

УДК 520.8

ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ТУС

© 2023 г. М. В. Лаврова¹ *, А. В. Блинов¹, А. А. Гринюк¹, Л. Г. Ткачев¹, А. В. Ткаченко¹

¹Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

*E-mail: lavrova@jinr.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

В рамках эксперимента ТУС выполнены поиск и исследование космических лучей предельно высоких энергий с энергией $E > 70$ ЭэВ. Детектор ТУС зарегистрировал также несколько десятков необычных событий, происхождение которых неясно. Выполнен анализ уникальных и не похожих на широкие атмосферные ливни аномальных событий.

DOI: 10.31857/S0367676523701624, EDN: ONERWX

ВВЕДЕНИЕ

Измерение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ) в области $E \sim 10^{20}$ эВ и поиск источников КЛПВЭ являются одной из важнейших задач современной астрофизики высоких энергий. Из-за недостаточности существующей статистики особый интерес представляют проекты исследований КЛПВЭ с помощью детекторов на орбите спутника Земли. Детектор ТУС на борту спутника “Ломоносов” был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой около 500 км 28 апреля 2016 года и был первым экспериментом для измерения флуоресцентного и черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) с космической орбиты. Главной целью эксперимента ТУС был поиск и исследование космических лучей предельно высоких энергий с энергией $E > 70$ ЭэВ. Вместе с тем детектор ТУС зарегистрировал несколько десятков необычных событий, происхождение которых неясно. Уникальные и не похожие на ШАЛ аномальные события и являются предметом исследования, представленного в данной работе. В качестве их возможных источников рассматриваются события типа космологических гамма-всплесков (GRB), а также внеапертурные вспышки молний.

ДЕТЕКТОР ТУС

Детектор ТУС [1] состоит из двух основных частей: фокусирующего зеркала-концентратора френелевского типа площадью ~ 2 м² и фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости на расстоянии 150 см от зеркала и представляю-

щего собой матрицу 16×16 фотоумножителей (ФЭУ), которой соответствует площадь 80×80 км² на поверхности Земли. Детектор ТУС может работать в одном из четырех режимов, различающихся временным разрешением — длительностью dt одного такта измерения. Для регистрации событий в режиме ШАЛ используется временное разрешение $dt = 0.8$ мкс. Выборка событий реализуется двухуровневым триггером, который позволяет отбирать события как по амплитуде сигнала, так и по определенной пространственно-временной топологии сработавших пикселей. За полтора года работы детектора ТУС был получен большой набор разнообразных данных, доказана практическая возможность исследования КЛПВЭ с орбиты спутника Земли, в том числе измерено несколько КЛПВЭ событий. Существенную долю событий в режиме ШАЛ составляют вспышки грозовой природы. Другим примером является регистрация события типа “эльв” (от английского “ELVE”). Большую группу событий ($\sim 12\%$) 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, что источниками таких событий могут быть протоны с энергиями в диапазоне примерно от 100–200 МэВ до 10 ГэВ. На рис. 1 приведен пример наблюдения ШАЛ-кандидата с энергий ~ 100 ЭэВ.

АНОМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ

Детектором ТУС измерено необычное событие 170818_101809-072 с триггером в режиме ШАЛ в южной части Тихого океана восточнее

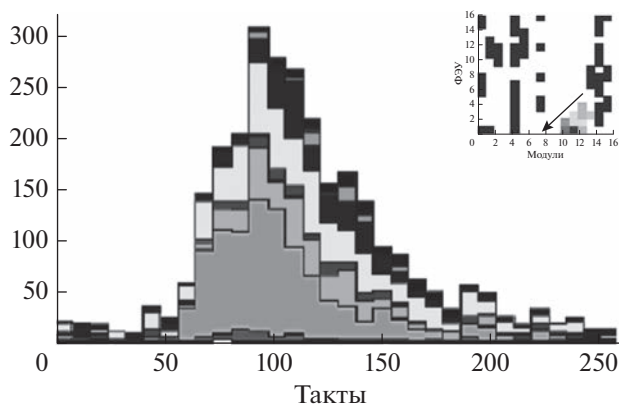


Рис. 1. Временная зависимость для 10 активных пикселей (стековая гистограмма) в интервале 0–256 тактов. Врезка — изображение события на матрице фотодетектора с активными пикселями и неработающими (черными) пикселями. Стрелка указывает направление движения сигнала ШАЛ.

Новой Зеландии (широта — 40.18° , долгота — 176.02°). Событие зарегистрировано в безоблачных условиях с расстоянием до ближайшей грозовой активности около 900 км. В отличие от стандартных событий в детекторе ТУС, в наблюдаемом событии одинаковые сигналы возникли во всех пикселях фотодетектора, что и является критерием их аномальности. Источником фотонов должна быть либо вся площадь $80 \times 80 \text{ км}^2$, видимая фотодетектором с орбиты, либо источник света находился на борту спутника и осветил всю матрицу фотодетектора. Интегральный сигнал от наблюдаемого аномального события примерно в 300 раз больше по сравнению с интегральным сигналом от ШАЛ, образованного протоном с энергией 100 ЭэВ, представленного на рис. 1. Можно оценить, что число фотоэлектронов в событии 170818_101809-072 соответствуют $10^{20} \cdot 300 / 10^{12} = 3 \cdot 10^{10}$ фотонов с энергией 1 ТэВ, т.е. плотности $3 \cdot 10^{10} / 64 \cdot 10^8 = 4.7 \text{ ТэВ фотонов}$ или $\sim 10^{12}$ УФ-фотонов на м^2 .

Такого типа событие могло быть инициировано засветкой всей наблюдаемой детектором ТУС площади световой волной, порожденной короткой ($\sim 200 \text{ мкс}$) гамма-вспышкой (GRB) космологического происхождения.

Детектор FERMI-GBM [3] имеет временное разрешение 2.6 мкс, широкую угловую апертуру, однако регистрирует фотоны начиная с кэВ-ного диапазона, поэтому он не должен был видеть и не видел подобных событий. Их не наблюдение в течение многолетнего времени работы других гамма-детекторов означает, по-видимому, что таких коротких “гамма-всплесков” не существует.

На рис. 2 представлены примеры временной зависимости суммарных по всем пикселям амплитуд для аномальных событий. Всего найдено более 40 аномальных событий, имеющих как правило резкий передний фронт и отличающиеся большим разнообразием по формам и амплитудам.

Для события 170818_101809-072 (рис. 2 вверху и слева) есть корреляция направления движения сигнала по матрице фотодетектора с направлением на ближайшую грозовую активность на удалении 900 км. Для большинства аномальных событий грозовая активность в пределах 1000 км и движение сигнала по матрице фотодетектора отсутствуют. Возможной причиной аномальных событий являются световые вспышки от внеапертурных разрядов молний, диффузно отраженных солнечными панелями спутника на матрицу фотодетектора. Найдено несколько комбинированных событий от разряда молнии на площади в апертуре детектора, в которых присутствуют как нормальный сигнал, сфокусированный зеркалом на небольшую локально связанную часть пикселей, так и аномальный сигнал, диффузно отраженный на все пиксели фотодетектора. На рис. 3 в качестве примера представлена временная зависимость амплитуд сигнала в комбинированном событии 170426_181903-393, имеющая два пика: широкий пик в области 150 такта от сигналов в модулях 2–5 и узкий пик в области 80 такта в модулях 6–16. На левой гистограмме рис. 3 приведена интегральная временная зависимость этого события в модулях 2–5 и есть слева небольшое плечо на фоне сфокусированного света от разряда молнии, коррелирующее с пиком на правом рис. 3. На правой гистограмме приведена интегральная временная зависимость этого события в модулях 6–16. Из-за диффузно отраженного света, справа от пика уровень фонового сигнала увеличился в два раза и есть небольшой горб, коррелирующий с пиком на рис. 3 слева. Из сравнения сигналов следует, что светосила “оптики” диффузного отражения в 20–30 раз меньше по отношению к светосиле фокусирующего зеркала. На рис. 3 в центре представлена временная зависимость интегральных амплитуд в первых 9 пикселях 1 модуля, где нет никаких сфокусированных зеркалом сигналов и виден возросший фон после 70 такта от диффузионных сигналов-отблесков как широкого пика в модулях 2–5, так и узкого пика в модулях 6–16.

ГИБРИДНЫЕ СОБЫТИЯ

В данных детектора ТУС имеется также несколько еще более необычных событий. Сигнал регистрируется во всех пикселях, но временные

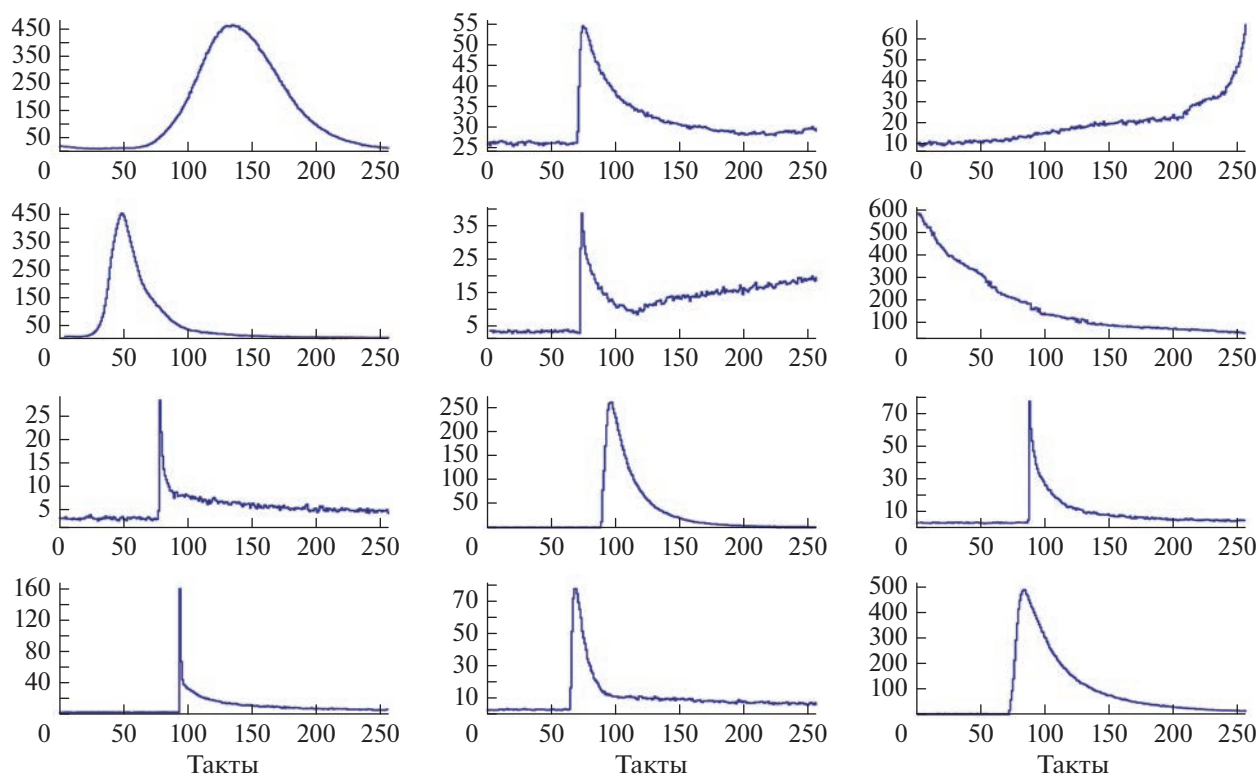


Рис. 2. Примеры временных зависимостей интегральной амплитуды аномальных событий с шагом 0.8 мкс.

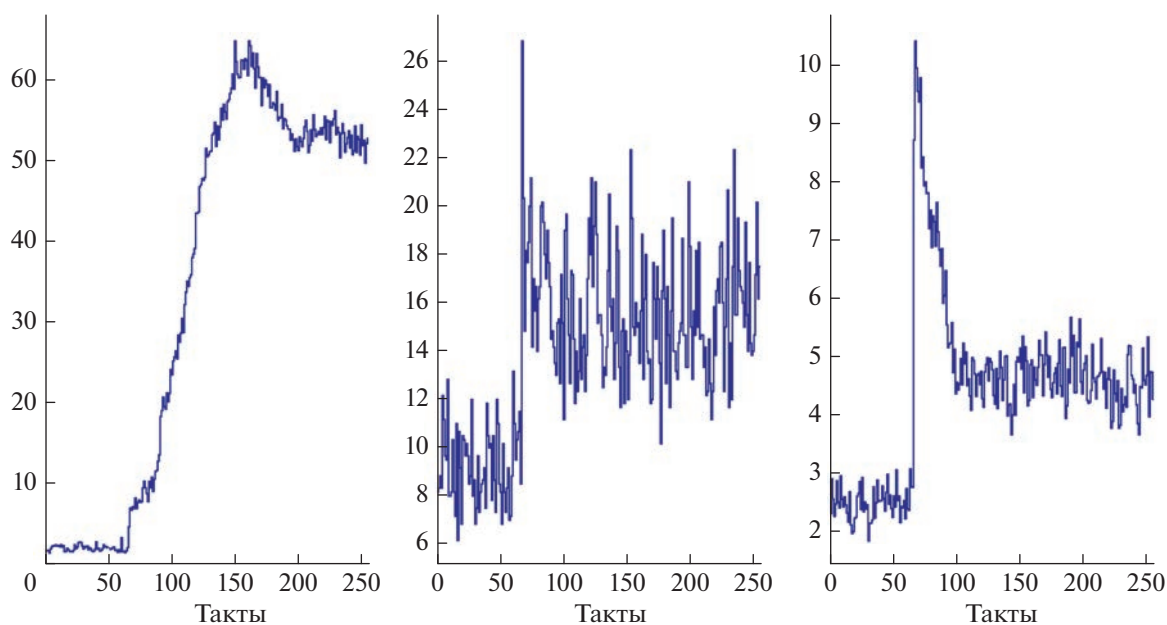


Рис. 3. Временная зависимость интегральных амплитуд сигнала в событии 170426_181903-393. Слева модули 2–5, в центре модуль 1 пиксели 1–9 и справа модули 6–16.

зависимости амплитуд имеют существенно другой вид. Примеры таких “гибридных” событий приведены на рис. 4: узкий, шириной в несколько

временных тактов, пик в начале события, сопровождаемый широким распределением, выходящим за пределы временного окна события.

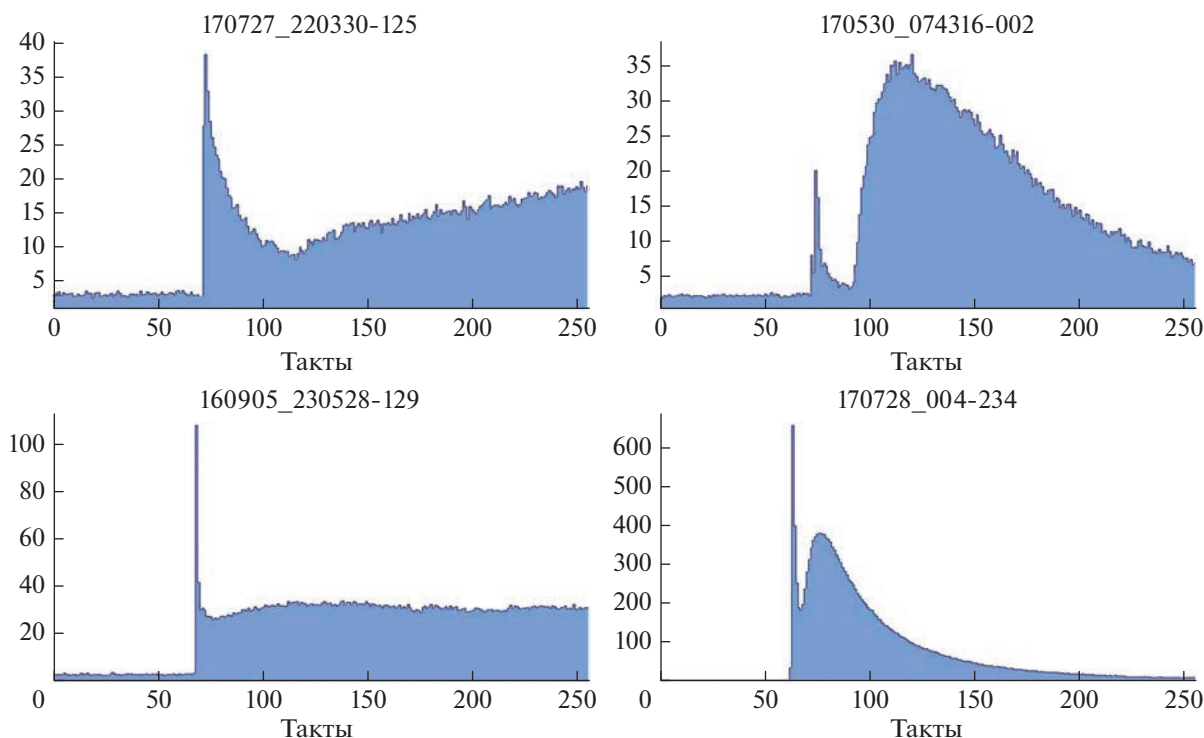


Рис. 4. Временная зависимость суммарной амплитуды сигналов гибридных аномальных событий.

Можно предположить, что узкий пик является сигналом черенковского и флуоресцентного излучения от восходящего ШАЛ, возникшего за пределами поля зрения оптики детектора, который затем инициировал разряд грозовой молнии, вызвавший срабатывание триггера, и отблеск которого виден как широкое последующие распределение. Подавляющая часть аномальных событий имеет очень резкий передний фронт, что может быть обусловлено наложением черенковского пика от ШАЛ с последующим сигналом от разряда молнии. Заметим, что корреляция ШАЛ с молниевыми разрядами давно изучается, однако до сих пор отсутствуют четкие указания на ее существование [4]. Восходящие ШАЛ могут быть инициированы в результате процесса называемого *scrambling*, когда τ -нейтрино большой энергии входит касательно под зенитным углом $\theta > 90^\circ$ в Землю, взаимодействует с ядрами атомов грунта, образуя τ -мезон, который выходит в атмосферу и распадается по адронной моде, образуя восходящий ШАЛ. Интерес к восходящим ШАЛ возник в связи данными эксперимента ANITA [5] наблюдения нескольких событий-кандидатов в восходящие ШАЛ.

Диффузную засветку фотодетектора солнечными панелями от внеапертурных вспышек молний можно использовать для относительной калибровки фотодетектора. Предварительные результаты полученной таким образом калибровки качествен-

но совпадают с проведенной ранее калибровкой с помощью анализа флуктуаций фона [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детектор ТУС в режиме ШАЛ зарегистрировал более 40 событий с аномально большим числом активных пикселей. Вероятной природой таких атмосферных событий являются внеапертурные грозвые разряды, диффузное отражение света которых от солнечных панелей спутника попадает на матрицу фотодетектора. Это подтверждается наблюдением комбинированных событий от разряда молнии на площади в апертуре детектора, в которых присутствуют одновременно аномальный диффузно отраженный сигнал на все пиксели фотодетектора, а также сфокусированный зеркалом сигнал от молнии на небольшую локально связанную часть пикселей. Таким образом, показано, что в сигнале каждого пикселя всегда присутствует дополнительный фон, обусловленный диффузным отражением света от источника в атмосфере в солнечных панелях.

Зарегистрировано также несколько “гибридных” событий: узкие шириной в несколько временных тактов пики вначале события, сопровождаемые широкими распределениями, выходящими за пределы временного окна. Возможно, что узкий пик обусловлен черенковским и флуоресцентным излучением от восходящего ШАЛ, воз-

никшим за пределами поля зрения оптики детектора, который затем инициировал разряд грозовой молнии, отблеск которого также виден как широкое последующее распределение.

Авторы благодарят П.А. Климова за указание на события ТУС непонятной природы и информацию из организации Vaisala о грозовой активности в местах наблюдения аномальных событий. Работа выполнена на УНУ “Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ” и поддержана Минобрнауки России (соглашение 13.УНУ.21.0007, темы государственного задания FZZE-2020-0024, FZZE-2022-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A. et al. // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. No. 3-4. P. 1687.
2. Grinyuk A., Lavrova M., Tkachenko A., Tkachev L. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 82. P. 754.
3. Meegan Ch. Lichti G., Bhat P.N. et al. // Astrophys. J. 2009. V. 702. P. 791.
4. Chilingarian A., Hovsepyan G. // New Astron. 2022. V. 97. Art. No. 101871.
5. Prechelt R., Wissel S., Romero-Wolf A. et al. // Proc. 37th ICRC (Berlin, 2021). P. 1110.
6. Климов П.А., Сигаева К.Ф., Шаракин С.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 8. С. 1165; Klimov P.A., Sigaeva K.F., Sharakin S.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 8. P. 898.

Study of anomalous events in the TUS experiment

M. V. Lavrova^{a, *}, A. V. Blinov^a, A. A. Grinyuk^a, L. G. Tkachev^a, A. V. Tkachenko^a

^a Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

*e-mail: lavrova@jinr.ru

The results of the TUS experiment on search and study extremely high-energy cosmic rays with energies $E > 70$ EeV are analyzed. The TUS detector registered several unusual events of the unclear origin. The analysis of not like EAS and these unique anomalous events is presented.