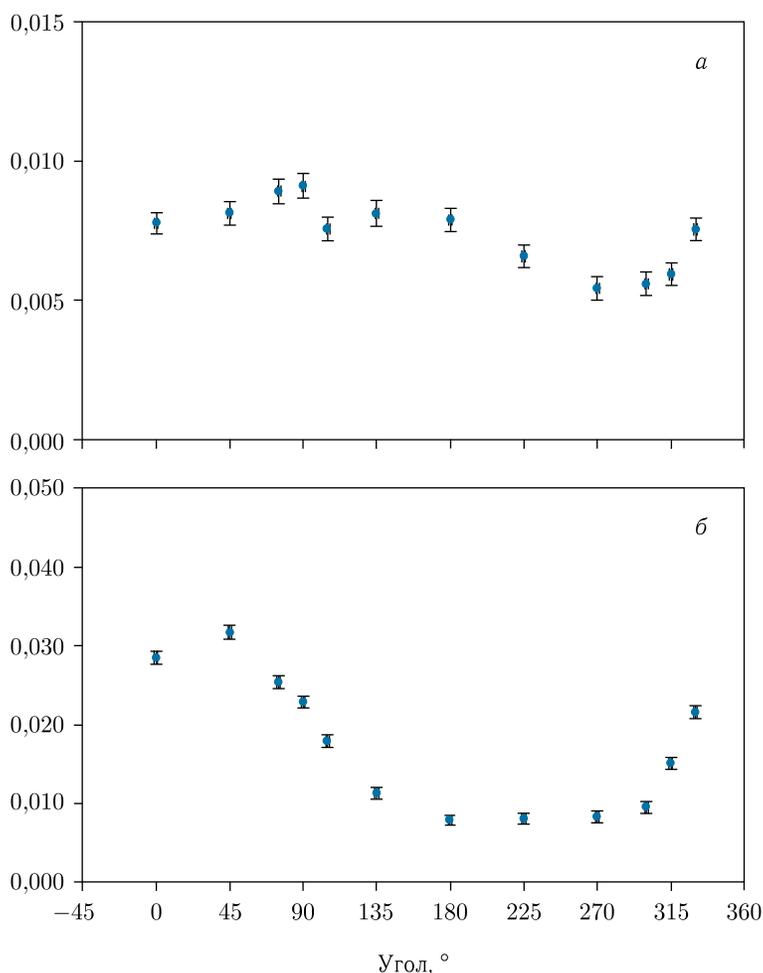


Рис. 18. Угловые функции эффективности для эпитеплового (а) и теплового (б) нейтронных детекторов

— измерена эффективность γ -детектора в зависимости от энергии и угла прихода γ -кванта (рис. 17);

— измерена эффективность нейтронных детекторов в зависимости от энергии и угла прихода нейтрона (рис. 18);

— была получена функция аппроксимации для устранения дифференциальной нелинейности каналов γ -детектора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прибор АДРОН-ЛР успешно прошел весь цикл конструкторско-доводочных, приемосдаточных и стыковочных испытаний и установлен на борт космического аппарата «Луна-25» [14]. Его запуск на Луну запланирован на третий квартал 2022 г. После по-

садки и начала проведения программы научных исследований этот прибор позволит:

- произвести поиск и определить содержание воды в составе подповерхностного грунта южной полярной области Луны в месте посадки аппаратов на глубину 0,5–1 м;
- определить элементный состав подповерхностного грунта исследуемого космического тела на глубину до 1 м;
- исследовать физические свойства приповерхностного грунта (слоистая структура, плотность, температурные эффекты);
- произвести длительный мониторинг радиационной обстановки в месте посадки аппаратов.

Аналогичный прибор входит в состав комплекса научной аппаратуры перспективного лунного аппарата «Луна-27», предназначенного для продолжения лунных полярных исследований в непосредственной окрестности Южного полюса.

Рассматривается вопрос о включении нейтронного генератора в состав прибора АДРОН-ЭМ проекта «ЭкзоМарс-2022». Его работа на поверхности Марса в активном режиме позволит измерить элементный состав марсианского реголита в районе посадки, провести оценку массовой доли воды в грунте и измерить слоистую структуру ее залегания по глубине.

В более удаленной перспективе прибор серии АДРОН планируется установить на борт автоматической посадочной станции для исследования Венеры. В отличие от Луны и Марса, поверхность Венеры не бомбардируется галактическими космическими лучами, которые не проникают через толстую атмосферу планеты. Собственное γ -излучение Венеры возникает только вследствие распада естественных радиоактивных изотопов калия, тория и урана. Поэтому для изучения элементного состава вещества и возможного присутствия в нем молекул воды необходимо применить активный метод нейтронного каротажа. Прибор из серии АДРОН с нейтронным генератором максимально подойдет для проведения такого исследования.

Разработка приборов АДРОН-ЛР и АДРОН-ЭМ выполнена по заказу госкорпорации «Роскосмос». Настоящая статья подготовлена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема ОСВОЕНИЕ, № 122012400177-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филлипов Е. М. Прикладная ядерная геофизика. М., 1973.
2. *Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Sanin A. B., Starr R. D., Lisov D. I., Kuzmin R. O., Behar A., Boynton W. V., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Milliken R. E., Mischna M. A., Moersch J. E., Tate C. G.* Water and Chlorine Content in the Martian Soil along the First 1900 m of the Curiosity Rover Traverse as Estimated by the DAN Instrument // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2014. V. 119. P. 1579–1596.
3. *Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Barmakov Yu. N., Behar A., Bitulev A., Bobrovitsky Yu., Bogolubov E. P., Boynton W. V., Bragin S. I., Churin S., Grebennikov A. S., Konovalov A., Kozlyev A. S., Kurdumov I. G., Krylov A., Kuznetsov Yu. P., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Ryzhkov V. I., Sanin A. B., Shvetsov V. N., Smirnov G. A., Sholeninov S., Timoshenko G. N., Tomilina T. M., Tuvakin D. V., Tretyakov V. I., Troshin V. S., Uvarov V. N., Varenikov A., Vostrukhin A.* The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment for NASA's 2009 Mars Science Laboratory // *Astrobiology*. 2008. V. 8, No. 3. P. 605–612.

4. *Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Varenikov A.B., Barmakov Yu.N., Behar A., Bobrovniksky Y.I., Bogolubov E.P., Boynton W.V., Harshman K., Kan E., Kozyrev A.S., Kuzmin R.O., Malakhov A.V., Mokrousov M.I., Ponomareva S.N., Ryzhkov V.I., Sanin A.B., Smirnov G.A., Shvetsov V.N., Timoshenko G.N., Tomilina T.M., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A.A.* Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment Onboard NASA's Mars Science Laboratory // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 559–582.
5. *Черепанов В.В., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А., Егурицов С.А., Иванов Ю.В., Лысенков А.И., Меркулов А.В.* Применение технологий нейтронного каротажа скважин при разработке нефтегазоконденсатных месторождений. Состояние и перспективы развития // *Газовая промышленность.* 2019. № 1. С. 44–49.
6. *Reijonen J.* Compact Neutron Generators for Medical, Homeland Security and Planetary Exploration // *Proc. of 2005 Particle Accel. Conf., Knoxville, TN USA, 2005.* P. 49–53.
7. *Головин Д.В., Мокроусов М.И., Митрофанов И.Г., Козырев А.С., Литвак М.Л., Малахов А.В., Никифоров С.Ю., Санин А.Б., Бармаков Ю.Н., Боголюбов Е.П., Шоленинов С.Э., Юрков Д.И.* Прибор АДРОН-ЛР для активного нейтронного зондирования состава лунного вещества // *Астрон. вестник.* 2021. Т. 55, № 6. С. 542–549.
8. *Semkova J., Benghin V., Mitrofanov I., Zelenyi L., Malakhov A., Koleva R., Shurshakov V., Dachev T., Matviichuk Y., Tomov B., Maltchev S., Dimitrov P., Krastev K., Golovin D., Mokrousov M., Sanin A., Litvak M., Kozyrev A., Tret'yakov V., Nikiforov S., Vostrukhin A., Grebennikova N., Drobyshev S.* Charged Particles Radiation Measurements with Liulin-MO Dosimeter of FRENID Instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the Transit and in High Elliptic Mars Orbit // *Icarus.* 2018. V. 303. P. 53–66.
9. *Mitrofanov I.G., Kozyrev A.S., Konovalov A., Litvak M.L., Malakhov A.A., Mokrousov M.I., Sanin A.B., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A.V., Bobrovnikskiy Yu.I., Tomilina T.M., Gurvits L., Owens A.* The Mercury Gamma and Neutron Spectrometer (MGNS) onboard the Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission // *Planet. Space Sci.* 2010. V. 58. P. 116–124.
10. *Kozyrev A., Mitrofanov I., Owens A., Quarati F., Benkhoff J., Bakhtin B., Fedosov F., Golovin D., Litvak M., Malakhov A., Mokrousov M., Nuzhdin I., Sanin A., Tret'yakov V., Vostrukhin A., Timoshenko G., Shvetsov V., Granja C., Slavicek T., Pospisil S.* A Comparative Study of $\text{LaBr}_3(\text{Ce}_{3+})$ and CeBr_3 Based Gamma-Ray Spectrometers for Planetary Remote Sensing Applications // *Rev. Sci. Instrum.* 2016. V. 87. P. 085112.
11. *Вострухин А.А., Головин Д.В., Козырев А.С., Литвак М.Л., Малахов А.В.* Микрофонный эффект в сцинтилляционном γ -спектрометре в условиях вибрационных воздействий на борту космического аппарата // *Косм. техника и технологии.* 2017. № 1(16). С. 82–88.
12. *Quarati F., Owens A., Dorenbos P., Haas J.D., Benzoni G., Blasi N., Boiano C., Brambilla S., Camera F., Alba R., Bellia G., Maiolino C., Santonocito D., Ahmed M., Brown N., Stave S., Weller H., Wu Yi.K.* High Energy Gamma-Ray Spectroscopy with LaBr_3 Scintillation Detectors // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 629, No. 1. P. 157–169.
13. *Литвак М.Л., Головин Д.В., Колесников А.Б., Вострухин А.А., Дьячкова М.В., Козырев А.С., Митрофанов И.Г., Мокроусов М.И., Санин А.Б.* Наземные измерения с активным γ - и нейтронным спектрометром «АДРОН», предназначенным для лунных и марсианских посадочных миссий // *Астрон. вестн.* 2017. Т. 51, № 3. С. 189–203.
14. *Митрофанов И.Г., Зелёный Л.М., Третьяков В.И., Калашиников Д.В.* «Луна-25»: первая полярная миссия на Луну // *Астрон. вестн.* 2021. Т. 55, № 6. С. 497–508.
15. *van Loef E.V.D., Dorenbos P., van Eijk C.W.E., Krämer K., Güdel H.U.* High-Energy Resolution Scintillator: $\text{Ce}_3 + \text{Activated LaBr}_3$ // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 79. P. 1573–1575.
16. *Owens A.* Scintillators on Interplanetary Space Missions // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2008. V. 55, No. 3. P. 1430–1436.

17. Owens A., Bos A. J. J., Brandenburg S., Buis E., Dathy C., Dorenbos P., van Eijk C. W. E., Kraft S., Ostendorf R. W., Ouspenski V., Quarati F. Assessment of the Radiation Tolerance of LaBr₃:Ce Scintillators to Solar Proton Events // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 572, No. 2. P. 785.
18. Quarati F. G. A., Dorenbos P., van der Biezen J., Owens A., Selle M., Parthier L., Schotanus P. Scintillation and Detection Characteristics of High-Sensitivity CeBr₃ Gamma-Ray Spectrometers // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 729. P. 596–604.
19. Козырев А. С., Митрофанов И. Г., Бенкхофф Дж., Оуэнс А., Куарати Ф., Литвак М. Л., Малахов А. В., Мокроусов М. И., Тимошенко Г. Н., Швецов В. Н. Перспективный сцинтиляционный детектор на основе бромиды церия для космического γ -спектрометра МГНС // ПТЭ. 2016. № 4. С. 92–100.
20. Bodnarik J. G., Burger D. M., Burger A., Evans L. G., Parsons A. M., Schweitzer J. S., Starr R. D., Stassun K. G. Time-Resolved Neutron/Gamma-Ray Data Acquisition for *In Situ* Subsurface Geochemistry // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 707. P. 135–142.
21. Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Lisov D., Behar A., Boynton W. V., Deflores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Kozyrev A. S., Kuzmin R. O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M., Nikiiforov S., Shvetsov V. N., Stack K., Starr R., Tate C., Tret'yakov V. I., Vostrukhin A., and the MSL Team. Local Variations of Bulk Hydrogen and Chlorine Content Measured at the Contact between the Sheepbed and Gillespie Lake Units in Yellowknife Bay, Gale Crater, Using the DAN Instrument Onboard Curiosity // J. Geophys. Res.: Planet. 2014. V. 119. P. 1259–1275.
22. Sanin A. B., Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Lisov D. I., Starr R., Boynton W., Behar A., DeFlores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Kozyrev A. S., Kuzmin R. O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M. I., Nikiiforov S., Shvetsov V. N., Tate C., Tret'yakov V. I., Vostrukhin A. Data Processing of the Active Neutron Experiment DAN for a Martian Regolith Investigation // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 789. P. 114–127.
23. Дьячкова М. В., Митрофанов И. Г., Санин А. Б., Литвак М. Л., Третьяков В. И. Характеристика мест посадки космического аппарата «Луна-25» // Астрон. вестн. 2021. Т. 55, № 6. С. 522–541.

Получено 4 марта 2022 г.