

УДК 537.591.15

ТРАНЗИЕНТНЫЙ УФ ФОН ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ШАЛ ОРБИТАЛЬНЫМ ДЕТЕКТОРОМ “ТУС”#

© 2019 г. М. А. Казначеева¹, П. А. Климов¹, *, Б. А. Хренов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*E-mail: pavel.klimov@gmail.com

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Детектор “ТУС” является первым орбитальным телескопом, предназначенным для проверки техники измерения ультрафиолетового флуоресцентного и черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ). Детектор запущен на борту спутника “Ломоносов” 28.04.2016. В цифровой электронике фотоприемника была разработана и реализована двухуровневая система отбора событий (триггер). Этот триггер оптимизирован для поиска ШАЛ, но при этом детектор работает в условиях переменного атмосферного свечения как естественного (свет авроры, рассеянный лунный свет, грозовые явления), так и антропогенного происхождения (городской свет, вспышки в аэропортах). Частота триггера зависит также от частоты атмосферных транзиентных (быстрых) явлений различного происхождения. В статье приведены примеры событий, зарегистрированных детектором “ТУС” и отобранных триггером ШАЛ.

DOI: 10.1134/S0367676519080179

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач исследования вспышек ультрафиолета (УФ) в ночной атмосфере, поставленных перед телескопом “ТУС”, является изучение вспышек, вызываемых частицами космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ, $E > 5 \cdot 10^{19}$ ЭэВ) [1], в условиях орбитального полета телескопа.

Первая частица столь высокой энергии была зарегистрирована в работе [2]. Вместе с тем было показано [3, 4], что энергетический спектр космических частиц может испытывать обрыв в связи с поглощением таких частиц в межгалактическом пространстве на фотонах Большого Взрыва, заполняющих Вселенную – обрыв Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК). Прошло более 50 лет после публикации работ [2–4], но ситуация с установлением обрыва спектра и пониманием экспериментальных данных о КЛПВЭ остается неопределенной, в основном, из-за исключительно низкой интенсивности частиц с энергией в районе обрыва спектра. Самые крупные наземные установки: обсерватория Пьер Оже и Telescope Array за последние десять лет зарегистрировали только 17 событий с энергией выше 100 ЭэВ [5, 6], что не позволяет сделать окончательные выводы о природе событий и их энергетическом спектре.

Линсли и Бенсон предложили [7, 8] развитие исследования КЛПВЭ путем наблюдения флуоресценции атмосферы, возбуждаемой частицами широкого атмосферного ливня (ШАЛ), генерированного частицей КЛПВЭ, с помощью телескопа на орбите спутника Земли. Такой телескоп, в принципе, может иметь площадь обзора атмосферы на два порядка выше площади, получаемой на наземных установках и проводить измерения направления прихода частиц по всей небесной сфере. Телескоп “ТУС”, предложенный в качестве “первопроходца” в [9], является первым подобным детектором, который позволяет проверить условия его работы на орбите, в особенности роль шумов, связанных с транзиентными вспышками УФ в ночной атмосфере.

Телескоп “ТУС” входит в состав научной аппаратуры спутника “Ломоносов”, запущенного с космодрома “Восточный” на орбиту с наклоном 97.3° и с высотой 470–500 км.

ДЕТЕКТОР “ТУС”

“ТУС” состоит из двух основных частей: составного зеркала-концентратора френелевского типа и фотодетектора в его фокальной плоскости на расстоянии 1.5 м от зеркала. Последний состоит из 256 ячеек с квадратным входным окном со стороной 15 мм, перекрывающих поле зрения телескопа $9^\circ \times 9^\circ$. В качестве сенсора УФ в ячейке

Статья представлена от имени коллаборации Lomonosov-UNECR/TLE.

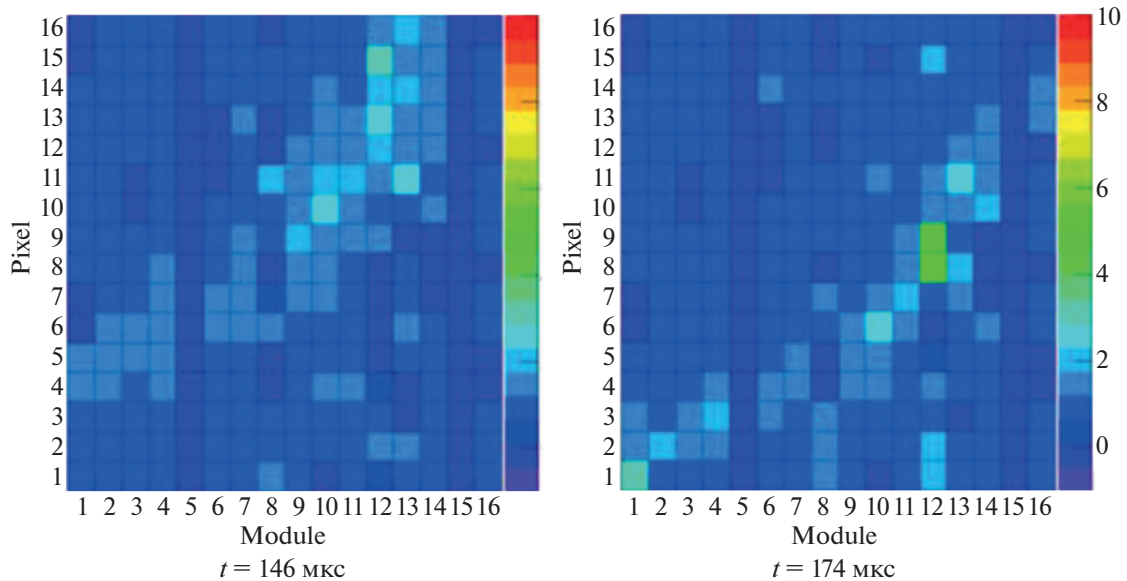


Рис. 1. Карта сработавших ячеек в событии Эльв. Моменты времени слева-направо 146 и 174 мкс.

фотодетектора используется фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R1463 с диаметром фотокатода 13 мм, на который собирается свет от входного отверстия ячейки с помощью зеркального световода. На входе фотокатода ФЭУ стоит фильтр УФС-1. Эффективность сбора УФ в фокальной плоскости детектора была проверена в контрольных измерениях [10]. Радиус пятна фокусирования, которое следует из измерений “функции рассеяния точки” (ФРТ) увеличивается с углом η относительно оптической оси телескопа, и составляет порядка одной ячейки фотоприемника при $\eta = 0^\circ$ и двух при $\eta = 4.5^\circ$ (край детектора). Площадь зеркала-концентратора составляет 2 м^2 . В ячейках фотоприемника каждые 0.8 мкс измеряется заряд на выходе диодной системы ФЭУ с выходным $RC = 0.6 \text{ мкс}$ с помощью 10-канального АЦП. В измерении одного события используется 256 шагов по 0.8 мкс. Такое высокое разрешение применяется для измерения быстрых событий ШАЛ от космических лучей, длительность которых не превышает 200 мкс. Для отбора и измерения более медленных событий (молнии, транзиентные атмосферные явления, метеороиды) используются более длинные шаги измерения, соответствующие длительности изучаемого явления: 24.6 мкс, 0.4 мс и 6.6 мс, с тем же числом шагов 256. Детальное описание детектора можно найти в работе [11].

ТРАНЗИЕНТНЫЕ СОБЫТИЯ ТИПА “ЭЛЬВ”

Наиболее распространенным видом транзиентных атмосферных явлений является эльв. Он представляет собой излучение атмосферы на высоте 80–90 км, расширяющееся в виде кольца.

Эльвы были обнаружены и изучены с помощью видеокамер с временным разрешением менее 1 мс. В настоящее время известно, что разряд типа эльв возникает при пересечении ионосферного слоя Д электромагнитным импульсом (ЭМИ) молнии [12]. Поскольку длительность этих явлений мала и скорость перемещения сигнала по фотоприемнику аналогична скорости ШАЛ, то триггер ШАЛ детектора “ТУС” эффективно срабатывает на события такого рода. На рис. 1 представлено “обычное” событие эльв, зарегистрированное телескопом “ТУС”. Карта сработавших ячеек демонстрирует развитие эльва во времени от радиуса кольца около 25 км в момент срабатывания триггера и до кольца с радиусом более 70 км — в конце разверток осциллографов сработавших ячеек. Молния, ответственная за этот эльв, зарегистрирована сетью детекторов молний Vaisala [13] в том месте, где расположен центр кольца эльва.

Интересно, что детектор “ТУС” впервые наблюдал с орбиты Земли аналогичные события, но с более сложной пространственно-временной структурой: в течение длительности развертки осциллограмм 200 мкс наблюдаются два кольца и больше, следующих одно за другим с разрывом во времени около 50–60 мкс, с общим центром. Такие двойные кольца можно ожидать в случае возникновения второго, отраженного ЭМИ молнии от слоя ионосферы к земле и обратно [14]. В нашем случае на это указывает значение промежутка времени между кольцами, соответствующее разнице времени распространения первичного и вторичного ЭМИ со скоростью света. Пример осциллограммы и карты каналов двойного эльва приведены на рис. 2.

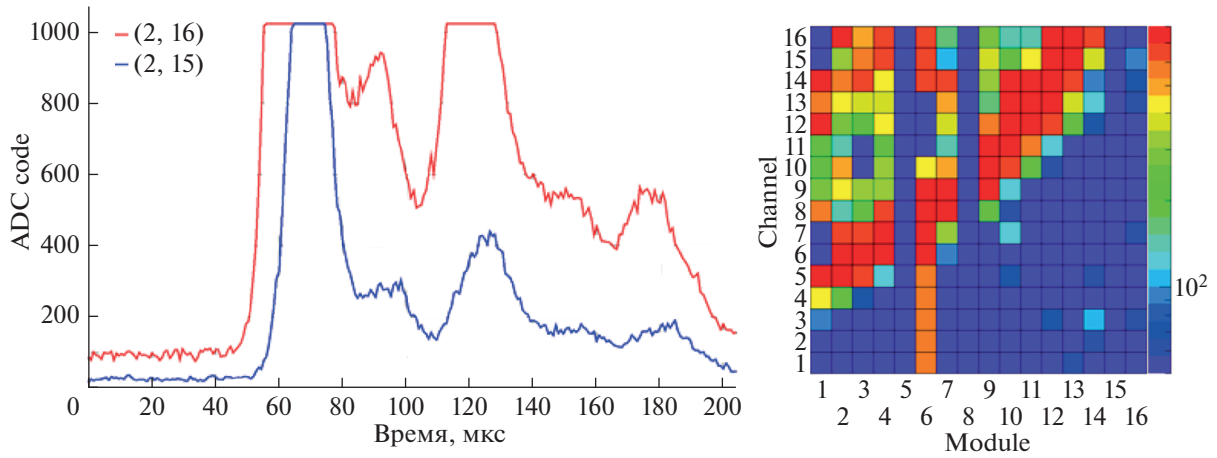


Рис. 2. Двойной эльв. Слева – осциллограммы двух ячеек фотоприемника, справа – карта каналов.

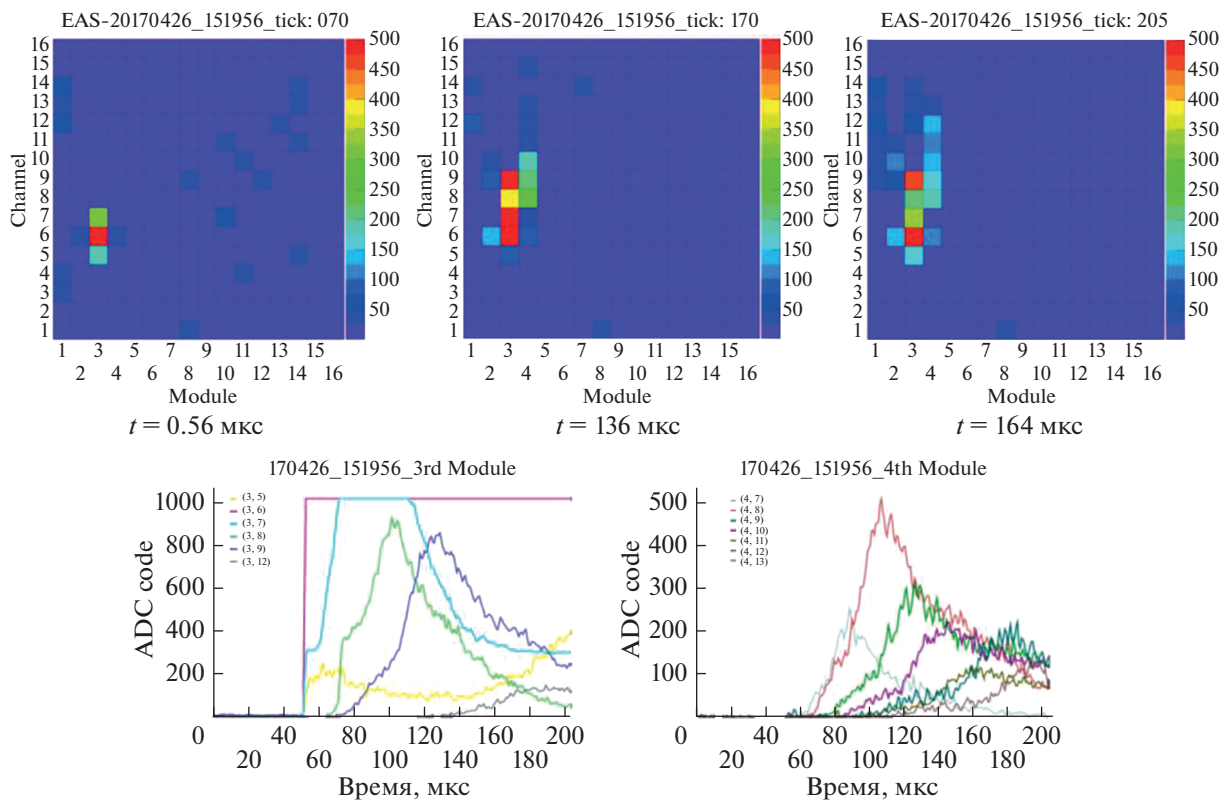


Рис. 3. Карты каналов для трех моментов времени (сверху) и осциллограммы сработавших пикселей модулей 3 и 4 (снизу).

**НЕОБЫЧНЫЙ ТИП
ВНЕГРОЗОВЫХ СОБЫТИЙ,
ОБНАРУЖЕННЫЙ ДЕТЕКТОРОМ “ТУС”**

Интересное событие было отобрано триггером ШАЛ над Индийским океаном, в 150 км от континента Австралии (широта -26.95° , долгота 112.05°). Оно зарегистрировано вдали от гроз и в безоблачных

условиях. По данным наземной сети регистрации молний Vaisala GLD360 расстояние до ближайшей грозы составило примерно 500 км к северо-западу от события. Спутниковые данные об облачности в зоне события указывают на отсутствие грозовых облаков. Это событие имеет необычную динамику развития (см. рис. 3). Оно начинается с мгновенной и мощной вспышки с

центром яркости в ячейке (3.6), которая находится в насыщении все время записи. В других пикселях (модули 2, 3 и 4) наблюдается перемещение максимума сигнала во времени. Скорость перемещения сигнала по матрице фотоприемника так велика, что можно сделать предположение, что источник движется в поле зрения телескопа со скоростью света. В этом случае, зенитный угол трека относительно оси зрения телескопа составляет 80° . Движение объекта происходит из космоса к Земле. Амплитуды сигналов в той части события, где наблюдается перемещение максимума свечения, на порядок больше ожидаемых от ШАЛ с энергией 100 ЭэВ. В конце осциллограмм сигналы в ячейках достигают некоторого уровня, который намного выше уровня шума до начала события. Это означает, что часть УФ сигнала продолжает излучаться в течение более 100 мкс. Эти особенности обсуждаемого события: длительный огромный сигнал в первой на пути трека ячейке и длительные большие сигналы после максимума кривой свечения в последующих ячейках, не позволяют считать их сигналом ШАЛ ультра высокой энергии. Природа необычного события (пока единственного в своем роде) не ясна. В настоящее время происходит поиск событий с подобными характеристиками и проводится их анализ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы прибора “ТУС” в режиме ШАЛ происходит регистрация УФ событий различной природы. Эти явления вызывают срабатывание триггерной системы детектора и с учетом мертвого времени при записи отобранных событий, уменьшают экспозицию измерения КЛ ПВЭ по данным о ШАЛ. Вместе с тем, по своим кинематическим характеристикам и пространственно-временной структуре эти фоновые события существенно отличаются от ШАЛ. Это позволяет производить оффлайн отбор и анализ событий, выделять полезные сигналы. Таким образом, детектор

“ТУС” подтверждает работоспособность методики регистрации ШАЛ с борта спутника и при этом предоставляет также возможность исследовать новые события с высоким временным разрешением, в частности, изучать транзиентные атмосферные явления.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-29-13065-офи-м, финансировании Госкорпорации по космической деятельности РОСКОСМОС и поддержке Программы развития МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dawson B.R., Fukushima M., Sokolsky P. // Prog. Theor. Exp. Phys. 2017. P. 12A101.
2. Linsley J., Scarsi L., Rossi B. // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 6. P. 485.
3. Greisen K. // Phys. Rev. Lett. 1966. V. 16. P. 748.
4. Zatsepin G.T., Kuz'min V.A. // Sov. JETP Lett. 1966. V. 4. P. 78.
5. Fenu F. for the Pierre Auger collaboration // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 486.
6. Tsunesada Y., AbuZayyad T., Ivanov D. et al. // Proc. of Sci. ICRC. (Busan, 2017). P. 535.
7. Benson R., Linsley J. // Bull. Amer. Astron. Soc. 1980. V. 12. P. 818.
8. Benson R., Linsley J. // Proc. 17th ICRC. (Paris, 1981). V. 8. P. 145.
9. Khrenov B.A., Panasyuk, M.I. Alexandrov V.V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2001. V. 566. P. 57.
10. Garipov G.K., Grinyuk A.A., Grebenyuk V.M. et al. // Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10. № 1. P. 84.
11. Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A. et al. // Space Sci. Rev. 2017. V. 8. P. 1.
12. Cheng-Ling Kuo, Chen A.B., Lee Y.J. et al. // JGR. 2007. V. 112. P. A11312.
13. Said R., Murphy M. // Proc. 24th Int. Lightning Detect. Conf. and 6th Int. Lightning Meteorol. Conf. (San Diego, 2016). P. 8.
14. Marshall R.A., Da Silva C.L., Pasko V.P. // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 6112.