

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОРБИТАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ТУС

*М. Ю. Зотов**

от имени коллаборации Lomonosov–UHECR/TLE

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Телескоп ТУС, входящий в состав научной аппаратуры университетского спутника «Михаил Ломоносов», запущенного с космодрома «Восточный» 28 апреля 2016 г., является первым в мире орбитальным детектором космических лучей предельно высоких энергий. В работе представлены некоторые результаты, полученные детектором ТУС в режиме регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) в течение первого года работы. Описаны основные типы событий, регистрируемых прибором, а также методика поиска ШАЛ на основе экспериментальных данных, и даны предварительные результаты.

The TUS telescope, which was launched into orbit from the Vostochny Cosmodrome on April 28, 2016, as a part of the scientific payload of the Lomonosov satellite, is the world's first orbital detector of extreme energy cosmic rays. Some of the results obtained with TUS in the mode dedicated to registering extensive air showers (EAS) in the first year of operation are presented. We focus on the main types of events recorded by the device, a search for EAS in the experimental data and its preliminary results.

PACS: 95.85.Ry; 95.55.Vj; 95.40.+s; 07.87.+v; 95.85.Ls; 92.60.Pw

ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ, энергии более 50 ЭэВ) впервые были зарегистрированы в начале 1960-х гг. [1]. Тем не менее, несмотря на интенсивные международные исследования, вопрос об их природе и происхождении до сих пор остается открытым. Во многом это связано с чрезвычайно низким потоком КЛ данных энергий и, как следствие, малой статистикой наблюдений.

*E-mail: zotov@eas.sinp.msu.ru

Для многократного увеличения экспозиции экспериментов по изучению КЛ ПВЭ в начале 1980-х гг. было предложено осуществлять регистрацию таких событий с орбиты Земли с использованием ночной атмосферы в качестве гигантской мишени, позволяющей наблюдать в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне черенковское излучение и флуоресценцию широких атмосферных ливней (ШАЛ) [2]. Предполагалось, что для решения этой задачи можно использовать телескоп с диаметром зеркала 36 м и фокальной плоскостью, составленной из ~ 5000 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). По оценкам авторов, такой прибор, установленный на спутнике с высотой орбиты 500–600 км, имел бы поле зрения на поверхности Земли порядка $10\,000\text{ км}^2$, т. е. значительно больше любой из существующих наземных установок, и представлял бы возможность получения практически равномерной экспозиции по всей небесной сфере.

В конце 1990-х гг. эта идея привлекла внимание российских физиков, однако было решено начать с создания детектора-прототипа существенно меньших размеров, чтобы использовать полученный опыт для последующей разработки более сложного инструмента, способного решать реальные физические задачи [3,4]. Таким детектором-прототипом стал орбитальный телескоп ТУС (Трековая УСтановка).

1. ДЕТЕКТОР ТУС

ТУС является первым в мире прибором, предназначенным для регистрации треков КЛ ПВЭ в атмосфере Земли с борта искусственного спутника. С его помощью должна быть опробована методика детектирования, а также собрана информация о свечении ночной атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне, необходимая для успешной разработки орбитальных телескопов КЛ ПВЭ следующего поколения: «КЛ ПВЭ» [5] и JEM-EUSO [6]. Вспомогательными научными задачами эксперимента являются изучение транзиентных атмосферных явлений (ТАЯ), (микро-)метеоров и космического мусора. Детектор ТУС является частью научной аппаратуры спутника «Михаил Ломоносов», запущенного 28 апреля 2016 г. с космодрома «Восточный» на солнечно-синхронную орбиту высотой около 500 км.

ТУС представляет собой телескоп-рефлектор, состоящий из зеркала-концентратора френелевского типа большой площади (2 м^2), предназначенного для сбора и фокусировки слабого сигнала флуоресценции, порождаемого в процессе развития в атмосфере широкого атмосферного ливня, и фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости зеркала. Фотоприемник представляет собой матрицу из 256 ФЭУ типа Hamamatsu R1463 с соответствующей электроникой. Использование большого зеркала-концентратора и ФЭУ позволяет достичь высокой чувствительности прибора и достаточного для ре-

гистрации ШАЛ временного разрешения (менее 1 мкс). Поле зрения одной ячейки детектора равно 0,01 рад. Все поле зрения детектора составляет $\pm 4,5^\circ$ (80×80 км на поверхности Земли) [7–9].

Перед каждым ФЭУ матрицы фотоприемника расположены светофильтр УФС-1, который ограничивает регистрируемое излучение диапазоном длин волн 300–400 нм, световод, собирающий свет с квадратного входного окна пикселя (15×15 мм) на круглый фотокатод ФЭУ (13 мм), и бленда, предназначенная для защиты от боковой засветки. Световод и бленда изготовлены из алюминия.

ТУС может поочередно работать в одном из четырех режимов, различающихся временным разрешением (длительностью τ одного такта измерения). В основном режиме, предназначенном для регистрации ШАЛ, $\tau = 0,8$ мкс. В двух режимах, ориентированных преимущественно на изучение ТАЯ, длительность одного такта равняется 25,6 мкс и 0,4 мс. В наиболее «медленном» режиме с $\tau = 6,6$ мс ТУС способен регистрировать метеоры и космический мусор. В каждом из режимов запись любого отдельного события состоит из 256 тактов для каждого из ФЭУ.

2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СОБЫТИЙ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ДЕТЕКТОРОМ ТУС

Сбор данных детектором ТУС начат 19 мая 2016 г. В течение первых трех месяцев проводились летные испытания, настраивалось программное обеспечение прибора, были опробованы как основной режим работы, так и оба режима для регистрации ТАЯ. Регулярный сбор данных ведется с 16 августа 2016 г. с небольшими технологическими перерывами. К 16 августа 2017 г. зарегистрировано более 200 тыс. событий, из них более 1/3 составляют «полезные» данные, полученные на ночных «частях» орбиты. Около 1900 событий записаны в режимах для наблюдения ТАЯ, 26 612 событий — в режиме для изучения метеоров и космического мусора, остальные — в режиме ШАЛ. Ниже будут обсуждаться преимущественно события, регистрируемые в основном режиме функционирования прибора.

2.1. Шумоподобные события. В большинстве событий ($\sim 80\%$) осциллограммы имеют шумоподобный характер: значения кодов АЦП всех ФЭУ на протяжении записи (204,8 мкс) колеблются вблизи некоторых средних значений. С учетом различной чувствительности ФЭУ освещенность фокальной поверхности при этом является практически равномерной. Насколько можно судить по имеющимся данным, срабатывание триггера в этих случаях вызвано случайными флуктуациями фона. Определенный интерес представляют события, в которых более ярко освещена компактная, как правило, небольшая группа ФЭУ. Анализ географического положения таких событий показал, что в большинстве случаев их наиболее вероятными причинами являются ан-

тропогенные источники света — населенные пункты, аэропорты, морские платформы по добыче газа или нефти и т. п. Точные источники неизвестны, но можно предположить, что ими являются светодиодные или ксеноновые лампы, часть излучения которых попадает в УФ-диапазон. В безлунные ночи ТУС, как правило, регистрирует несколько таких событий на каждой орбите, проходящей над регионами с достаточно прозрачной атмосферой (см. примеры в [8, 10]).

2.2. Медленные вспышки. Существенную долю набора данных (порядка 10 %), полученных в режиме ШАЛ, составляют события, условно названные медленными вспышками. В таких событиях наблюдается одновременное монотонное возрастание кодов АЦП (с точностью до случайных флуктуаций сигнала) в достаточно большой группе смежных ФЭУ, вплоть до всей фокальной плоскости. Величина сигнала в медленных вспышках может варьироваться в широких пределах, вплоть до насыщения некоторых ФЭУ*. Типичное поведение кодов АЦП в медленных вспышках показано на рис. 1. Видно, что в обоих случаях нарастание сигнала продолжается по крайней мере 80 мкс. В большинстве случаев длительности записи не хватает для регистрации вспышки вплоть до ее затухания.

Изучение географического распределения медленных вспышек показало, что они, как правило, сосредоточены в районах интенсивной грозовой активности. Сравнительный анализ данных ТУС, полученных в августе–сентябре 2016 г., с данными сети World-Wide Lightning Location Network (WLLN, <http://wwlln.net>), любезно предоставленными руководителем этой сети проф. Хольцвортом (Richard Holzworth), выявил корреляцию между медленными

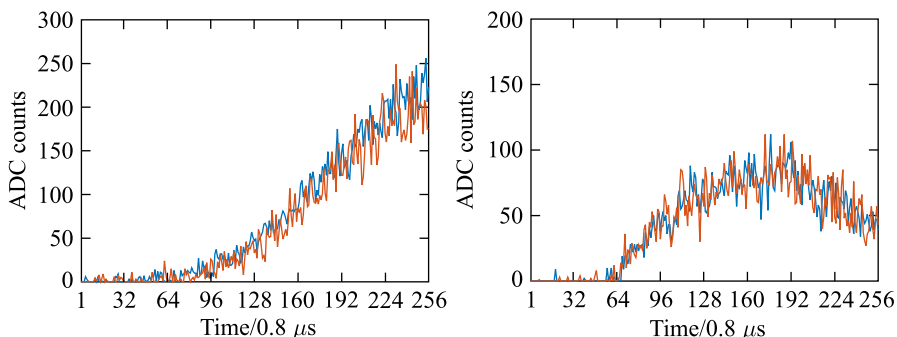


Рис. 1. Два примера осциллограмм в медленных вспышках. Показано поведение кодов АЦП в двух ФЭУ

*Максимальное значение кодов АЦП равняется 1023, что в условиях низкого фона (при максимальной чувствительности ФЭУ) соответствует приблизительно 400 фотонам.

вспышками и молниями. Для сравнения отбирались молнии, зарегистрированные в пределах интервала ± 1 с, который соответствует точности отметок времени триггера ТУС, в широком диапазоне расстояний от поля зрения прибора — вплоть до максимальных расстояний, с которых луч света, проходящий по касательной к поверхности Земли, может достигнуть прибора. Оказалось, что большинство отобранных молний происходили на удалении не менее 400 км от центра поля зрения прибора. Для таких событий засветка фокальной плоскости возможна в том случае, когда на нее попадает свет, пришедший с больших расстояний и рассеянный на зеркале. Это объясняет и приблизительно равномерную засветку фокальной плоскости для таких событий.

В нескольких случаях для медленных вспышек была зарегистрирована сильно неравномерная засветка фокальной плоскости. Для них удалось обнаружить соответствующие молнии, имевшие место внутри или рядом с полем зрения прибора [8].

Как и ожидалось, существенно больше возможностей для изучения явлений, связанных с грозовой активностью, предоставляют режимы, предназначенные для регистрации ТАЯ. Некоторые предварительные результаты анализа данных, полученных в этих режимах, можно найти в [11].

2.3. Мгновенные трекоподобные вспышки. Интересную группу событий, состоящую в среднем из около 12% полного набора данных, 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. Такие события получили название мгновенных трекоподобных вспышек (МТПВ). Типичная МТПВ показана на рис. 2.

Моделирование, выполненное с использованием программного комплекса Geant4 [12], показало, что источниками МТПВ могут быть протоны с энер-

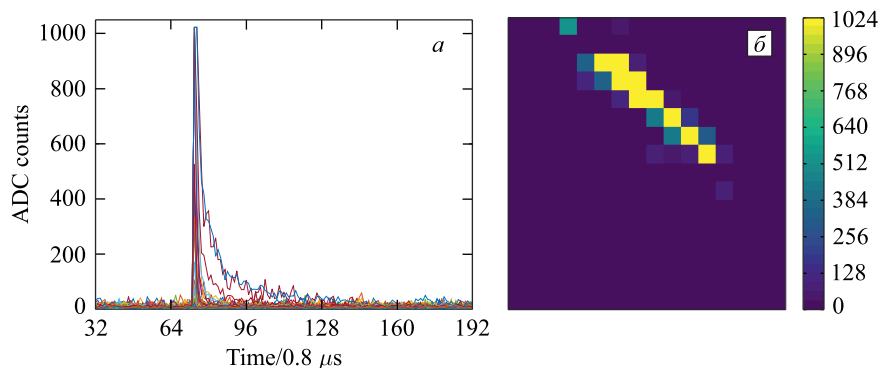


Рис. 2. Пример мгновенной трекоподобной вспышки: *а*) осциллограммы в единицах кодов АЦП; *б*) «снимок» фокальной поверхности в момент максимума сигнала

гией в диапазоне примерно от 100–200 МэВ до 10 ГэВ, проходящие через стеклянные УФ-фильтры, которыми закрыты ФЭУ фокальной плоскости, за счет вызываемых ими флуоресценции и черенковского света. В то же время моделирование показало, что электроны с энергиями, типичными для нижнего радиационного пояса, не могут пробить алюминиевые стенки блока ФЭУ и попасть в фильтры. С деталями моделирования можно ознакомиться в [8,13]. Поскольку МТПВ представляли собой паразитный сигнал, программное обеспечение ТУС было модифицировано таким образом, чтобы по возможности предотвратить их запись.

2.4. События со сложной динамикой. Помимо основных групп событий, в данных ТУС встречаются немногочисленные события со сложным пространственно-временным поведением осциллограмм и изображений на фокальной поверхности. В частности, в режиме ШАЛ зарегистрировано более 10 так называемых эльфов (ELVE, Emission of Light and Very-low frequency perturbation from the Electromagnetic pulse sources [14]). Напомним, что эльфы представляют собой один из типов ТАЯ, имеющих вид расширяющегося светящегося кольца, распространяющегося в ионосфере на высоте 80–90 км. Радиус эльфа может достигать величины порядка 300 км, а длительность — примерно 1 мс.

Первые такое событие было зарегистрировано ТУС 7 сентября 2016 г. над Тихим океаном и представляло собой яркую дугу, перемещавшуюся приблизительно по диагонали фокальной плоскости. Сетью WWLLN на расстоянии ~ 180 км к северо-западу от поля зрения ТУС была записана одновременная (с точностью ± 1 с) молния. Расположение молнии, форма и динамика осциллограмм и яркой дуги на фокальной поверхности ТУС свидетельствуют, что именно эльф является наиболее вероятным источником данного события. Более подробное обсуждение этого и некоторых других эльфов, зарегистрированных ТУС, а также ряда иных событий со сложной пространственно-временной динамикой можно найти в [8,9,11].

3. ПОИСК СОБЫТИЙ, ВЫЗВАННЫХ ШАЛ

Хотя описанные выше данные представляют самостоятельный интерес, основной задачей эксперимента ТУС является проверка методики регистрации ШАЛ от КЛ ПВЭ с орбиты. В ходе подготовки эксперимента проведено компьютерное моделирование с целью выявить возможности детектора, а также разработать способы выделения искомого сигнала [7,15,16]. В частности, получены оценки пороговой энергии регистрации (~ 70 ЭэВ в безлунные ночи), а также ожидаемое число зарегистрированных ШАЛ [16] в зависимости от настроек триггера и энергии первичной частицы. Показано, что за пять лет непрерывной работы ТУС сможет зарегистрировать лишь несколько событий от КЛ с энергией более 100 ЭэВ.

Сложность поиска связана с необходимостью выделения слабого сигнала на быстро меняющемся фоне с помощью сравнительно простого прибора, что представляет собой достаточно сложную задачу даже в безлунные ночи. По результатам моделирования, выполненного на основе программного комплекса ESAF [17], а также кода, написанного в ОИЯИ (Дубна), разработан алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме производить отбор событий, которые могут быть результатом прохождения ШАЛ в поле зрения прибора. Такие события удовлетворяют лишь минимальному набору требований, которые должны выполняться в реальном событии от ШАЛ. Поэтому после формального отбора каждое такое событие-кандидат подвергается всестороннему «ручному» анализу, включающему в себя анализ географического положения события на предмет возможного наличия антропогенных источников сигнала, анализ условий наблюдения (наличия облачности), динамику развития сигнала, а также другие аспекты [18]. На момент написания данной работы наиболее вероятным кандидатом на роль ШАЛ от КЛ ПВЭ является событие, зарегистрированное 3 октября 2016 г. при максимальной чувствительности ФЭУ, в отсутствие в районе регистрации какой-либо грозовой активности. Предварительные оценки показывают, что данное событие могло быть вызвано прохождением ШАЛ от протона или ядра с энергией $\gtrsim 100$ ЭэВ [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первый в мире орбитальный детектор космических лучей предельно высоких энергий ТУС более года успешно работает в составе научной аппаратуры спутника «Михаил Ломоносов». Накопленный за это время набор данных свидетельствует о неожиданном разнообразии свечения ночной атмосферы Земли в ультрафиолетовом диапазоне, что качественно расширяет существовавшие ранее представления, полученные, в частности, в ходе орбитальных экспериментов МГУ им. М. В. Ломоносова «Татьяна», «Татьяна-2» и «Вернов» [20–22]. Накопленные данные имеют огромное значение для успешной разработки орбитальных детекторов следующего поколения: «КЛ ПВЭ» (K-EUSO) и JEM-EUSO. На основе поступающих с орбиты данных ведется поиск событий, вызванных прохождением в поле зрения прибора ШАЛ от КЛ ПВЭ. На данный момент отобран ряд событий-кандидатов, результаты анализа которых готовятся к публикации.

Работа выполнена при поддержке МГУ им. М. В. Ломоносова по программе «Перспективные направления развития», Госкорпорации «Роскосмос», а также грантов РФФИ № 16-29-13065-офи-м, № 15-02-0459817 и № 15-35-21038.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Linsley J., Scarsi L., Rossi B. // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 6. P. 485.*

2. Benson R., Linsley J. // 17th Intern. Cosmic Ray Conf., Paris, 1981. V. 8. P. 145.
3. Alexandrov V. V. et al. // Intern. Cosmic Ray Conf. 2001. V. 2. P. 831.
4. Khrenov B. A. et al. // Observing Ultrahigh Energy Cosmic Rays from Space and Earth. 2001. Am. Inst. Phys. Conf. Ser. V. 566. P. 57.
5. Garipov G. K., Zotov M. Yu., Klimov P. A., Panasyuk M. I., Saprykin O. A., Tkachev L. G., Sharakin S. A., Khrenov B. A., Yashin I. V. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2015. V. 79, No. 3. P. 326.
6. Adams J., Jr., et al. (*JEM-EUSO Collab.*) // Exp. Astron. 2015. V. 40, No. 1. P. 3.
7. Adams J., Jr., et al. (*JEM-EUSO Collab.*) // Ibid. P. 315.
8. Khrenov B. A. et al. (*Lomonosov-UHECR/TLE Collab.*) // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2017. V. 2017, No. 09. P. 006.
9. Klimov P. A. et al. (*Lomonosov-UHECR/TLE Collab.*). arXiv:1706.04976. 2017.
10. Zotov M. Yu. for the *Lomonosov-UHECR/TUS Collab.* arXiv:1703.09484. 2017.
11. Klimov P., Khrenov B., Sharakin S., Zotov M., Chirskaya N., Ereemeev V., Garipov G., Kaznacheeva M., Panasyuk M., Shirokov A., Yashin I. // Proc. of Intern. Symp. TEPA-2016. 2017. P. 122.
12. Agostinelli S. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 506. P. 250.
13. Klimov P. A., Zotov M. Y., Chirskaya N. P., Khrenov B. A., Garipov G. K., Panasyuk M. I., Sharakin S. A., Shirokov A. V., Yashin I. V., Grinyuk A. A., Tkachenko A. V., Tkachev L. G. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2017. V. 81, No. 4. P. 407.
14. Fukunishi H., Takahashi Y., Kubota M., Sakanoi K., Inan U. S., Lyons W. A. // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 2157.
15. Grinyuk A. A., Tkachenko A. V., Tkachev L. G. (*TUS Collab.*) // J. Phys.: Conf. Ser. 2013. V. 409, No. 1. P. 012105.
16. Grinyuk A., Grebenyuk V., Khrenov B., Klimov P., Lavrova M., Panasyuk M., Sharakin S., Shirokov A., Tkachenko A., Tkachev L., Yashin I. // Astropart. Phys. 2017. V. 90. P. 93.
17. Berat C., Bottai S., De Marco D., Moreggia S., Naumov D., Pallavicini M., Pesce R., Petrolini A., Stutz A., Taddei E., Thea A. // Astropart. Phys. 2010. V. 33. P. 221.
18. Biktemerova S. V. et al. (*Lomonosov-UHECR-TUS Collab.*). arXiv:1706.05369. 2017.
19. Tkachev L. G. for the *Lomonosov-UHECR/TUS Collab.* // Proc. of Science (ICRC2017). 2017. ID527.
20. Garipov G. K., Khrenov B. A., Panasyuk M. I., Tulupov V. I., Shirokov A. V., Yashin I. V., Salazar H. // Astropart. Phys. 2005. V. 24. P. 400.
21. Garipov G. K. et al. // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. V. 118, No. 2. P. 370.
22. Panasyuk M. I. et al. // Cosmic Res. 2016. V. 54. P. 261.