

УДК 520.6.07

Космический детектор ТУС

*А.Е. Вольвач⁵, Г.К. Гарипов¹, В.М. Гребенюк^{2,4}, А.А. Гринюк², А.И. Дмитроца⁵,
В.Е. Еремеев¹, П.А. Климов¹, М.В. Лаврова², Д.И. Неяченко⁵,
М.И. Панасюк^{1,3}, А.В. Ткаченко², Л.Г. Ткачев^{2,4}, С.А. Шаракин¹, А.В. Широков¹,
Б.А. Хренов¹, И.В. Яшин¹*

¹ ФГБОУ ВПО “Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова”, НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, Россия, 119991

² Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио Кюри, г. Дубна, 6, Московская обл., Россия, 141980

³ ФГБОУ ВПО “Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова”, физический факультет, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, Россия, 119234

⁴ Государственный университет “Дубна”, ул. Университетская, 19, г. Дубна, Московская обл., Россия, 141982

⁵ ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
volvach@crao.crimea.ru

Поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.

Аннотация. Детектор “Трековая установка” (ТУС) на борту спутника “Ломоносов” 28 апреля 2016 года был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой около 500 км. Главной целью космического эксперимента ТУС является поиск космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ) с > 70 ЕэВ с помощью измерения флуоресцентного и черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере Земли. Кратко представлены конструкция и принципы работы детектора ТУС. Разработанный многоуровневый алгоритм реконструкции и поиска событий, кандидатов ШАЛ в области КЛПВЭ, применен к анализу данных ТУС. Представлены предварительные результаты первого года работы ТУС на орбите, в том числе результаты поиска и изучения найденных кандидатов ШАЛ.

THE TUS SPACE DETECTOR, *by A.E. Volvach et al.* The Tracking Device detector (TUS) aboard the Lomonosov satellite was launched into the solar-synchronous orbit at an altitude of about 500 km on April 28, 2016. The main aim of the TUS space experiment is a search for ultra-high-energy cosmic rays (UHECR) with > 70 EeV by measuring fluorescent and Cherenkov radiation of wide atmospheric showers (WAS) in the earth’s atmosphere. The construction and operating principles of the TUS detector are briefly presented. The elaborated multi-level algorithm for the reconstruction and searching for events, WAS candidates in the UHECR region, was applied to the analysis of TUS data. This paper presents the preliminary results of the first year of operating TUS on the orbit, involving results of searches and study of the detected WAS candidates.

Ключевые слова: ТУС, ШАЛ, КЛПВЭ, космические лучи, космический детектор

1 Введение

Измерение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ) $E \sim 10^{20}$ эВ и поиск источников КЛПВЭ является одной из важнейших задач современной астрофизики высоких энергий. Несмотря на многолетние исследования, основные вопросы КЛПВЭ остаются открытыми, прежде всего из-за недостаточной статистики существующих экспериментальных данных с детекторов Оже (Ааб, 2015) и ТА (Тиняков, 2015), а также их противоречивости. В связи с этим особый интерес представляют проекты новых исследований КЛПВЭ с борта космического аппарата на орбите спутника Земли. Важным преимуществом такого детектора является возможность получения данных со всех направлений небесной сферы одной и той же установкой и методикой, а также возможность одновременного измерения флуоресцентного и черенковского сигнала ШАЛ. Кроме того, атмосферные условия более стабильны для измерений ШАЛ с космической орбиты по сравнению с наземными исследованиями. Эксперимент ТУС является первым детектором для измерения флуоресцентного и черенковского излучения ШАЛ, рождаемых частицами КЛПВЭ, с космической орбиты.

ТУС запущен 28 апреля 2016 г. на солнечно-синхронную орбиту с космодрома “Восточный” на борту спутника “Ломоносов”. Дополнительными научными задачами эксперимента являются изучение транзиентных атмосферных явлений (ТАЯ) в верхней атмосфере Земли, (микро-)метеоров и космического мусора.

2 Состав детектора ТУС

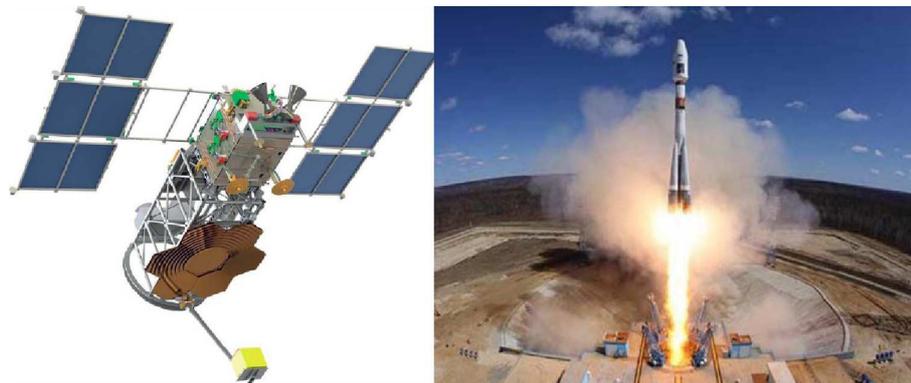


Рис. 1. Слева: схематический вид детектора ТУС на борту спутника “Ломоносов”. Справа: запуск спутника “Ломоносов” с космодрома “Восточный”

ТУС представляет собой телескоп-рефлектор (рис. 1), состоящий из зеркала-концентратора френелевского типа большой площади (2 м^2), предназначенного для сбора и фокусировки сигнала ШАЛ на фотоприемник, расположенный в фокальной плоскости зеркала. Фокусное расстояние 1.5 м. Фотоприемник представляет собой матрицу из 256 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) типа Hamamatsu R1463 с соответствующей электроникой. Использование большого зеркала-концентратора и ФЭУ позволяет достичь высокой чувствительности и временного разрешения (~ 1 мкс), что необходимо для регистрации слабого и быстрого сигнала ШАЛ. Телесный угол обзора ячейки составляет 10^{-4} ср, что соответствует наблюдению площади размером $5 \times 5 \text{ км}^2$ при высоте орбиты 500 км. Суммарное поле зрения оптической системы детектора равно $\pm 4.5^\circ$ ($80 \times 80 \text{ км}^2$ на поверхности Земли). ФЭУ объединены в модули по 16 штук, имеющие общую систему высокого напряжения, систему сбора и первичной обработки данных на основе чипа FPGA фирмы XILINX.

Отбор полезных событий для дальнейшего анализа осуществляет двухуровневая триггерная система. Первый уровень представляет собой пороговый триггер для каждого канала фотоприемника. Этот триггер вырабатывается в случае превышения скользящей суммы за 16 тактов в одном канале детектора заданного порогового уровня. Второй уровень триггера выделяет ряд соседних сработавших каналов $N = 5 - 7$ последовательных кадров (один кадр по времени равен 16 тактам).

3 Измерения в режиме ШАЛ

Регулярный сбор данных происходит с 16 августа 2016 г. с наибольшим приоритетом режиму регистрации ШАЛ. Уже зарегистрировано более 200000 событий. С результатами измерений в других режимах можно ознакомиться в работе (Климов и др, 2017а). При поиске КЛПВЭ-событий было найдено большое количество фоновых событий различного происхождения, которые возникают в атмосфере Земли. Существенную долю событий в режиме ШАЛ составляют медленные вспышки грозовой природы. Другим примером грозового явления является регистрация события типа “эльф” (от английского elve). Большую группу событий (~12 %) представляют интенсивные вспышки, развивающиеся в течение одного такта (т. е. не более, чем за 0.8 мкс) в группе смежных пикселей, упорядоченных в структуру, напоминающую трек. Моделирование показало (Климов и др., 2017б), что источниками таких событий могут быть протоны с энергиями в диапазоне примерно от 100–200 МэВ до 10 ГэВ, проходящие через стеклянные УФ-фильтры.

Офлайн-анализ данных в эксперименте ТУС естественным образом разбивается на два этапа: этап нахождения группы пикселей (ФЭУ) из данных детектора с сигналом от ШАЛ и этап анализа временных зависимостей сигналов в активных пикселях, результатом которого является определение зенитного и азимутального углов прихода КЛПВЭ-события и его энергии.

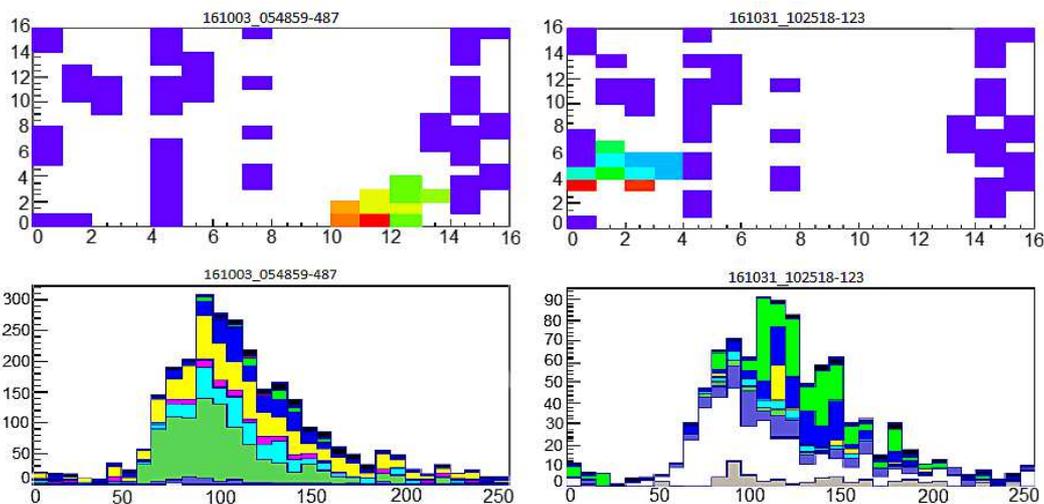


Рис. 2. ШАЛ-кандидаты. Вверху: Изображение событий с активными пикселями. Внизу: стековые гистограммы сработавших пикселей в зависимости от времени после вычитания фона и нормирования на усиление ФЭУ

Несколько десятков ШАЛ-кандидатов были найдены. Анализ данных ТУС показывает, что большая часть отобранных событий не является ШАЛ, так как зенитные углы кандидатов были расположены вблизи нуля градусов, что указывает на неподвижность источника света. При этом продолжительности сигналов ~150 мкс намного выше, чем это необходимо для вертикальных ШАЛ.

На рис. 2 представлены результаты исследования наиболее убедительных ШАЛ-кандидатов. На верхнем рисунке показаны матрицы фотодетектора – синим цветом отмечены неработающие ФЭУ,

ШАЛ-кандидату отвечают пиксели разного цвета в соответствии со временем прохождения максимального сигнала. Видно, что в обоих случаях ШАЛ распространяется справа налево, сверху вниз и уходит за пределы поля зрения. Длина проекции ШАЛ на земле составляет 15–20 км, а продолжительность 120–140 мкс, как это видно из нижних рисунков, где приведены стековые гистограммы сработавших пикселей. Зенитный и азимутальный углы для кандидатов ШАЛ на рис. 2 равны: левое событие $\theta \sim 33^\circ$, $\varphi \sim 225^\circ$, правое событие $\theta \sim 22^\circ$, $\varphi \sim 253^\circ$.

4 Заключение

Детектор ТУС успешно работает на спутнике “Ломоносов” с 28 апреля 2016 г. С августа начат регулярный набор данных, уже получено более 200000 событий. В процессе поиска КЛПВЭ было найдено большое количество фоновых событий различного происхождения, которые возникают в атмосфере Земли. Разработан многоуровневый алгоритм поиска ШАЛ-подобных событий, который был применен к анализу данных ТУС. Было отобрано и проанализировано несколько кандидатов ШАЛ с энергиями ~ 100 ЕэВ. Проводится поиск новых событий – кандидатов ШАЛ.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Госкорпорации РОСКОСМОС, программы МГУ “Перспективные направления развития”, а также грантов РФФИ 16-29-13065-офи-м, 15-35-21038 и 15-02-05498.

Литература

- Ааб и др. (Aab A., Abreu P., Aglietta M., Ahn E.J., Samarai I.AI., et al.) // *Astrophys. J.* 2015. V. 804. P. 15.
- Климов (Klimov P. et al.) // *Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration – 2016. Proc. of International Symposium / Ed. Chilingarian. A. Armenia. Nor Amberd. 2017a. P. 122.*
- Климов П.А., Зотов М.Ю., Чирская Н.П., Хренов Б.А., Гарипов Г.К. и др. // *Известия РАН. Серия Физическая.* 2017б. Т. 81(4). С. 442.
- Тиняков и др. (Tinyakov P. et al.) // *Proc. of the 34th International Cosmic Ray Conference. The Hague. 2015. id. 326.*