

УДК 537.591.15

ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ КАНДИДАТОВ ШАЛ В КОСМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ “ТУС”#

© 2019 г. А. А. Гринюк¹, М. В. Лаврова^{1, *}, Л. Г. Ткачев^{1, 2}, А. В. Ткаченко¹

¹Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

²Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области
“Университет “Дубна”, Дубна, Россия

*E-mail: lavrova@jinr.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Детектор ТУС на борту спутника “Ломоносов” 28 апреля 2016 г. был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой около 500 км. Главной целью космического эксперимента ТУС является поиск космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ) с $E > 70$ ЭэВ 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 работы ТУС на орбите, в том числе результаты поиска и изучения найденных кандидатов ШАЛ.

DOI: 10.1134/S0367676519080167

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 [1] и TA [2], 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, а также возможность одновременного измерения флуоресцентного и черенковского сигналов ШАЛ.

Существенной трудностью космического детектора по сравнению с наземными детекторами КЛПВЭ является уменьшение в 100 раз сигнала ШАЛ в оптике, а также присутствие разнообразных фоновых событий, отбираемых триггерной

системой. Был разработан комплекс программ для моделирования работы детектора ТУС – TUSSIM [3], который также играет важную роль при анализе реальных событий – кандидатов ШАЛ, так как эффективность программы реконструкции ШАЛ проверяется с помощью сравнения событий на уровне генерации программой ESAF [4] и после их моделирования программой TUSSIM и реконструкции по программам TUS-ReadData и TUSFitData [5].

Эксперимент ТУС является первым экспериментом для измерения флуоресцентного и черенковского излучения ШАЛ, рождаемого частицами КЛПВЭ, с космической орбиты. Флуоресцентное излучение ШАЛ распространяется изотропно, в том числе в сторону космического детектора. Черенковское излучение направлено вдоль оси ШАЛ, но часть его отражается от поверхности (снега, воды или облачного покрова) и рассеивается во все стороны, в том числе в сторону спутника, где и регистрируется находящимся на орбите детектором. Величина сигнала зависит от отражающих свойств поверхности. Будучи первым детектором для исследования КЛПВЭ с орбиты спутника Земли, ТУС является первопродцом для последующих более совершенных детекторов KLYPVE [6] и JEM-EUSO [7]. Из проведенного Монте-Карло моделирования [8] следует, что измерение энергии и угловых парамет-

Статья представлена от имени коллаборации Lomonosov-UNECR/TLE.



Рис. 1. Схематический вид детектора ТУС на борту спутника "Ломоносов".

ров ШАЛ детектором ТУС возможно в области ГЗК обрезания спектра КЛПВЭ для $E > 70$ ЕэВ. Дополнительными научными задачами эксперимента являются изучение транзиентных атмосферных явлений (ТАЯ) в верхней атмосфере Земли, сигналов от (микро-)метеоров и космического мусора.

Несколько научных центров: НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, "Космическая Регата" (г. Королев) и ряд институтов из Кореи и Мексики участвовали в создании детектора ТУС (рис. 1), запущенного 28 апреля 2016 г. на солнечно-синхронную орбиту

высотой ~ 500 км и наклоном орбиты $\sim 97^\circ$, с космодрома "Восточный" на борту спутника "Ломоносов".

ПРОЦЕДУРА ПОИСКА КАНДИДАТОВ ШАЛ

Регулярный сбор данных начат с 16 августа 2016 г. с наибольшим приоритетом режиму регистрации ШАЛ. Уже зарегистрировано более 200000 событий. С примерами измерений в других режимах можно ознакомиться в работе [9]. В процессе поиска КЛПВЭ было найдено большое количество фоновых событий различного происхождения, которые возникают в атмосфере Земли.

Анализ данных в эксперименте ТУС естественным образом разбивается на два этапа: этап поиска ФЭУ с сигналом от ШАЛ и этап анализа временных зависимостей амплитуд в активных пикселях в каналах, имеющих сигнал, относящийся к событию. Результатом анализа является определение зенитного и азимутального углов прихода КЛПВЭ события и его энергии.

С помощью программы визуализации отсеиваются очевидные фоновые события. Оставшиеся события анализируются программой реконструкции в полуавтоматическом режиме. Прежде всего, создается покадровая развертка события как показано на рис. 2.

Каждый кадр есть изображение сработавших пикселей, в которых сигнал превысил порог обнаружения, на матрице ФЭУ за 16 временных тактов. Временная эволюция сигнала в каждом пикселе анализируется в течении 256 временных тактов. Временная зависимость амплитуды сиг-

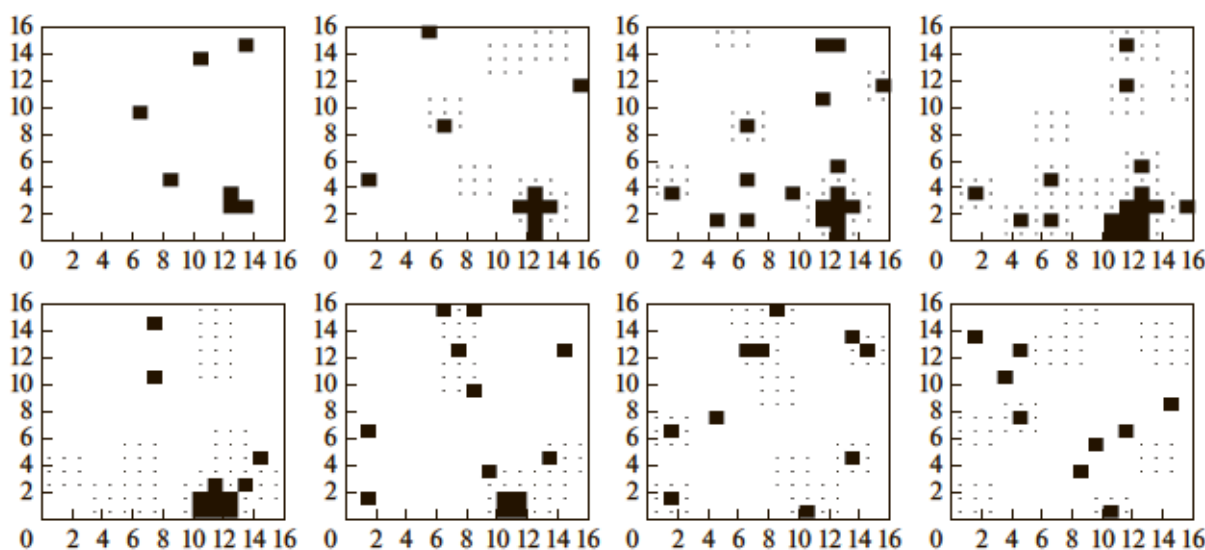


Рис. 2. Изображение сработавших пикселей на покадровой развертке с шагом 16×0.8 мкс. Точками показаны ожидаемые места срабатывания пикселей для получения триггера второго уровня.

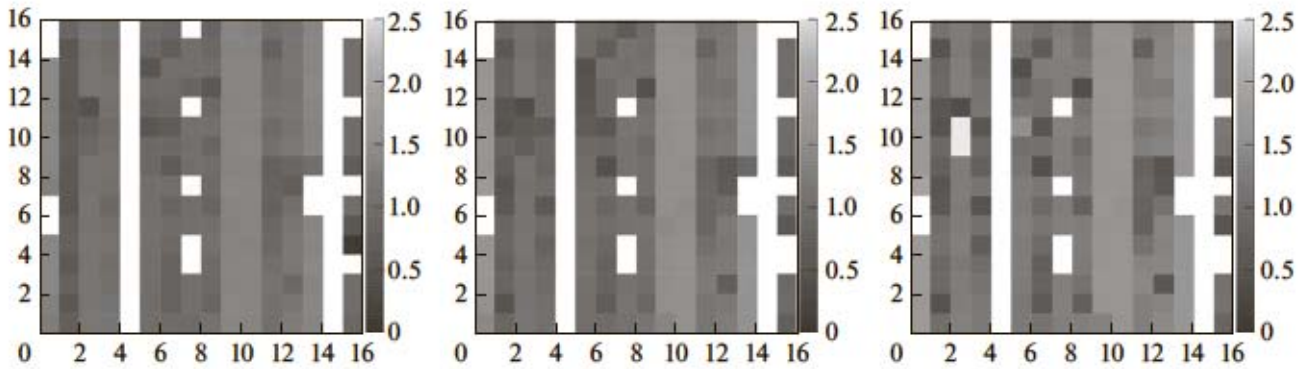


Рис. 3. Относительная калибровка ФЭУ за 3 полугодия работы эксперимента.

нала $A(t)$ фитируется суммой: константа p_0 плюс функция Гаусса

$$A(t) = p_0 + p_1 \exp[-0.5(t - p_2)/p_3]^2].$$

После фитирования, из-за неизвестной калибровки ФЭУ, амплитуды сигнала $A(t)$ нормируются на величину p_0

$$A(t) \rightarrow (A(t) - p_0)/p_0$$

и в последующем анализируются нормированные безразмерные амплитуды в разных пикселях. В каждый момент времени рассчитывается скользящая сумма амплитуды сигнала, представляющая собой среднее значение амплитуды за предшествующие 16 тактов. Для поиска кандидатов ШАЛ отбираются сработавшие пиксели, в которых значение скользящей суммы превышает пороговое значение T_1 триггера первого уровня, которое является свободным параметром программы реконструкции TUSReadData. На следующем шаге анализа, с помощью программы реконструкции создается некоторое количество «треков», в которые объединяются сработавшие пиксели в соседних кадрах. После визуальной проверки анализируются пиксели с отобранным треком.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ КАЛИБРОВКА ФЭУ

Направление движения ШАЛ определяется по движению его изображения на матрице фотодетекторов. Неопределенности в коэффициентах усиления ФЭУ приводят к искажению этого изображения и неправильной оценке направления прихода первичной частицы. В то время, как для определения энергии первичной частицы, требуется абсолютная калибровка ФЭУ, для определения направления прихода достаточно относительной.

Относительная калибровка ФЭУ была произведена с использованием выборки переданных на Землю данных. В подавляющем большинстве полученных событий ФЭУ измеряют только фон. С помощью моделированных событий были выбра-

ны статистические критерии отбора фоновых сигналов в ФЭУ, которые были затем применены в выборке фоновых сигналов в данных. В каждом событии и для каждого ФЭУ были отобраны только фоновые сигналы с помощью указанных статистических критериев случайных флуктуаций фона. Отношение фонового сигнала в ФЭУ к среднему фоновому сигналу по всем ФЭУ этого события затем усреднено по всем событиям. Полученная таким образом относительная калибровка каждого ФЭУ слабо зависит как от пространственной неоднородности фона, вызванной облаками, так и от систематического изменения фона со временем от события к событию. Стабильность относительной калибровки была проверена на 3-х статистически независимых наборах данных соответствующих 3 полугодиям работы детектора TUS (рис. 3). Относительная калибровка использовалась при определении углов прихода ШАЛ. В настоящее время ведется работа по выполнению абсолютной калибровки ФЭУ с использованием данных, полученных в полете.

ПРОЦЕДУРА АНАЛИЗА ОТОБРАННЫХ КАНДИДАТОВ ШАЛ

С использованием относительной нормировки ФЭУ, на гистограммах рис. 4 в безразмерных величинах $(A(t) - p_0)/p_0$ представлены результаты анализа наиболее убедительных ШАЛ-кандидатов, найденных с помощью описанного выше алгоритма. Стрелками указано прямолинейное движение сигнала по матрице фотодетектора. На верхней части рисунка показаны матрицы фотодетектора: ФЭУ с сигналами от ШАЛ-кандидатов помечены черным цветом, неработающие ФЭУ помечены серым цветом. Распространение сигнала ШАЛ определяется из анализа гистограмм амплитуд сработавших пикселей в зависимости от времени и показано стрелкой: в обоих случаях ШАЛ уходит за пределы поля зрения. В заголовке рисунка указано время (UTC) регистрации событий. Длина проекции ШАЛ на поверхность Зем-

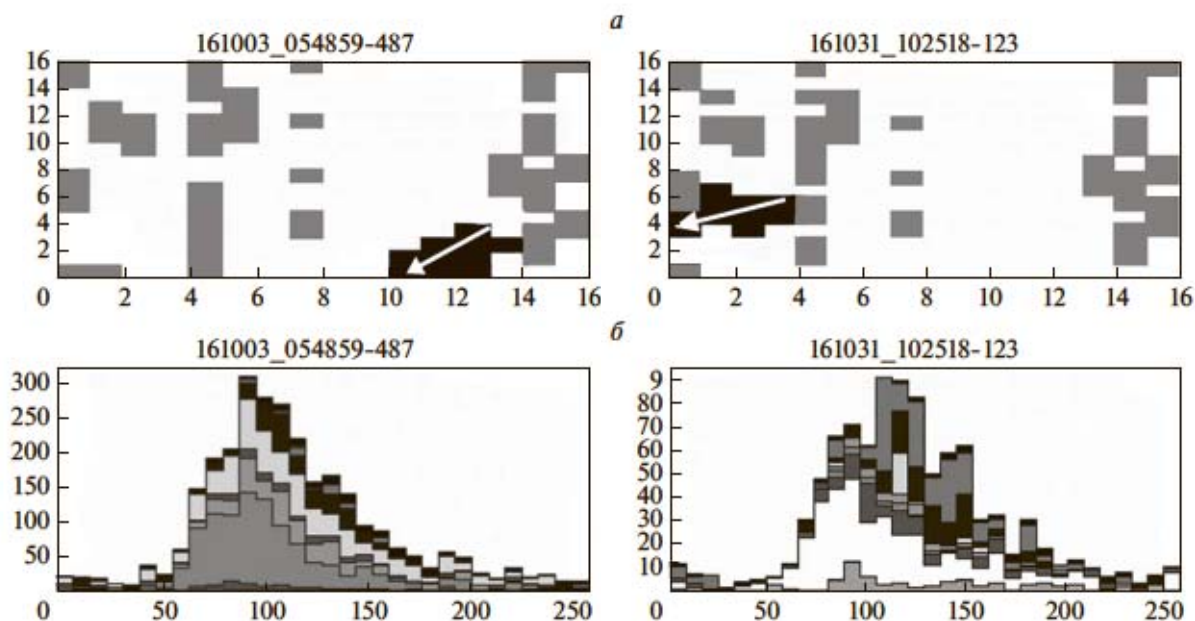


Рис. 4. ШАЛ-кандидаты. (а) Изображение матрицы фотодетектора с активными пикселями. ШАЛ-кандидату отвечают пиксели черного цвета, серым цветом обозначены неработающие ФЭУ. Стрелки указывают направление развития ШАЛ. (б) Гистограммы амплитуд сработавших пикселей в зависимости от времени после вычитания фона.

ли составляет 15–20 км. Продолжительность событий – 120–140 мкс, что видно из нижних рисунков, где приведены стэковые гистограммы амплитуд сработавших пикселей.

Следующим этапом анализа является восстановление направления прихода ШАЛ и его энергии. С этой целью определим локальную систему координат (x, y, t^*c) детектора ТУС: направление возрастания номеров модулей определяет ось x , направление возрастания номеров ФЭУ в модуле определяет ось y . Проводится фитирование амплитуд $A(x, y, t^*c)$ активных пикселей, нормированных в соответствии с относительной калибровкой ФЭУ, прямолинейным треком в локальной системе координат. Получена предварительная оценка направлений прихода первичных КЛ частиц для значений зенитного и азимутального углов: левое событие $\theta = \sim 33^\circ \pm 8^\circ$, $\phi = \sim 225^\circ \pm 8^\circ$, правое событие $\theta = \sim 22^\circ \pm 8^\circ$, $\phi = \sim 253^\circ \pm 8^\circ$. Ошибка получена по разности углов прихода генерированных программой ESAF и их реконструированных значений после программ TUSSIM, TUSReadData и TUSFitData.

Измерение энергии ШАЛ представляет собой более трудную задачу и в настоящее время можно привести только ее теоретическую оценку $E > 70$ ЕэВ, что является нижней границей чувствительности детектора ТУС по результатам моделирования [3]. Основная проблема оценки энергии заключается в отсутствии полетной калибровки ФЭУ, изменившей свои параметры на первых витках полета спутника.

Всего найдено несколько десятков ШАЛ-кандидатов. Их анализ показывает, что большая часть отобранных событий не является ШАЛ. Это следует из того, что одновременная аппроксимация активных пикселей прямолинейным треком в локальной системе координат ТУС дает зенитные углы вблизи нуля градусов. Это означает отсутствие горизонтального перемещения источника света. В то же время, это не вертикальные ШАЛ, так как длительности сигналов ~ 150 мкс, что намного больше, чем время развития вертикальных ШАЛ, которое не превышает 100 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детектор ТУС работает на спутнике “Ломоносов” с 28 апреля 2016 г. За время его работы получено более 200 000 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 найдено и проанализировано два наиболее убедительных кандидата ШАЛ с энергией $E > 70$ ЕэВ. Продолжается поиск новых событий – кандидатов ШАЛ.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации РОСКОСМОС, а также гранта РФФИ № 15-02-05498.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al.* // *Astrophys. J.* 2015. V. 804. P. 15.
2. *Tinyakov P., Fukushima M., Ikeda D. et al.* // *Proc. 34th ICRC.* (Hague, 2015). P. 326.
3. *Grinyuk A., Grebenyuk V., Khrenov B. et al.* // *Astropart. Phys.* 2017. V. 90. P. 93.
4. *Berat C., Bottai S., De Marco D. et al.* // *Astropart. Phys.* 2010. V. 33. P. 221.
5. *Гарипов Г.К., Зотов М.Ю., Климов П.А. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 3. С. 358; *Garipov G.K., Zotov M.Y., Klimov P.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. V. 79. № 3. P. 326.
6. *Tkachev L.* // *Proc. 35th ICRC.* (Busan, 2017). P. 527.
7. *The JEM-EUSO Collaboration* // *Exp. Astron.* 2015. V. 40. № 1. P. 19.
8. *Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A. et al.* // *Space Sci. Rev.* 2017. V. 212. № 3–4. P. 1687.
9. *Klimov P., Khrenov B., Sharakin S. et al.* // *Proc. Int. Symp. Thunderstorms and Elem. Part. Accel.* (Nor Amberd, 2016). P. 122.