Секция ПКЛ1 №164

НИЯУ МИФИ

Малоразмерный спектрометр «НАДЯ» для исследования потоков заряженных частиц в околоземном пространстве

А.И. Архангельский[1], А.В. Бакалдин[1,2], В.А. Ваганян[1], А.А. Леонов[1,3], А.Г. Майоров[1], Д.А. Мартиросов[1] от имени Лаборатории геокосмических исследований

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва, info@mephi.ru

[2]Научно-исследовательский институт системных исследований НИЦ “Курчатовский институт”, Россия, Москва, niisi@niisi.msk.ru

[3]Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Россия, Москва, office@lebedev.ru

Докладчик: ***Архангельский А.И. AIArkhangelskij@mephi.ru***

ВККЛ39 Дубна 29 июня – 03 июля 2026 г.

Введение

Разрабатываемый в настоящее время в НИЯУ МИФИ малоразмерный прецизионный спектрометр «НАДЯ» предназначен для регистрации и идентификации направленных потоков заряженных частиц в диапазоне энергий от **нескольких десятков до нескольких сотен МэВ**. Этот энергетический диапазон представляет интерес для детального изучения физики магнитосферы Земли, динамики радиационных поясов, а также пространственно-временных вариаций низкоэнергетической компоненты галактических космических лучей (ГКЛ) в высокоширотных областях.

Введение

Особое внимание в научной программе эксперимента уделяется непрерывному мониторингу солнечных космических лучей (СКЛ), исследованию механизмов их генерации, ускорения и распространения в межпланетной среде в периоды повышенной солнечной активности.

Получаемые данные важны для оперативного контроля космической погоды, моделирования радиационной обстановки в околоземном пространстве и оценки радиационных нагрузок на бортовую электронику космических аппаратов, дополняя данные уже проведённых экспериментов, в том числе прецизионных, таких как PAMELA, которым планируемый диапазон энергий был недоступен.

Основные технические характеристики

НИЯУ МИФИ

Прибор «НАДЯ» планируется к запуску на **экспериментальном варианте унифицированной космической платформы А-100**, разработанной в компании L5, на круговую солнечно-синхронную орбиту:

- средняя высота - **450–650 км**;
- наклонение - **98°**.

Данная конфигурация орбиты обеспечивает регулярное пересечение приполярных областей с низким геомагнитным порогом обрезания, а также зон Южной Атлантической Аномалии, что важно для проведения комплексного анализа анизотропии потоков частиц в различных гелиогеофизических условиях.

Основные технические характеристики

НИЯУ МИФИ

Запуск космического аппарата запланирован на **первую половину 2027** года. Основные летно-технические характеристики научной аппаратуры оптимизированы под жесткие ограничения ресурсов малых спутниковых платформ:

- полная масса прибора составляет **~3 кг**;
- среднее энергопотребление в режиме измерений не более **15 Вт**;
- поток научной телеметрической информации, передаваемый на наземный сегмент комплекса управления, достигает **10 Гбайт** в сутки, что гарантирует высокую статистическую обеспеченность регистрируемых событий.

Научные задачи миссии

НИЯУ МИФИ

Физика магнитосферы Земли и радиационных поясов

- Измерение направленных потоков протонов и электронов во внутреннем радиационном поясе Земли в области ЮАА
- Изучение процессов высыпания частиц, микровсплесков
- Исследование возможной связи высыпаний частиц из внутреннего радиационного пояса с сейсмической активностью
- Измерение пространственно-угловой и энергетической структуры области пенумбры ГКЛ в приполярных областях

Солнечные космические лучи, космическая погода

- Регистрация и спектральный анализ солнечных протонных событий (SPE)
- Мониторинг радиационной обстановки и индикация начала солнечных событий

Галактические космические лучи

- Прямые измерения потоков галактических космических лучей (ГКЛ) в области низких энергий

Платформа А100

НИЯУ МИФИ

- L5 – российская компания, основанная в 2024 г., специализирующаяся на полном цикле разработки, производства и эксплуатации микро-космических аппаратов;
- А100 - российская платформа класса 70–110 кг разработки компании L5;
- масса платформы до 100 кг. Полезная нагрузка – до 60 кг, транспортный габарит 0.67 м х 0.60 м х 0.60 м;
- срок активного существования на орбите 5 лет. Наработка ≥ 26 000 ч. Гарантийный срок 3 года;
- автономность до 7 суток без связи с наземным сегментом;
- пиковая мощность для полезной нагрузки - 600 Вт. Средняя мощность солнечных батарей за виток ≥ 120 Вт, АКБ ≥ 480 А·ч.
- Солнечно-синхронная орбита 450–650 км, наклонение 98°, ≥ 40 м/с ΔV на ксеноновом двигателе;
- ориентация ± 0,03° (3σ), Переориентация на 90° занимает не более 170 с.

Платформа А100

НИЯУ МИФИ

Платформа А100

НИЯУ МИФИ

- **Бортовой компьютер (БЦВМ)** собственной разработки L5. В основе 12-ядерный процессор 1.6+ ГГц;
    - управление КА в командном и автономном режиме;
    - сбор и передача на Землю служебной телеметрии;
    - контроль целевой и служебной аппаратуры;
    - цифровая обработка сигналов полезной нагрузки;
- два полукомплекта в холодном резервировании. ВБР 0,97 за 5 лет;
- готовность к работе ≤ 30 сек после подачи питания;
- синхронизация ±1,5 мкс. Стандарт 3GPP TS 38.108 гарантирует работу сетей 5G в космосе;
- операционная система архитектуры x86 Linux PREEMPT_RT Оптимизирована под работу в реальном времени. Полная поддержка современного стека бортового ПО. Динамическое перераспределение задач;
- 5G NTN (Non-Terrestrial Networks) / NB-IoT (Narrowband Internet of Things), поддержка задач ИИ и компьютерного зрения на борту.

Core – платформа: летающая лаборатория

НИЯУ МИФИ

В **первой половине 2027 года** в составе партнёрского космического аппарата на солнечно-синхронную орбиту будет выведена экспериментальная платформа массой 32 кг.

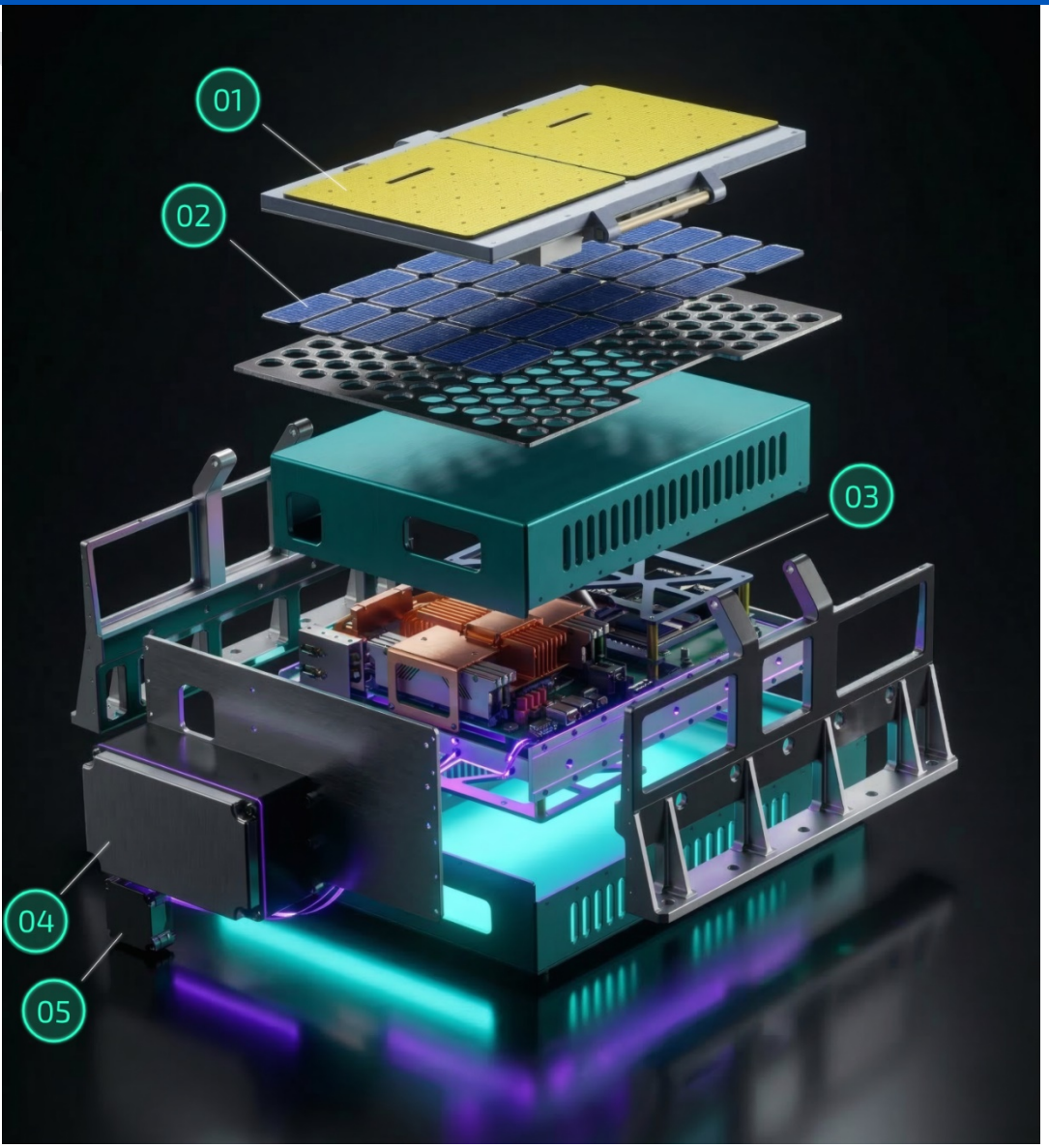
На борту — ключевые подсистемы, разработанные L5: БЦВМ, маховики, антенные решётки, система терморегулирования и отделения от разгонного блока. В течение года лётных испытаний каждая из них пройдёт реальную проверку на орбите перед тем как войти в платформу А-100.

Помимо служебных систем, на борту размещены элементы полезной нагрузки, включая **разрабатываемый в настоящее время в НИЯУ МИФИ малоразмерный прецизионный спектрометр «НАДЯ»**.

Core-платформа также открывает потенциал для развёртывания первого демонстрационного бортового дата-центра на основе разрабатываемой БЦВМ.

Core – платформа: летающая лаборатория

НИЯУ МИФИ



01 - Элемент активной антенной фазированной решётки (АФАР). Два одноканальных радиомодуля для телеметрии и приёма команд.

02 - Элемент фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). На борту одновременно установлены два типа ФЭП с разной технологией изготовления.

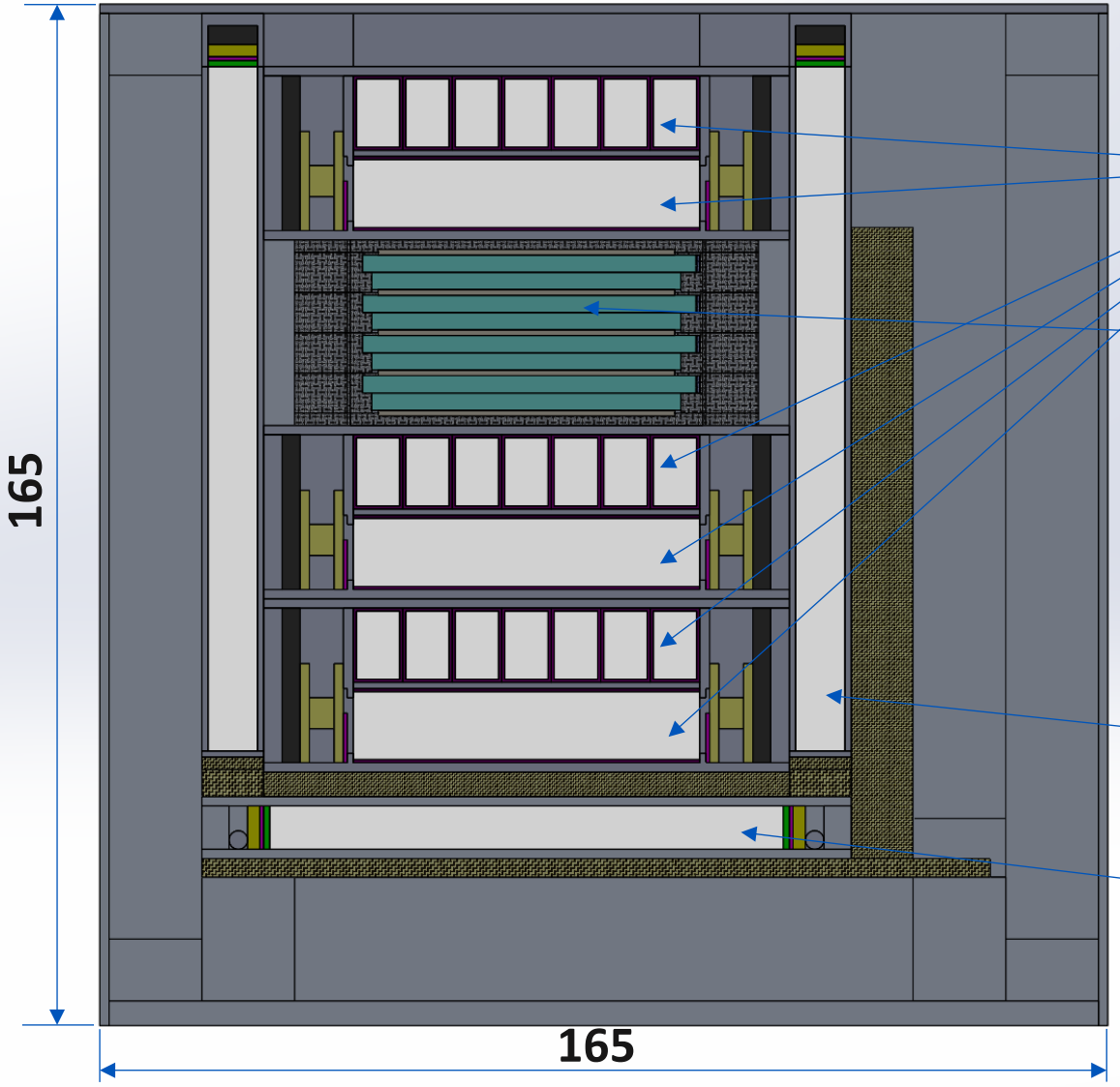
03 - Бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ). 12-ядерный вычислитель с ПЛИС-частью для кастомной логики управления. Поддерживает задачи ориентации, стабилизации и бортового ПО. На борту развёрнута нейросетевая модель на 9 млрд параметров — для верификации ИИ-вычислений в условиях орбиты.

04 - Аккумуляторная батарея (АКБ) 300 Вт·ч, номинал 24/32 В. В ходе миссии верифицируется поведение системы электропитания на орбите.

05 - Двигатели-маховики (ДМ). Маховики собственной разработки L5 обеспечивают управление угловым движением аппарата.

Малоразмерный спектрометр «НАДЯ»

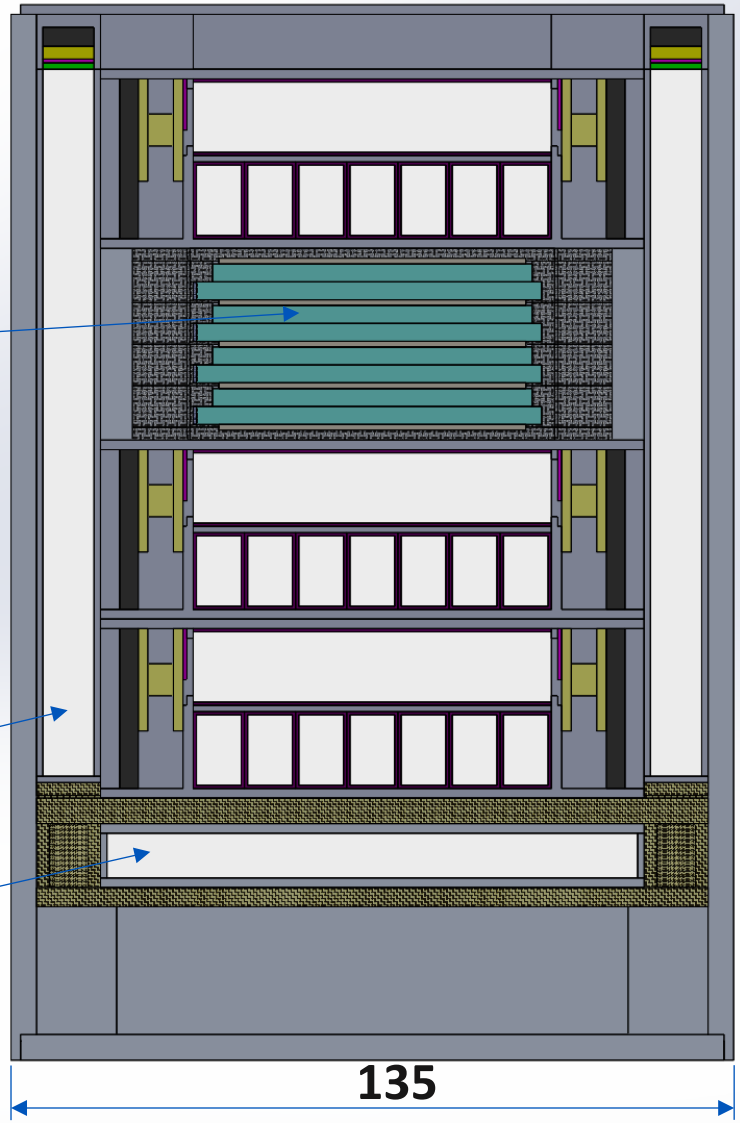
НИЯУ МИФИ



Сцинтилляционные детекторы
7x11x56 мм^3
S1-S6

SciFi
трекер
4 XY **плоскости**

Система антисовпадений
4 x AC_{side}
7x77x108 мм^3
7x97x108 мм^3
AC_{bottom}
7x83x83 мм^3



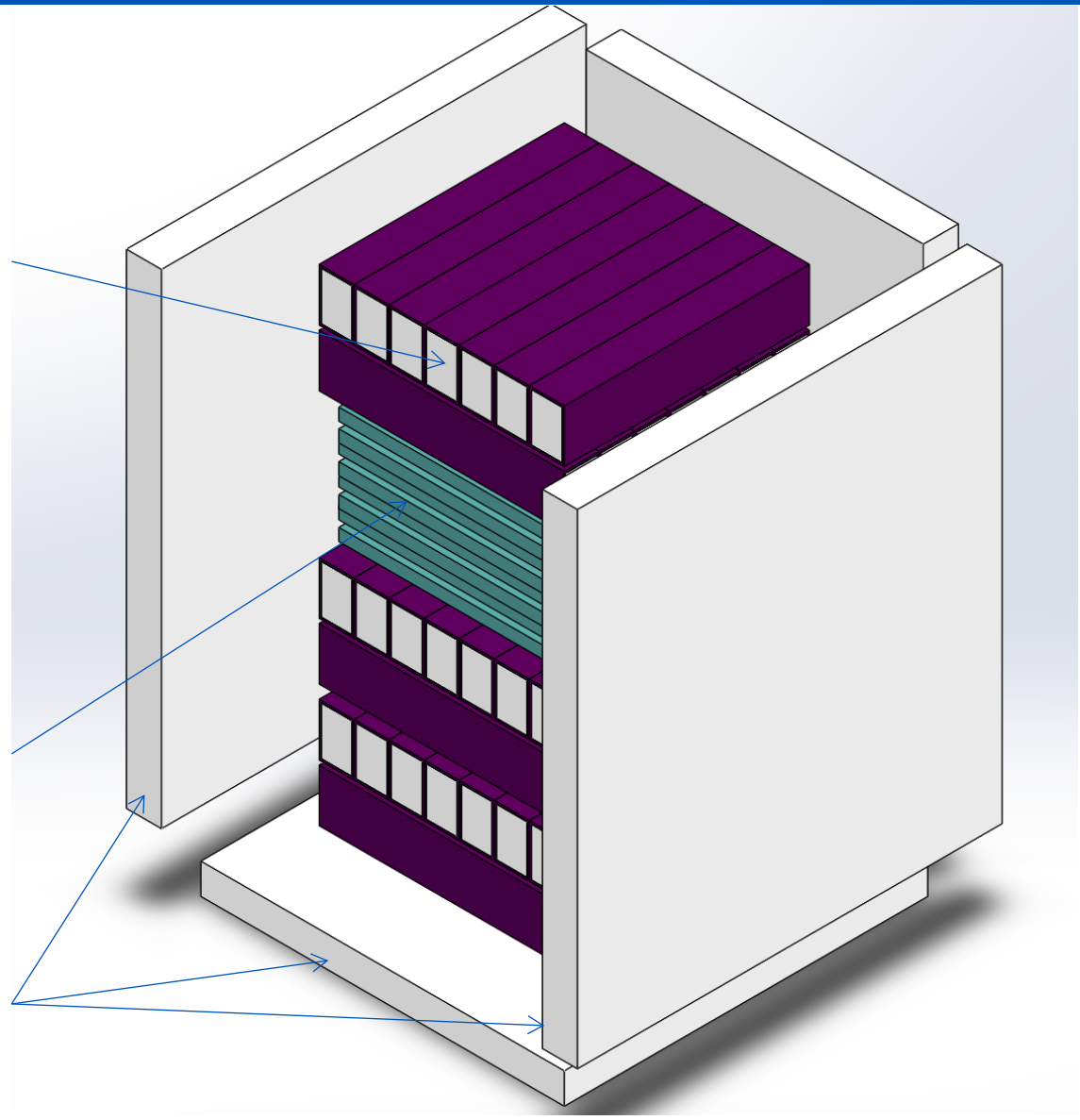
Малоразмерный спектрометр «НАДЯ»

НИЯУ МИФИ

Сцинтилляционные детекторы 7x11x56 мм^3 объединены в 6 взаимно ортогональных плоскостей S1-S6 по 7 детекторов в плоскости. Каждый детектор просматривается двумя SiPM MicroFC-60035-SMT размером 6 мм x 6 мм с противоположных торцов через оптические прокладки. Логические сигналы с противоположных торцов складываются по OR и запоминаются для каждого события. Для выработки триггера используется логическая сумма по OR всех детекторов плоскости. Суммарный аналоговый сигнал с каждой плоскости оцифровывается АЦП (AD7606) и запоминаются для каждого события.

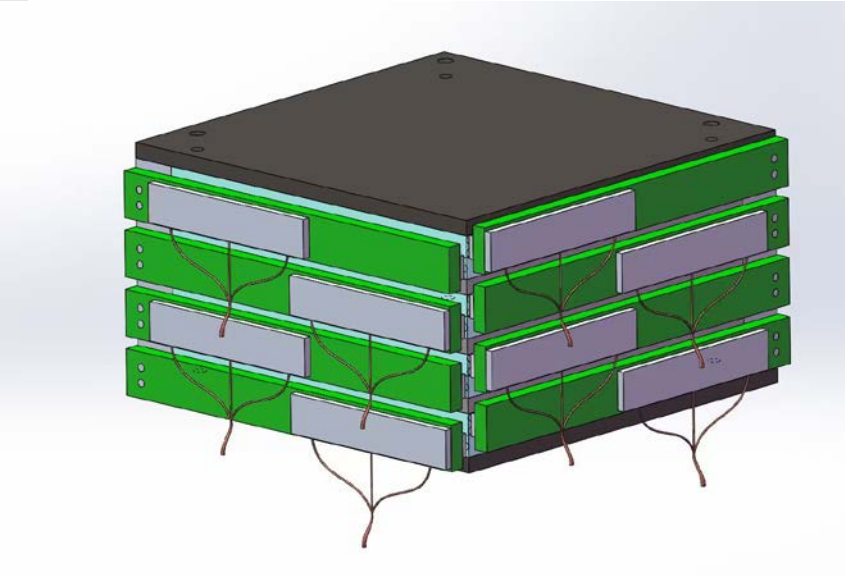
SciFi трекер состоит из 8 взаимно ортогональных плоскостей, состоящих из 2 (2 верхних плоскости) и 3 (6 нижних плоскостей) слоев сцинтилляционных файберов диаметром 1 мм образуя 4 XY плоскости. Каждая плоскость просматривается матрицей из 16 SiPM RQL3035TSV размером 3 мм x 3 мм.

Система антисовпадений состоит из 4 боковых детекторов AC_{side} 7x77x108 мм^3 и 7x97x108 мм^3, а также нижнего детектора AC_{bottom} размером 7x83x83 мм^3.



SciFi трекер

59.62mm×59.62mm×32.4mm



Зеленый: PCB + SiPM матрица

Серый: SiPM интерфейс

SciFi трекер:

8 плоскостей

2-3 слоя файберов диаметром 1mm в каждой плоскости

16 SiPM 3mm×3mm в каждой плоскости

SciFi Front-end Electronics:

128 каналов, 4 ASIC Citiroc1A + FPGA XC7K325T

Размер ~10cm*10cm*2cm

Энергопотребление ~8W

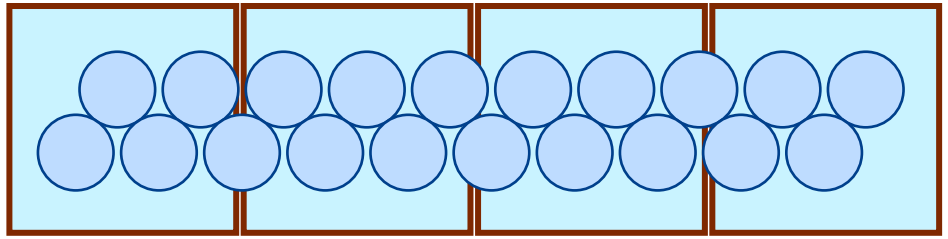
Аньхойский университет, Мааньшань, КНР

Product	Sensitive area	Pixel size	N pixels	Fill factor	Pack size
产品	感光面积	像素间距	像素数量	填充因子	封装面积
RQL3035TSV	3.0 mm×3.0 mm	35 μm	6501	78%	3.03mm×3.03mm×0.65mm

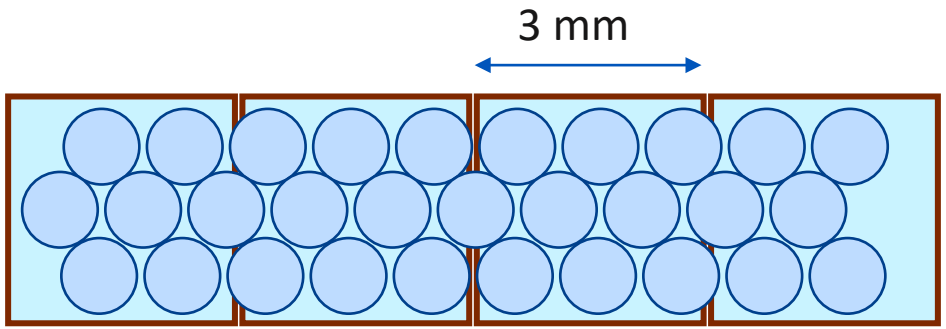
SciFi трекер

файбер диаметром 1mm и 3 mm × 3 mm SiPM

2 слоя



3 слоя



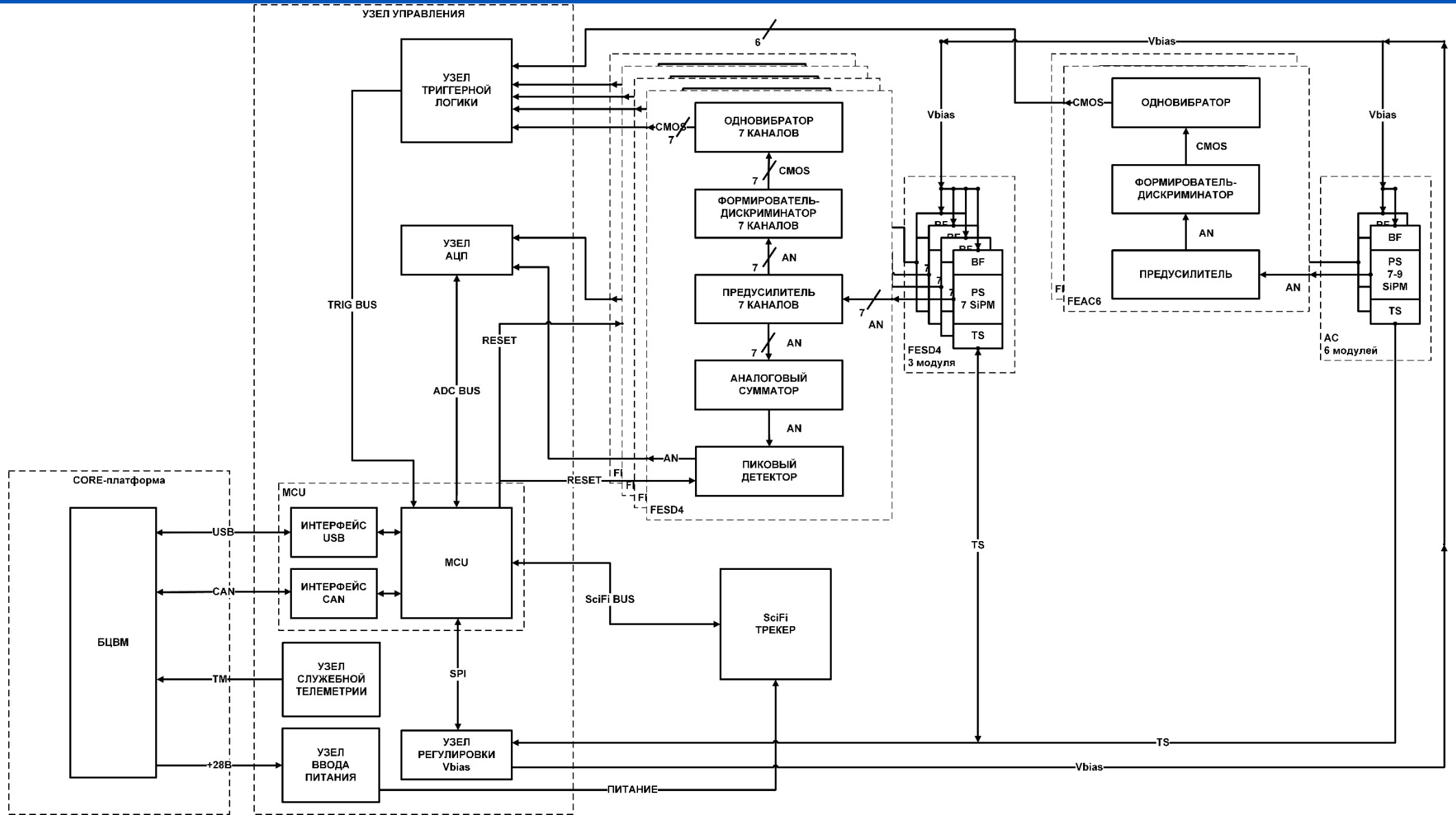
SiPM

оптическая прокладка SL650

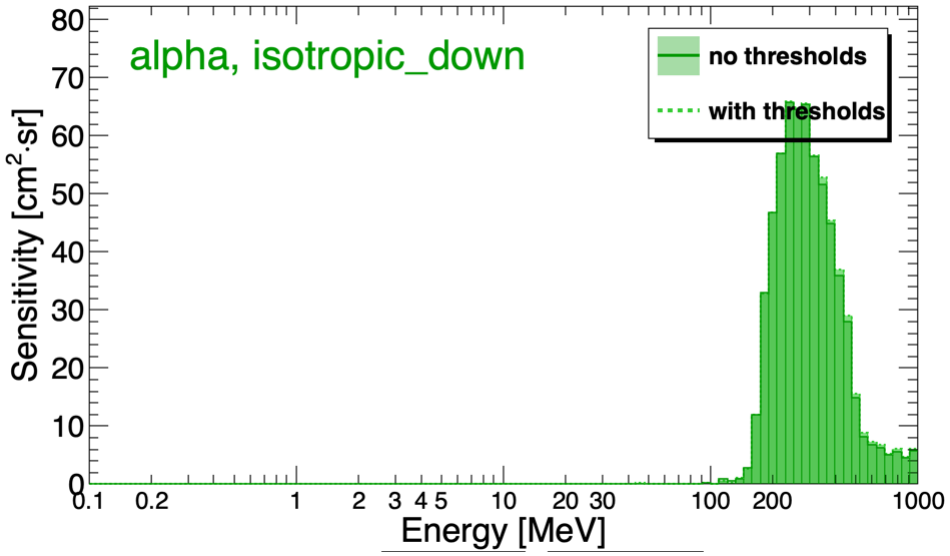
отражатель

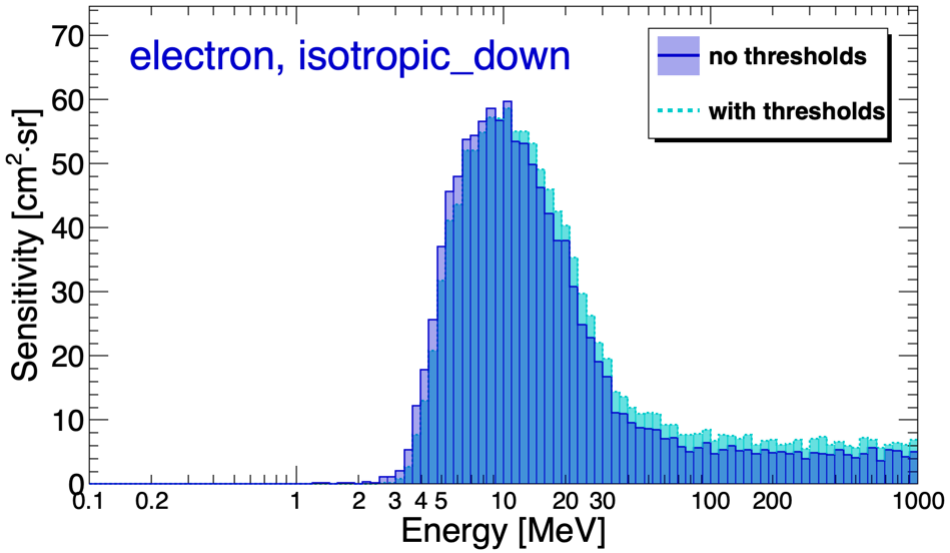
Оптическая прокладка SL650 используется для защиты поверхности SiPM от вибрации

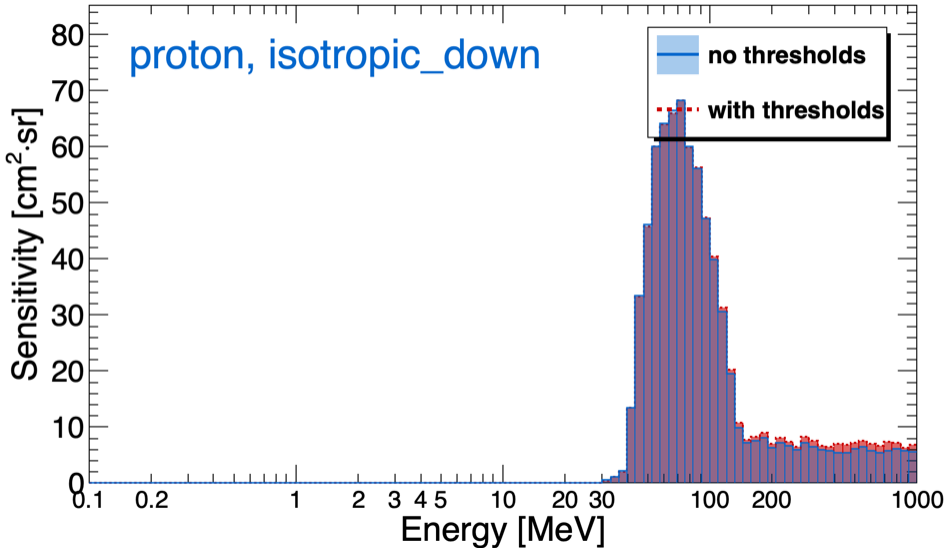
Функциональная схема спектрометра



Эффективность регистрации прибора



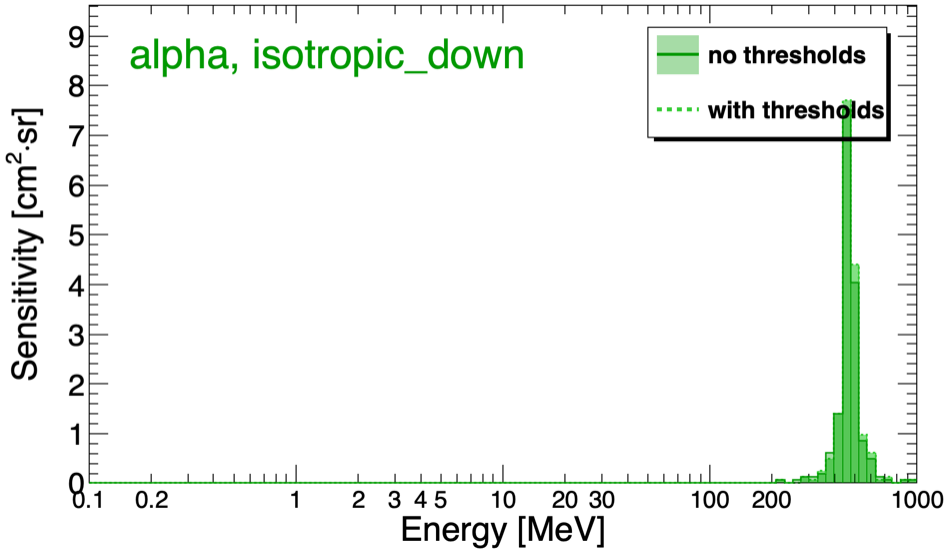


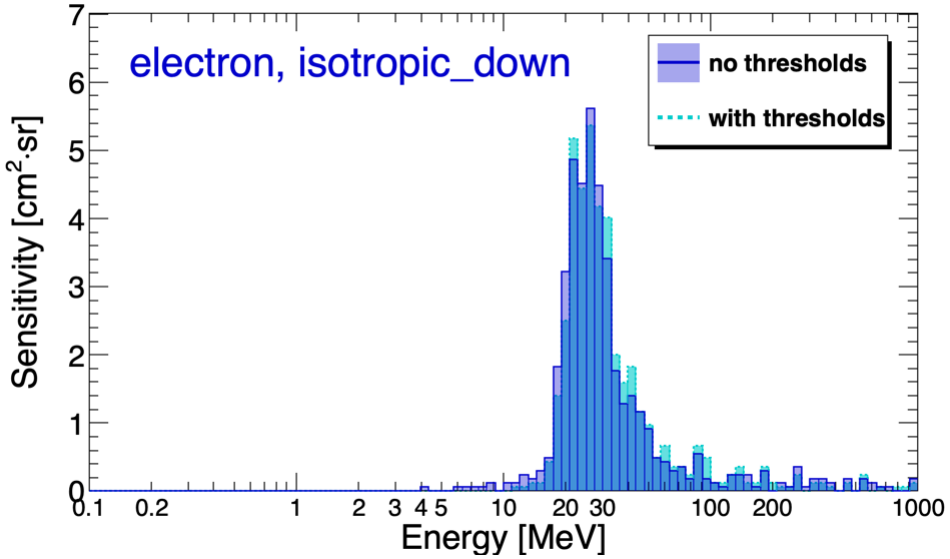


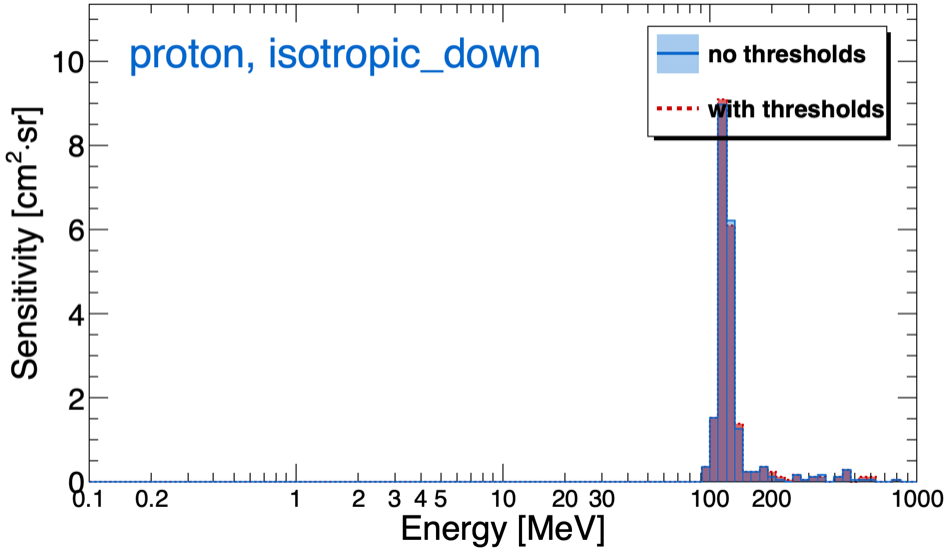
Trigger: $S1 \otimes S2 \otimes \overline{AC_{Side}(E > 0.2\ MIP)} \otimes \overline{AC_{Bottom}(E > 0.2\ MIP)}$

Thresholds: $S1\text{-}S2 > 0.2\ MIP$

Эффективность регистрации прибора







Trigger: $S1 \otimes S2 \otimes S3 \otimes S4 \otimes \overline{AC_{Side}(E > 0.2\ MIP)} \otimes \overline{AC_{Bottom}(E > 0.2\ MIP)}$

Thresholds: S1-S4 > 0.2 MIP

Заключение

1. В **первой половине 2027 года** в рамках отработки основных узлов перспективной космической платформы микро-класса А100 на солнечно-синхронную орбиту будет выведена экспериментальная платформа массой 32 кг.

2. Помимо отрабатываемых служебных систем, на борту будет размещен **разрабатываемый в настоящее время в НИЯУ МИФИ малоразмерный прецизионный спектрометр «НАДЯ»** предназначенный для регистрации и идентификации направленных потоков заряженных частиц в диапазоне энергий от нескольких десятков до нескольких сотен МэВ.

3. В результате отработки узлов спектрометра в ходе летного эксперимента продолжительностью ~1 года, помимо полученной научной информации, будет создан задел для подготовки и осуществления более масштабных экспериментов на борту микро космических аппаратов.

Спасибо за внимание!

Оценка радиационной стойкости

НИЯУ МИФИ

№	ЭРИ	Тип компонента	Производитель	Предельная накопленная поглощенная доза $D_{пр}$, (Si,рад)	Флюэнс нейтронов (1 МэВ экв. Si, см$^{-2}$)
1	Micro FC-60035-SMT	Кремниевый фотоумножитель	SensL (ON Semi)	>$1.5\cdot10^5$ [7-10]	~10^{10} [7-10]
2	STM32F446	Микроконтроллер	ST Microelectronics	~$4.7\cdot10^4$ [24]	-
3	MAX1932	DC-DC преобразователь	Analog Devices	~$3\cdot10^4$ [25]	~10^{11} [25]
4	AD8001	Операционный усилитель	Analog Devices	>10^6 [26, 27]	-
5	AD8561	Компаратор	Analog Devices	>10^5 [27]	-
6	OP27GSZ	Операционный усилитель	Analog Devices	>10^5 [27]	-
7	TL431BIDBZ	Источник опорного напряжения	Texas Instruments	>$5\cdot10^4$ [28]	-
8	SN74LVC1G74	D-триггер	Texas Instruments	>$2.5\cdot10^4$ [29]	-
9	L7805CD2T	Линейный стабилизатор	ST Microelectronics	>$2\cdot10^5$ [30]	>$2.6\cdot10^{12}$ [30]
10	LM1117IDT-ADJ	Линейный стабилизатор	Texas Instruments	>$3.2\cdot10^4$ [31]	>$2\cdot10^{12}$ [31]
11	1N4001	Диод	ON Semiconductor	>10^5	>10^{11}
12	1N4148	Диод	ON Semiconductor	>10^5	>10^{11}
13	BSS123L	Транзистор	ON Semiconductor	~$3\cdot10^4$ [25]	~10^{11} [25]
14	B57330V2103F260	NTC термистор	Epcos	>$2\cdot10^7$ [32], >$8.2\cdot10^5$ [33]	>$3\cdot10^{14}$ [32], >10^{15} [33]

Примечания:

- знак “>” обозначает, что в цитируемой работе для бóльших величин параметра тестирование не проводилось, при данной величине параметра ЭРИ функционировало штатным образом;
- знак “~” обозначает, что в цитируемой работе при данной величине параметра наблюдался отказ или существенное нарушение функционирования ЭРИ;
- знак “-” обозначает, что по данному типу воздействия испытания не проводились;
- красным цветом выделены наименее стойкие ЭРИ.

Оценка радиационной стойкости

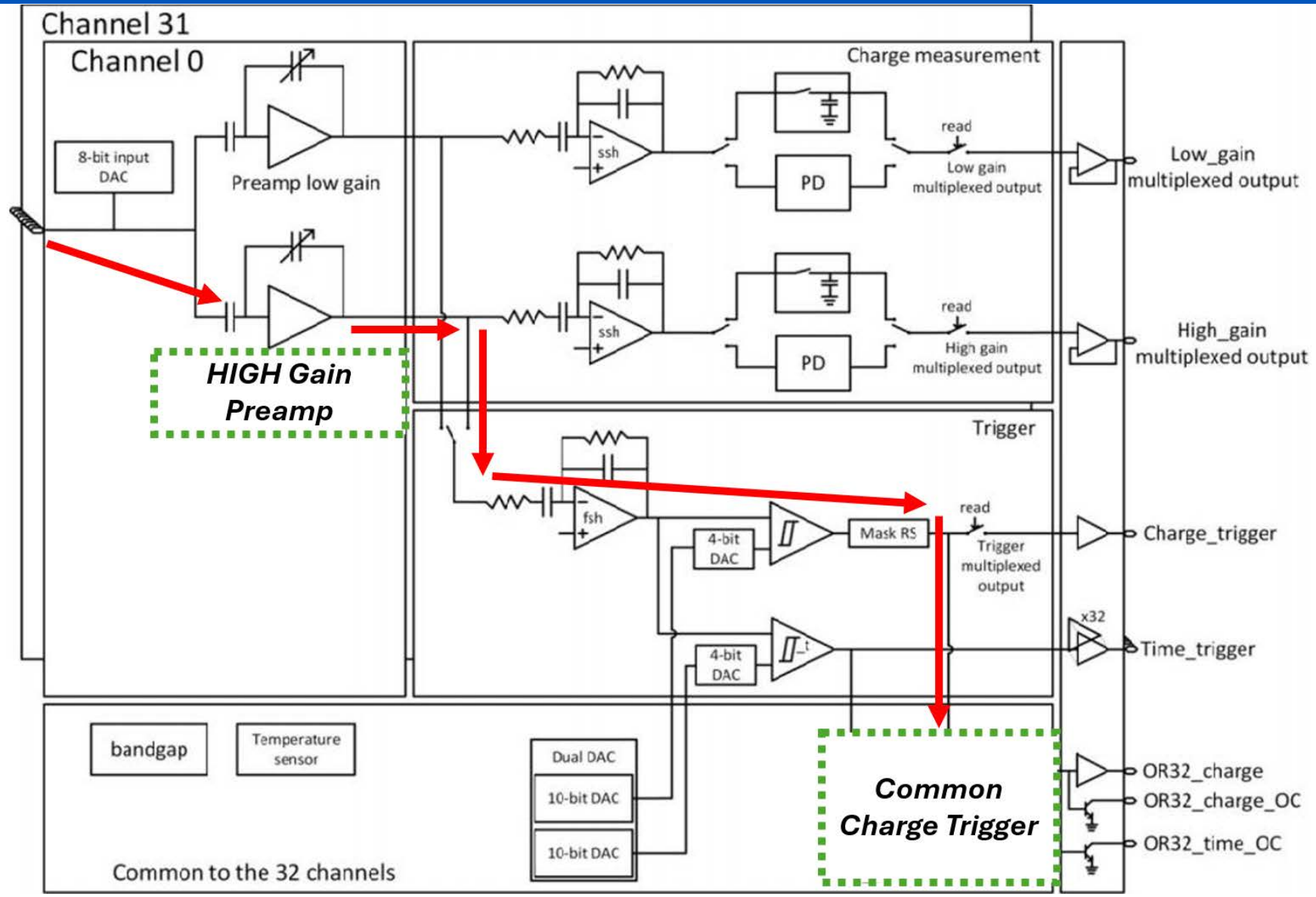
НИЯУ МИФИ

Из приведенных в таблице данных можно сделать следующие выводы:

- по TID наиболее критичен MAX1932 характеризующийся значением предельной накопленной поглощенной дозы (Si) ~$3 \cdot 10^4$ рад. Следовательно, без применения специальных мер пассивной защиты, прибор должен сохранять работоспособность, по крайней мере, до величины накопленной поглощенной дозы (Si) ~30 крад;
- по флюэнсу нейтронов наиболее критичен SiPM Micro FC-60035-SMT характеризующийся значением 10^{10} см$^{-2}$ (1-MeV equivalent fluence). Следовательно прибор должен сохранить работоспособность до величины флюэнса нейтронов (1-MeV equivalent fluence) ~10^{10} см$^{-2}$.

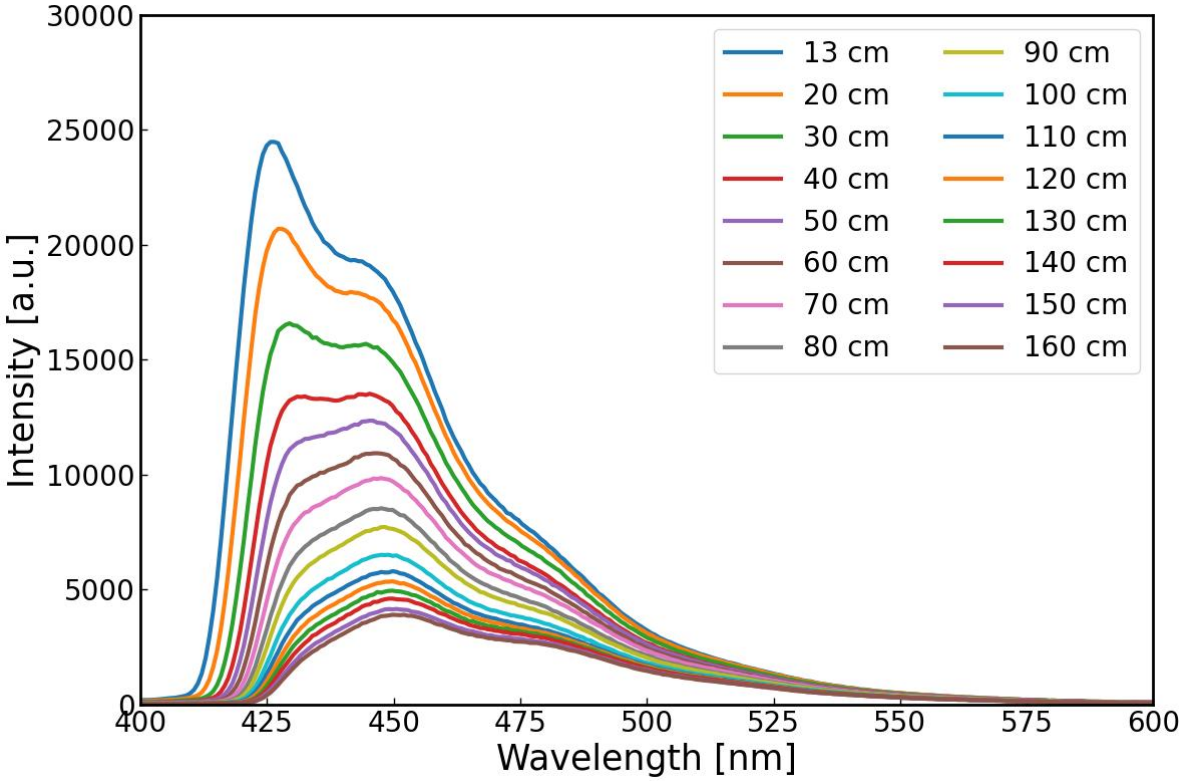
Оценка по “одночастичным” эффектам не проводилась, поскольку для основного подверженного данному виду радиационного воздействия ЭРИ – микроконтроллеру STM32 отсутствуют соответствующие подтвержденные данные.

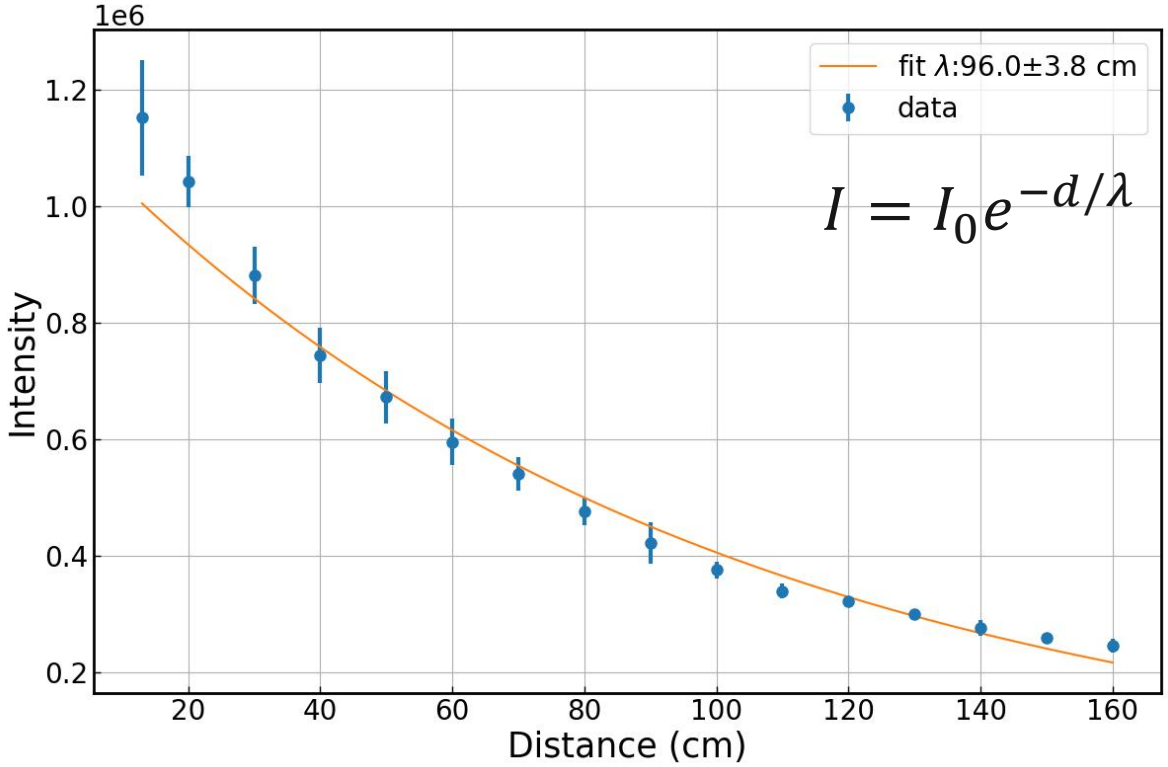
SciFI модуль



SciFi модуль

Test of light attenuation





Product from Anhui University