

**XXV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова:
Концентрированные потоки энергии в космической технике,
электронике, экологии и медицине.
Секция «Физика космических лучей и солнечно-земных связей»**

Матричный детектор излучения (МАДИЗ)

А. Н. Ефимкин^{1,*}, Г. И. Антонюк^{2,3}, Е. Ю. Горбач², В. А. Фокин⁴, И. А. Золотарев³

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет космических исследований
Россия, 119991, Ленинские горы, д. 1, стр. 52*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

³ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

⁴ *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Информатика и системы управления
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1*
(Поступила в редакцию 15.04.2025; подписана в печать 17.04.2025)

Матричный детектор излучения (МАДИЗ) — это образовательный проект по разработке компактного прибора, научной задачей которого является изучение возможности детектирования радиации с помощью фотоматриц. Были разработаны две летные версии приборов, которые отправились на полярную орбиту на спутниках формата кубсат в ноябре 2024 г. В статье описывается прибор первой версии, установленный на МКА «Альтаир». Его детектирующая часть состоит из двух матриц SONY IMX477. На этом приборе отрабатываются алгоритмы поиска треков космических частиц сразу на двух матрицах. В первые два месяца после выведения на орбиту были проведены краткосрочные включения, которые подтвердили исправность прибора после запуска.

PACS: 92.60.Vb, 95.55.-n, 96.50.S- УДК: 523.3-1/-8, 524.1-352.

Ключевые слова: матричный детектор излучения, кубсат, радиация.

ВВЕДЕНИЕ

Матричный детектор излучения (МАДИЗ) представляет собой образовательный проект, направленный на разработку компактного устройства для изучения возможностей детектирования радиации с использованием фотоматриц. Проект был запущен летом 2023 г. в рамках проектной смены «Большие вызовы 2023», проходившей в образовательном центре «Сириус».

В рамках базовой задачи сотрудники НИИЯФ МГУ предложили ученикам образовательного центра написать программы для получения фотографий с технологической камеры малого космического аппарата (МКА) «Монитор-1» и обработки этих изображений. Эти программы должны были позволить детектировать частицы ионизирующего излучения, которые попадают на ее сенсор. На многих кубсатах стоят технологические камеры [1, 2]. Это открывает перспективу использования уже существующих спутников для одновременного измерения уровня радиации в разных точках орбиты. В качестве продвинутой задачи было предложено разработать новый прибор на основе двух матриц на небольшом расстоянии друг от друга. Ключевой особенностью этого устройства является простота его детекти-

рующей части, которая представлена обычной матрицей фотокамеры.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Принцип работы прибора основывается на регистрации следов, оставляемых заряженными частицами при их пролете через сенсор камеры. Когда протон или другая заряженная частица проходит через сенсор, она взаимодействует с его полупроводниковым материалом, вызывая ионизацию, которая проявляется в виде ярко освещенного, «возбужденного» пикселя [3]. Этот процесс создает характерные следы, называемые треками.

Каждый такой трек обычно охватывает от 10 до 100 пикселей. Учитывая, что сенсор состоит из нескольких миллионов пикселей, на одном изображении может оказаться большое количество треков. Для поиска и выделения этих треков проводится анализ полученных изображений при помощи процессора прибора.

Прибор МАДИЗ предусматривает использование двух сенсоров, установленных на расстоянии 2 мм друг от друга. Такой подход должен позволить регистрировать треки частиц, проходящих через оба сенсора. Это дает возможность не только зафиксировать сам факт прохождения частицы, но и определить её траекторию и направление движения. Аналогичный прин-

* s24d_efimkin@179.ru

цип работы используется в детекторах на основе сенсоров Timerix и Medipix, разрабатываемых ЦЕРН [4]. Эти детекторы характеризуются высокими показателями временного и энергетического разрешения, однако их производство сложнее и дороже.

2. ПРИБОР МАДИЗ

Матричный детектор излучения (МАДИЗ) состоит из двух основных частей. Это детекторная часть (А на рис. 1) и вычислительная (В на рис. 1).

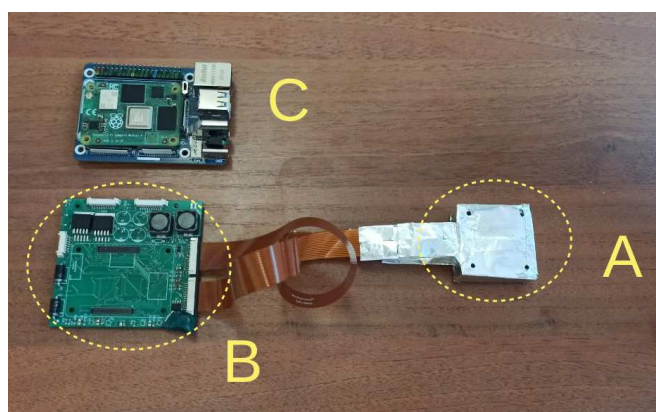


Рис. 1. Прибор МАДИЗ (А — детекторная часть, В — вычислительная часть) и отладочная плата (С)

Детекторная часть состоит из двух сенсоров Sony IMX477 [5] с разрешением 12.3 мегапикселей. Камеры на основе данных сенсоров расположены матрицами друг к другу. Между ними установлена алюминиевая проставка, толщина которой выбрана таким образом, чтобы расстояние между сенсорами составило 2 мм. В проставке сделан вырез, таким образом матрицы разделены лишь двумя слоями защитного стекла общей толщиной 1 мм.

Данная сборка помещена в алюминиевый корпус, состоящий из 2 частей: основания, на котором установлена сборка; крышки с вырезом для шлейфов матриц, которая накрывает всю собранную конструкцию сверху и с боков. Корпус дополнительно обернут фольгой для защиты матриц от проникновения солнечного света. Таким образом, обеспечивается обработка только треков заряженных частиц без влияния внешних источников освещения. Все компоненты фиксируются четырьмя винтами, проходящими через все слои сборки. На рис. 2, а показана детектирующая часть устройства перед покрытием фольгой, закреплённая на раме спутника.

Вычислительная часть прибора состоит из печатной платы и алюминиевой пластины для обеспечения жесткости конструкции и теплового рассеяния (рис. 2, б). На плате распаяны преобразователи питания, микроконтроллер STM32L496 [6], микрокомпьютер Raspberry Pi CM4 [7] и все необходимые для

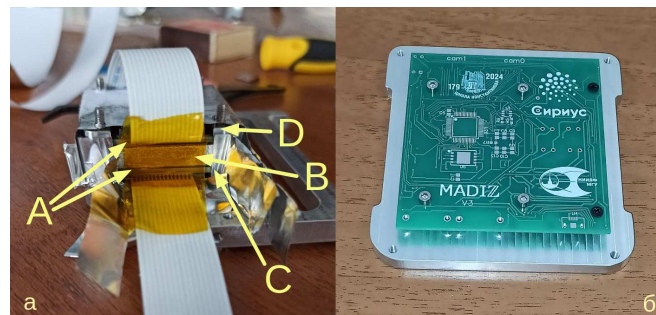


Рис. 2. а — Сборка камер перед закрытием фольгой (А — камеры, В — проставка, С — крышка корпуса, D — основание корпуса); б — вычислительная часть

них пассивные электронные компоненты. Контроллер STM32L496 обеспечивает связь с бортовым контроллером спутника по протоколу CAN и управляет электропитанием Raspberry Pi. Последний является основным вычислительным модулем, выполняет обработку и хранение данных.

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Работа прибора МАДИЗ происходит в несколько стадий: получение кадров, их обработка, выдача результатов. Обработка снимков происходит в несколько этапов.

Первый этап — это фильтрация фона от возможной засветки. Если свет все-таки проникнет через корпус и попадет на матрицы, то в фон изображения может получиться неоднородным. Чтобы гарантировать при дальнейшей обработке отсутствие подобных дефектов, вычисляется среднеквадратичное отклонение яркости каждого пикселя от соседних. Пиксели, яркость которых значительно отклоняется от уровня фона, считаются «полезными» пикселями.

Второй этап — это кластеризация «полезных» пикселей. Пиксели, которые являются соседними и не являются фоном (проверяется в первом этапе) кластеризуются. Первым параметром, который прибор сохраняет в память, является количество кластеров.

Третий этап — подсчет параметров каждого кластера. Ключевыми параметрами являются длина и ширина трека. Большинство обнаруженных на орбите треков имеют эллиптический вид. Через кластер пикселей проводится прямая по методу наименьших квадратов. Длина определяется как расстояние между двумя наиболее удаленными пикселями кластера, лежащими на этой прямой. К отрезку, граничными точками которого являются 2 наиболее удаленных друг от друга пикселя, проводится серединный перпендикуляр. Ширина определяется как расстояние между наиболее удаленными пикселями, принадлежащими этому серединному перпендикуляру. Вычисляется соотношение длины и ширины трека, чтобы определить прямую, вдоль которой

вытянут трек. Пример работы алгоритма представлен на рис. 3 в виде кластера ярких пикселей и белой прямой, проведенной по ним. Левый трек показывает, что частица попала в сенсор под углом, поэтому трек вытянут вдоль прямой и имеет соотношение длины к ширине 2:3. Правый трек демонстрирует практически перпендикулярное попадание частицы в сенсор, что характеризуется равенством длины и ширины трека. Эти параметры сохраняются в память.

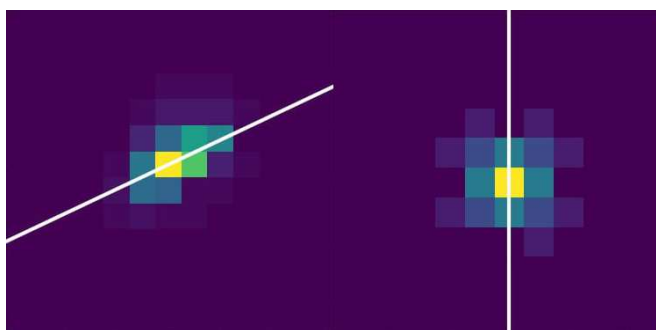


Рис. 3. Примеры треков

В результате формируется второй файл с данными, в котором содержится информация о яркости каждого трека, а также отношение длины к ширине для каждого кластера. Последний параметр дает информацию о том, под каким углом частица прошла через матрицу. Количество обнаруженных частиц служит показателем радиационного фона в конкретной точке орбиты.

Во время сеансов связи собранные данные передаются на Землю для дальнейшего анализа. Определение местоположения спутника в момент измерения производится на основании временных меток и параметров орбиты, которые позволяют симулировать положения спутника на нужный промежуток времени.

4. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

За год школьниками, студентами и сотрудниками НИИЯФ МГУ были разработаны и изготовлены все необходимые для космического полета детали прибора и протестированы алгоритмы детектирования треков на снимках с использованием лабораторных источников радиации. Прибор МАДИЗ был интегрирован в МКА «Альтаир», запуск которого состоялся 5 ноября 2024 г. После выведения на орбиту было проведено

два кратковременных включения.

В первом включении была проверена способность прибора передавать данные с вычислителя на бортовой компьютер спутника. Во втором включении были включены оба сенсора и запущен алгоритм по поиску частиц. Прибор успешно передал результаты работы программы. Во время включения в области Южно-Атлантической аномалии было зарегистрировано 200 частиц в верхнем сенсоре, 81 частица в нижнем сенсоре и 16 совпадений за 20 секунд. Дальнейшая работа предполагает больше включений прибора и анализ данных, полученных с него.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

МАДИЗ является в первую очередь образовательным прибором. За 16 месяцев был полностью разработан, изготовлен и собран детектор. В процессе создания активно участвовали школьники и студенты, что стало важным этапом их профессионального роста и научного образования. Кроме того, прибор позволяет отработать методику регистрации космических лучей с помощью неспециализированных фотокамер, выявить их сильные и слабые стороны. Также алгоритмы обработки данных матричных полупроводниковых детекторов могут быть применены и в других проектах. В дальнейшем планируется отработать алгоритмы поиска треков на кадрах, провести комплексную отработку технологии и получить данные во время возмущенной радиационной обстановки. Пик солнечной активности совпал с моментом запуска прибора, что представляет уникальную возможность для тестирования устройства в условиях повышенных радиационных нагрузок. Было проведено несколько включений, которые подтвердили работоспособность прибора и дали понять, что с его помощью удастся детектировать радиацию на орбите. Включения во время сильных радиационных штормов позволят оценить эффективность алгоритмов детектирования радиационных частиц на кадрах.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ при поддержке Программы развития МГУ, проект № 24-Ш01-05, научно-образовательного проекта Space-π и Фонда содействия инновациям. Авторы выражают признательность Гимназии МГУ, участникам проектной деятельности центра Сириус, студентам факультета космических исследований МГУ, ученикам и преподавателям Школы №179 за их вклад и поддержку в реализации проекта.

[1] Спутниковая платформа компании «Гео-скан» [Электронный ресурс]. <https://spacepi.space/catalog/platforms/sputnikovaya-platforma-geoskan-3-u/> (дата

обращения: 27.03.2025).
[2] Спутниковые платформы компании «Специальный технологический центр» [Электронный ресурс]. <https://spacepi.space/catalog/platforms/st-cz/> (дата

- обращения: 27.03.2025)
- [3] *Liebe C.C.* // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. **48**, N 4. Aug. 1541 (2001).
- [4] *Ballabriga R., Campbell M., Llopart X.* // *Radiation Measurements*. **136**. 106271 (2020).
- [5] Sony Semiconductor Solutions IMX477-AACK product information. [Electronic resource]. https://www.sony-semicon.com/files/62/pdf/p-13_IMX477-AACK_Flyer.pdf (date of treatment: 27.03.2025)
- [6] STMicroelectronics STM32L496AG product information. [Electronic resource]. www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l496ag.html (date of treatment: 27.03.2025)
- [7] Raspberry Pi Ltd Raspberry Pi Compute Module 4 product brief. [Electronic resource]. <https://www.raspberrypi.com/products/compute-module-4/?variant=raspberry-pi-cm4001000> (date of treatment: 27.03.2025)

Matrix detector of ionization (MADIZ)

A. N. Efimkin^{1,a}, G. I. Antonyuk^{2,3}, E. Yu. Gorbach², V. A. Fokin⁴, I. A. Zolotarev³

¹*Faculty of Space Research, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

³*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University
Moscow 119191, Russia*

⁴*Informatics and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia
E-mail: ^as24d_efimkin@179.ru*

The matrix detector of ionization (MADIZ) is an educational project aimed at developing a compact device whose scientific purpose is to study the ability of photomatrices to detect radiation. Two navigable versions of the device were developed and launched into polar orbit aboard the CubeSat satellites in November 2024. This article describes the first version of the device installed on the small satellite Altair. Its sensor part consists of two SONY IMX477 matrices. This device is used to test the space particle tracking algorithms on two matrices simultaneously. Several short-term activations during the first two months after deployment of the device confirmed its functionality after launch.

PACS: 92.60.Vb, 95.55.-n, 96.50.S-

Keywords: matrix radiation detector, CubeSat, radiation.

Received 15 April 2025.

Сведения об авторах

1. Ефимкин Александр Николаевич — студент; e-mail: s24d_efimkin@179.ru.
2. Антонюк Георгий Игоревич — аспирант, мл науч сотрудник; e-mail: antonjuk.gi15@physics.msu.ru.
3. Горбач Егор Юрьевич — студент; e-mail: egor-20050@mail.ru.
4. Фокин Валерий Алексеевич — студент; e-mail: fkn.vlr@mail.ru.
5. Золотарев Иван Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: brillkov@yandex.ru.