ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА. ЭКСПЕРИМЕНТ

# АНОМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ В ДАННЫХ ОРБИТАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА ТУС

М.В. Лаврова<sup>а, 1</sup>, А.В. Блинов<sup>а</sup>, Г.К. Гарипов<sup>6</sup>, А.А. Гринюк<sup>а</sup>,

X. Караташ<sup>а, в</sup>, П. А. Климов<sup>6</sup>, И. Пак<sup>г</sup>, О. А. Сапрыкин<sup>∂</sup>,

Л. Г. Ткачев<sup>а, е</sup>, Е. Шолтан<sup>а, в</sup>, И. В. Яшин<sup>6</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна <sup>6</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>в</sup> Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

<sup>е</sup> Университет Сонгюнгван, Сувон, Республика Корея

<sup>д</sup> Консорциум «Космическая регата», Королев, Россия

<sup>е</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

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 непохожие на ШАЛ аномальные события и являются предметом исследования, представленного в данной работе. В качестве их возможных источников рассматриваются события типа космологических гамма-всплесков (GRB), внеапертурные восходящие ШАЛ, сопровождаемые вспышками молний, а также атмосферные гамма-всплески (TGF).

The main goal of the TUS experiment was to search for and study ultra high-energy cosmic rays with energies E > 70 EeV. The TUS detector registered a number of unusual events, the origin of which is unclear. Events that are unique and not similar to EAS are the subject of the study presented in this paper. Events such as gamma-ray bursts (GRBs), out-of-aperture upward going EASs accompanied by lightning flashes, as well as terrestrial gamma-ray flashes (TGFs) are considered as their possible sources.

## PACS: 98.70.Sa; 92.60.Pw

#### введение

Измерение спектра, массового состава и направления прихода космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ) в области  $E \sim 10^{20}$  эВ является одной из важнейших задач астрофизики высоких энергий, источником фундаментальной информации, которую невозможно получить другими методами. Несмотря на многолетние исследования, многие вопросы КЛПВЭ остаются открытыми, прежде всего из-за недостаточной статистики работающих в настоящее время в этой области энергий детекторов Pierre Auger Observatory [1] и Telescope Array [2]. Поэтому особый

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>E-mail: lavrova@jinr.ru

интерес представляют проекты исследований КЛПВЭ с помощью детектора на орбите спутника Земли. Важным преимуществом такого детектора является возможность обзора всей небесной сферы одной и той же установкой, а также возможность одновременного измерения флуоресцентного и диффузно отраженного от поверхности Земли черенковского сигнала широких атмосферных ливней (ШАЛ). Существенной трудностью космического детектора по сравнению с наземными является ослабление сигнала ШАЛ примерно в 100 раз, а также измерение в условиях сильно-переменного фона разнообразных других событий.

Детектор ТУС [3] был первым экспериментом для измерения флуоресцентного и черенковского излучения ШАЛ с орбиты. Главной целью эксперимента было исследование КЛПВЭ с энергией E > 70 ЭэВ. В результате работы прибора на борту спутника «Ломоносов» опробована методика детектирования и найдено несколько событий, искомых кандидатов ШАЛ КЛПВЭ, а также получена информация о свечении ночной атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне, что необходимо для успешной разработки орбитальных детекторов следующего поколения: КЛПВЭ [4], JEM-EUSO [5] и РОЕММА [6].

Вместе с тем детектор ТУС зарегистрировал несколько десятков необычных событий, происхождение которых неясно на сегодняшний день. Уникальные и непохожие на ШАЛ события и являются предметом исследования, представленного в данной работе. Приведено феноменологическое описание аномальных событий и обсуждаются гипотезы их происхождения.

## **ДЕТЕКТОР ТУС**

Детектор ТУС [3] на спутнике «Ломоносов» был выведен на солнечно-синхронную орбиту 28 апреля 2016 г. с наклонением 97,3°, периодом 94 мин и высотой около 500 км. Поле зрения инструмента на уровне моря составляло  $80 \times 80$  км. Схематический вид детектора представлен на рис. 1, он состоял из двух основных частей: фокусирующего зеркала-концентратора френелевского типа площадью  $\sim 2 \text{ м}^2$  и фото-



Рис. 1. Схематический вид детектора ТУС на борту спутника «Ломоносов» с фокусирующим зеркалом Френеля и фотодетектором

приемника, расположенного в фокальной плоскости на удалении 150 см от зеркала и представляющего собой матрицу фотоумножителей (ФЭУ) с аналоговой и цифровой электроникой. Коэффициент отражения зеркала был не менее 85%, однако выполненные сейчас измерения на запасном зеркале дали 40%-ю величину диффузного отражения. Использование большого зеркала-концентратора и фотоприемника с быстрой электроникой позволяет достичь высокой чувствительности прибора и достаточного для регистрации ШАЛ временного разрешения. Для проведения измерений при различной освещенности в электронике детектора было предусмотрено автоматическое управление высоковольтным питанием ФЭУ [3].

Фотоприемник размером  $240 \times 240 \times 200$  мм состоял из 16 модулей, каждый модуль имел 16 каналов регистрации — ФЭУ, а также аналоговую и цифровую электронику. Таким образом, фотоприемник имел  $16 \times 16 = 256$  пикселей, имеющих квадратные входные окна со стороной 15 мм и перекрывающее поле зрения детектора ~  $9 \times 9^{\circ}$ , т. е. угол обзора одного пикселя ~ 0,01 рад. Размер фокального пятна, определенный по измерениям функции рассеяния точки (ФРТ) зеркала, растет с углом  $\theta$  относительно оптической оси телескопа и составляет около одного пикселя при  $\theta = 0^{\circ}$  и двух пикселей при  $\theta = 4,5^{\circ}$ . Непосредственно перед матрицей ФЭУ размещен ультрафиолетовый фильтр УФС1 толщиной 2,5 мм.

Отдельный канал фотоприемника представлял собой ФЭУ Hamamatsu R1463 с диаметром фотокатода 13 мм. Свет из входного окна матрицы собирался на фотокатод с помощью зеркального световода типа конуса Винстона. Полоса спектральной чувствительности канала составляла 300–400 нм, квантовая чувствительность фотокатода ~ 20%. Заряд на аноде ФЭУ считывался аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с постоянной времени RC = 0,6 мкс и оцифровывался в режиме ШАЛ с шагом 0,8 мкс с помощью 10-канального АЦП. Такое разрешение необходимо для временного анализа ШАЛ в интервале 256 временных шагов (тактов), т.е. длительность измерения события ШАЛ ~ 204,8 мкс.

## ТРИГГЕР ШАЛ

Детектор ТУС мог работать в одном из четырех режимов, различающихся временным разрешением, — длительностью dt одного такта измерения. Для регистрации событий с различными диапазонами длительности такта была разработана и создана специальная электроника детектора, формирующая развертки длительностью 256 тактов с различными временными разрешениями. Для регистрации событий в режиме ШАЛ использовалось временное разрешение dt = 0,8 мкс [6]. Остальные более грубые режимы были предназначены для измерений кратковременных атмосферных световых вспышек и изучения метеоров, которые являются вспомогательными научными задачами эксперимента.

Выборка событий реализовывалась двухуровневым триггером, который позволял отбирать события как по интенсивности сигнала dQ (пороговый триггер), так и по определенной пространственно-временной топологии сработавших пикселей за N кадров (N — триггер смежности). Кадр представляет собой 2D-гистограмму на  $16 \times 16$  бинов бегущих амплитудных сумм, длительностью 16 тактов. Для получения триггера на N кадрах должны быть локально связанные активные пиксели, как это показано на рис. 2. В случае удовлетворения условий обоих триггеров амплитуды  $A(t_i)$  каждого



Рис. 2. Покадровая развертка события 161003\_054859-487 с 5-го по 12-й кадр. Пространственно-временные локально связанные пиксели обозначены кругами. Точками указаны ожидаемые места активных пикселей для триггера смежности от активного пикселя на предыдущем кадре

из 256 каналов оцифровывались 10-битным АЦП в течение 256 последовательных тактов  $t_i$  (i = 0, 1, ..., 255) и записывались в память детектора DAQ, образуя событие ТУС.

Таким образом, режим работы триггерной системы определялся заданием следующих параметров: длительностью такта dt, величиной порога входного сигнала dQ и длиной смежности N. В режиме ШАЛ dt = 0,8 мкс, dQ варьировался в интервале от 230 до 330 АЦП кодов, N — в интервале от 3 до 6. Параметр dQ контролируется автоматической регулировкой усиления (АРУ), измерением фоновых токов ФЭУ для каждого модуля, параметры dt и N являлись общими триггерными условиями для всех модулей.

После выработки триггерного сигнала происходила запись в память детектора 256 амплитуд сигналов во всех пикселях в интервале от  $t_{\rm trig}$  –64 до  $t_{\rm trig}$  +192, где  $t_{\rm trig}$  – время выработки триггера, т. е. временное окно события 204,8 мкс. Затем происходит перезапись события из памяти детектора в память бортового компьютера, которая длится 50–60 с, что и определяет мертвое время детектора.

## АНОМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ

Детектором ТУС измерено необычное событие 170818\_131536-072 с триггером ШАЛ восточнее 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 событий — ШАЛ-кандидатов, в наблюдаемом событии засвечена вся матрица фотодетектора, т.е. возникли аналогичные зависимости амплитуд сигналов от времени во всех пикселях, что и является формальным критерием аномальности события. Для событий с засветкой всего поля зрения либо источником фотонов должна быть вся наблюдаемая площадь  $80 \times 80$  км, видимая фотодетектором с орбиты, либо гипотетический источник света должен находиться



Рис. 3. Временная покадровая развертка события 170818\_131536-072 с шагом 4 такта



на борту спутника и освещать всю матрицу фотодетектора. Природа этого события осталась невыясненной. Поэтому в настоящей работе приведен его более детальный анализ.

На рис. 3 показана динамика развития события, а именно, временная покадровая развертка события, начиная с 7-го кадра, с шагом 4 такта и при вычете среднего фона. По оси X указаны номера модулей фотодетектора от 0 до 15, по оси Y — номера ФЭУ в модуле от 0 до 15, белые полосы соответствуют неработающим модулям. Видно, что максимальные значения сигналов в событии перемещаются по матрице фотодетектора — событие началось в его левой нижней части на 15-м кадре, где возникли многочисленные надпороговые сигналы, и продолжилось до правой верхней части на последнем 64-м кадре.

Таким образом, сигнал этого события был независимо измерен в каждом из «живых» пикселей фотодетектора, как представлено в качестве примера на рис. 4, где показаны зависимости от времени амплитуд сигналов в пикселях модуля 10, которые все имеют одинаковое гауссообразное поведение. Такое же поведение имеют распределения в других модулях. Как видно, в некоторых пикселях величина сигнала превышает величину 1024 — это порог 10-канального АЦП, что существенно больше сигналов от событий-кандидатов в ШАЛ.

Для измерения скорости перемещения сигнала по матрице фотодетектора анализировались 3D-совокупности  $(x, y, t_{max})$  координат максимумов сигналов в пикселях (рис. 5), где  $t_{max}$  — время прихода максимального сигнала в x, y-пиксель. Из анализа полученной 3D-поверхности  $(x, y, t_{max})$  можно определить направление движения светового сигнала. Очевидно по построению, что вид указанной поверхности определяется положением максимумов временных зависимостей сигналов, которые не связаны с калибровкой фотодетектора.



Рис. 5 (цветной в электронной версии). Распределение времен прохождения максимумов амплитуд сигналов на матрице фотодетектора. Стрелка указывает направление перемещения сигнала

Видно, что сигнал перемещался вдоль диагонали поля зрения от точки слева внизу, где цветовой оттенок синий и ему соответствуют временные такты в интервале 120–130, к точке справа вверху, где цветовой оттенок коричневый и ему соответствуют временные такты в интервале 140–150 тактов. Промежуток времени  $\Delta t \sim 20$  мкс перемещения максимума сигнала по диагонали *S* поля зрения детектора на поверхности Земли позволяет грубо оценить видимую скорость перемещения:

$$v = S/\Delta t \sim 80 \cdot \sqrt{2}/(20 \cdot 0.8 \cdot 10^{-6}) \sim 7 \cdot 10^6 \text{ km/c.}$$
 (1)

На рис. 6 представлено местоположение на карте Google события 170818\_131536-072 вместе с ближайшей грозовой активностью на расстоянии ~ 900 км. Желтая стрелка показывает направление движения спутника, красная стрелка указывает направление движения по матрице фотодетектора. Из сравнения направления движения сигнала с направлением на ближайшую грозовую активность видно, что есть корреляция указанных направлений.

Таким образом, можно выделить несколько особенностей рассматриваемого события: появление близких по форме сигналов во всех работающих пикселях, разброс времен максимумов сигналов в интервале порядка 20 мкс, большие, вплоть до насыщения, амплитуды сигнала с длительностью более 100 тактов. Количественной оценкой аномальности события может служить коэффициент корреляции r сигналов в соседних пикселях: для «нормальных» событий  $r \sim 0.1 \pm 0.1$ , для аномальных —  $r \sim 0.6 \pm 0.2$ .

Событие 170818\_101809-072 оказалось не единственным, но наиболее мощным из найденных в данных ТУС 46 аномальных событий. На рис. 7 представлены примеры временной зависимости суммарных по всем пикселям амплитуд аномальных событий. В большей части найденных событий виден резкий передний фронт, и они отличаются большим разнообразием по формам и амплитудам, при этом окончание надпороговых сигналов может находиться за пределами стандартной длительности события, равной 256 тактам. Наблюдаемые скорости затухания сигналов во много раз медленнее, чем



Рис. 6 (цветной в электронной версии). Местоположение события 170818\_131536-072 на карте Google вместе с ближайшей грозовой активностью на расстоянии ~ 900 км





Рис. 8 (цветной в электронной версии). Пространственно-временное распределение аномальных событий. *a*) На географической карте аномальных событий красным цветом отмечены комбинированные, синим — гибридные, желтым — другие аномальные события. *б*, *в*) Показано количество аномальных событий по месяцам (синим цветом) и живое время детектора ТУС (красной штрихпунктирной линией)

дает параметр RC = 0,6 мкс постоянной времени электроники, что указывает на физическую причину такого поведения.

Для события 170818\_101809-072 на рис. 6 есть корреляция направления движения максимума сигнала по матрице фотодетектора с направлением на ближайшую грозовую активность на удалении 900 км. Для аномальных событий с резким передним фронтом движение максимума сигнала по матрице фотодетектора отсутствует.

На рис.8 приведены пространственные и временные распределения для аномальных событий. Видно, что они распределены в основном в экваториальной зоне, что указывает на их связь с грозовыми явлениями: плотность аномальных событий — 13,2 отн. ед. в экваториальной зоне  $\pm 30^{\circ}$  и 5,6 отн. ед. вне ее. Аномальные события произошли во второй половине 2017 г., что коррелирует с изменением в это время триггерных условий, и на рис.8 показано распределение живого времени работы ТУС в режиме ШАЛ.

## гибридные события

В данных детектора ТУС имеется несколько нестандартных событий. Сигнал регистрируется во всех живых пикселях, но временные зависимости амплитуд имеют существенно другой вид. Примеры «гибридных» событий приведены на рис. 9: узкий, шириной в несколько временных тактов, пик в начале события сопровождается широким распределением, выходящим за пределы временного окна события. Анализ широких распределений показывает перемещение максимума сигнала по матрице фотодетектора подобно тому, как это приведено на рис. 5.

Заманчиво предположить, что узкий пик является отблеском черенковского и флуоресцентного излучения от восходящего ШАЛ, направленного на детектор и возникшего за пределами поля зрения оптики детектора, который затем инициировал разряд грозовой молнии, вызвавший срабатывание триггера, и отблеск которого виден как



Рис. 9. Примеры гибридных событий

широкое последующее распределение. Более подробно это предположение обсуждается ниже. Заметим, что корреляция ШАЛ с молниевыми разрядами давно изучается [7], в том числе на самых больших детекторах Pierre Auger Observatory [8] и Telescope Array [9], однако до сих пор отсутствуют четкие указания на ее существование на уровне отдельных событий.

Как отмечено выше, подавляющая часть аномальных событий (см. рис. 7) имеет резкий передний фронт, что может быть обусловлено наложением «черенковского» пика от ШАЛ с последующим широким сигналом от разряда молнии.

Горизонтальные ШАЛ могут быть образованы внеапертурными КЛПВЭ и гаммаквантами сверхвысокой энергии. Восходящие ШАЛ из области лимба Земли могут быть инициированы нейтрино в результате процесса, называемого scrambling, когда, например,  $\tau$ -нейтрино большой энергии входит почти касательно в Землю, под зенитным углом  $\theta > 90^\circ$ , взаимодействует с ядрами атомов грунта, образуя  $\tau$ -мезон, который затем выходит в атмосферу и распадается с вероятностью ~ 65% по адронным каналам, образуя восходящий ШАЛ. В последнее время интерес к восходящим ШАЛ оживился в связи с данными эксперимента ANITA [10] — наблюдения нескольких так называемых анитонов — событий от кандидатов в восходящие ШАЛ непонятной природы.

## комбинированные гибридные события

Среди аномальных событий найдено два комбинированных гибридных события, возникших от ШАЛ и разряда молнии в апертуре детектора, в которых присутствуют одновременно как нормальный сигнал, сфокусированный зеркалом на небольшую локально связанную часть пикселей на матрице фотодетектора, так и аномальный сигнал, диффузно отраженный солнечными панелями и зеркалом на все пиксели фотодетектора.

Как видно из рис. 10, сигнал в событии 170426\_181903-393 расположен во втором и третьем модулях на краю поля зрения рядом с неработающими ФЭУ четвертого модуля, что затрудняет его исследование. Событие 160906\_020449-129 расположено в более удобном для изучения месте на матрице фотоприемника: оно находится



Рис. 10. *ху*-проекции интегральных амплитуд комбинированных гибридных событий 170426\_181903-393 (слева) и 160906\_020449-129 (справа) с порогом обрезания фона 3RMS. Засветка окружающих пикселей происходит из-за отражения света ШАЛ в грозовых облаках, кроме того, есть электрическая наводка на соседние каналы в модуле

в центре поля зрения и вокруг него нормально работающие модули. Вид xy-проекции интегральных амплитуд события зависит от величины фонового порога амплитуды сигнала. При его повышении до A > mean + 3RMS, где mean и RMS — среднее значение и RMS фоновых значений амплитуды, выделилась область, где присутствуют только сфокусированные зеркалом сигналы.

На рис. 11 приведена более детальная информация о событии 160906\_020449-129. Как и в гибридных событиях, узкий мощный пик сопровождается широким, выходящим за пределы временного окна события сигналом последующей молнии. Так как событие апертурное, то острый пик вначале мог возникнуть от черенковского и флуоресцентного света вертикально восходящего ШАЛ и сфокусированный зеркалом в пятно из нескольких пикселей, как видно из рис. 10. Имеется также дополнительный сигнал во всех пикселях от диффузного отражения света в панелях и зеркале. Заметим, что энергия прошедшего сквозь Землю вертикально движущегося вверх



Рис. 11. Событие 160906\_020449-129. Слева — временная зависимость интегральной амплитуды сигнала в кодах АЦП. Справа — перемещение максимума сигнала по матрице фотодетектора после обрезания острого пика t > 70

нейтрино не может быть больше 100 ТэВ из-за роста сечения взаимодействия нейтрино с нуклонами с ростом энергии нейтрино. Однако это событие может образовать нейтрино меньшей энергии. Важно чтобы величина сигнала инициированной им молнии была достаточной, чтобы превысить пороговую энергию детектора ТУС. Однако, как следует из МК-моделирования, от вертикально движущегося 100 ТэВ-го адрона на зеркало ТУС попадет не более 10 черенковских фотонов, что существенно ниже порога регистрации и делает невозможным измерение узкого мощного пика, инициированного нейтрино. Как обсуждается ниже, вероятной причиной данного события может быть флуоресцентное и черенковское излучение атмосферного гамма-всплеска (TGF), возникшего при грозовом разряде.

Можно сделать границу вокруг события 160906\_020449-129 и построить интегральные гистограммы сигнала внутри и вне границы) и диффузно рассеянного сигнала солнечными панелями и зеркалом (вне границы). Эти распределения представлены на рис. 12, где область внутри границы выбрана в соответствии с рис. 10, справа и определяется условиями:  $10 \ge N_{\text{mod}} \ge 8$ ;  $7 \ge N_{\text{PMT}} \ge 2$  — всего 18 пикселей. В области вне границы за вычетом неработающих 48 пикселей находится 190 пикселей. Справа от пика (t > 70 тактов) на рис. 12 измеряются сигналы от молнии. На рис. 12, слева измерены суммарный сфокусированный зеркалом  $A_f$  и диффузно отраженный сигналы  $a_d$ :  $A_f + a_d$ . На рис. 12, справа измерены диффузно отраженные сигналы от молнии  $b_d$  вне границы. Видно, что при t > 70 величина нормированного на число пикселей отношения  $R_{\text{E129}} = ((A_f + a_d)/18)/(b_d/190)(5000/18)/(2000/190) \sim 26$ . Отношение амплитуд сфокусированного зеркалом и диффузно отраженного сигналов увеличится на порядок, если учесть, что действительным источником сигнала являются не 18 пикселей, а только два пикселя 3 и 4 модуля 10.

В качестве примера на рис. 13 приведена временная зависимость сигналов в соседнем 9-м модуле: «черенковский» пик наблюдается во всех пикселях и есть насыщение в 4-м пикселе, в котором сложились сигналы — сфокусированный зеркалом плюс сигналы, диффузно отраженные панелями и зеркалом. «Черенковский» пик наблюдается во всех пикселях в один и тот же момент времени, потому что он появился из-за диффузно отраженного сигнала в 3-м и 4-м пикселях 10-го модуля.



Рис. 12. Временная зависимость интегральных амплитуд сигнала в событии 160906\_020449-129. Слева — область 18 пикселей внутри границы, справа — область 190 пикселей вне границы



## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Найдено более 40 аномальных событий с большой амплитудой сигналов, измеренных всеми активными пикселями.

Аномальные события можно разделить на несколько типов:

• «подвижные» события, где видно движение максимума диффузно отраженного светового сигнала от молнии по матрице фотодетектора;

• «неподвижные» события, где такого движения нет;

• гибридные события, где сигналу от молнии предшествует узкий мощный сигнал, похожий на черенковское излучение ШАЛ;

• два комбинированных гибридных события, возникших в апертуре детектора. В них присутствуют сфокусированные зеркалом сигналы от гипотетического восходящего ШАЛ и инициированной им последующей молнии на определенную область фотодетектора, а также диффузно рассеянные сигналы «черенковского» излучения по всей матрице фотодетектора.

Заметим, что для анализа динамики развития аномальных событий существенную роль играет многопиксельность детектора ТУС, позволившая выявить перемещение сигнала по всему полю зрения, а также подобные временные зависимости амплитуд во всех пикселях.

Одной из гипотез происхождения аномальных событий было их появление изза воздействия гамма-всплесков (gamma-ray burst, GRB) на атмосферу. Во время гамма-всплеска вся атмосфера Земли на долю секунды освещается и переизлучает в УФ-диапазоне. В работе [11] анализировалась возможность регистрировать гаммавсплески орбитальными детекторами типа ТУС по их флуоресцентному свечению и была показана ничтожно малая вероятность их наблюдения.

С 2008 г. летает спутник FERMI с гамма-монитором FERMI-GBM [13] на борту, который имеет временное разрешение 2,6 мкс, широкую угловую апертуру и регистрирует фотоны, начиная с кэВного диапазона. Космический детектор SWIFT [14] работает в диапазоне энергий от УФ до рентгена. Ненаблюдение подобных сверхкоротких (~ 200 мкс) GRB в течение многолетней работы этих и других детекторов GRB означает, по-видимому, что таких коротких гамма-всплесков не существует в природе и должна быть другая причина наблюдения аномальных событий детектором ТУС.

Такой логичной причиной может являться измерение фотодетектором ТУС диффузного отражения внеапертурных вспышек разрядов молний от корпуса спутника предположительно от обратной стороны солнечных панелей, а также диффузное отражение от зеркала, как схематически представлено на рис. 14. Расстояние до видимого с высоты спутника ТУС (500 км) горизонта составляет около 2500 км, и расположение грозовой активности с молниевыми разрядами на площади случайное. Это может приводить к наблюдаемому различию направлений распространения отраженного сигнала по матрице фотодетектора, если отражение от солнечных панелей не полностью диффузное, так как чисто диффузное отражение не может дать перемещения максимума сигнала по матрице фотодетекторов. При такой интерпретации наблюдаемое перемещение сигнала в событии 170818\_101809-072 согласно равенству (1) соответствует движению отраженного сигнала по матрице фотодетектора со скоростью 2,1 · 10<sup>5</sup> м/с.



Рис. 14. Схематический вид наблюдения аномального события детектором ТУС

Оценим вклад диффузного отражения от зеркала. На запасном сегменте зеркала было проведено измерение коэффициента диффузного отражения и показано, что в зеркально отраженное пятно попадает 60% света, а остальной свет диффузно рассечвается. Площадь солнечных панелей спутника  $S \sim 6,1 \text{ м}^2$ , 40% диффузно рассечвающей площади зеркала соответствуют  $s = 0,8 \text{ м}^2$ , отношение  $(s/S)(R/r)^2 = 0,5 \text{ указывает}$  на вклад зеркала в диффузном рассеянии света, здесь  $R \sim 2,9 \text{ м}$  и  $r \sim 1,5 \text{ м}$  — расстояния от фотодетектора до солнечных панелей и зеркала соответственно.

Предполагаемой причиной появления восходящих ШАЛ являются прошедшие сквозь Землю нейтрино высоких энергий, породившие во взаимодействии с ядрами вещества лептоны, которые, в свою очередь, непосредственно перед выходом в атмосферу или в ее нижнем слое рождают ШАЛ. Как указано выше, от вертикально движущегося 100-ТэВ ШАЛ на зеркало ТУС попадет не более 10 черенковских фотонов, что существенно ниже порога регистрации, и черенковский сигнал ШАЛ в таком событии не может быть зарегистрирован.

Однако внеапертурные аномальные события могли возникнуть из области вблизи лимба Земли, где восходящие ШАЛ и коррелированные с ними разряды молний могли быть инициированы нейтрино в результате так называемого scrambling процесса с энергией нейтрино  $E_{\nu} > \sim 10^{19}$  эВ, чтобы быть зарегистрированными детектором ТУС.

Истинная ширина черенковского пика ШАЛ составляет не более 20 нс, т.е. не должна превышать временного шага 0,8 мкс. Интегральный по всем пикселям «черенковский» пик комбинированного события на рис. 11, а также «черенковские» пики в гибридных событиях на рис. 9 имеют ширину в несколько пикселей и асимметричную форму. Перерассеянные внутри «черенковского» конуса фотоны проходят более длинный световой путь, что приводит к дополнительной временной задержке света на его пути к детектору, уширению пика и его асимметрии. Из МК-моделирования показано, что этого эффекта недостаточно для объяснения наблюдаемого уширения пика.

Однако возможна другая причина гибридных и комбинированных событий — так называемые TGF (Terrestrial Gamma Ray Flashes) или атмосферные гамма-всплески,

представляющие собой субмиллисекундные ливни фотонов с энергией до нескольких десятков мегаэлектронвольт, образующихся в атмосфере в процессе развития релятивистской лавины убегающих электронов RREA (Relativistic Runaway Electron Avalanche). При внутриоблачных или грозовых разрядах облако-земля могут образовываться мощные электромагнитные импульсы (EMP), порождающие на высотах ~ 12 км релятивистские электронные ливни, образующие восходящие TGF-всплески, которые на длине ускорения в несколько десятков метров достигают энергии в МэВной области [15,16] и имитируют ШАЛ, в том числе его излучение. Мощные TGF достигают ионосферы и на высоте ~ 90 км порождают молнии типа ELVE [8,17,18]. Существенно, что из современного понимания динамики грозовых облаков TGF-всплеск должен возникать раньше основного грозового разряда [19], как и наблюдается в гибридных и комбинированных событиях. При такой интерпретации ТУС регистрирует флуоресцентное излучение RREA-ливня.

Из измерений на специализированном для исследования TGF-детекторе ASIM, работающем на МКС, получено, что восходящие TGF имеют длительность 20–200 мкс [12]. Большинство аномальных событий в ТУС, как видно из рис.7, начинаются с острого пика длительностью в области 10 мкс, что естественно, если их источником является TGF. Ширина наблюдаемых пиков в гибридных событиях обусловлена продольным размером ливня, который может быть существенно меньше, чем в измерениях из работ [15, 16].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зарегистрированы 46 аномальных событий, обусловленных диффузным отражением светового сигнала на фотодетектор от солнечных панелей и зеркала. В каждом событии возникают однотипные по форме сигналы в каждом пикселе фотодетектора. Найдено несколько «гибридных» аномальных событий, в которых присутствует мощный и узкий пик в начале события, сопровождаемый широким распределением, выходящим за пределы кадра.

Рассмотрена возможность существования корреляции ШАЛ и разрядов молний, когда узкий пик является отблеском черенковского и флуоресцентного излучения от восходящего ШАЛ, возникшего за пределами поля зрения оптики детектора, который затем инициировал разряд грозовой молнии и отблеск которого виден как широкое последующее распределение. При этом «черенковский» пик виден, если ось ШАЛ направлена в сторону детектора и интенсивность вспышки молнии, запускающей триггер и регистрацию события, выше порога. Как раз такие события могут дать нейтрино с энергией  $E_{\nu} > 10^{19}$  эВ. Корреляция ШАЛ с молниевыми разрядами давно изучается [7], в том числе на самых больших детекторах Pierre Auger Observatory [8] и Telescope Array [9], однако до сих пор отсутствует ее существование на уровне отдельных событий.

Более вероятной причиной появления аномальных событий являются грозовые разряды молний, при которых могут образовываться мощные электромагнитные импульсы (EMP), порождающие релятивистские электронные ливни и атмосферные гамма-всплески (TGF и TGE), которые имитируют ШАЛ с энергией в МэВной области, а также его тормозное, черенковское и флуоресцентное излучение. Возможно TGF и TGE будут одним из основных источников фоновых событий при поисках и исследованиях восходящих ШАЛ от нейтрино сверхвысоких энергий для планируемых космических детекторов JEM-EUSO [5] и РОЕММА [6].

Благодарности. Авторы благодарят Р. Мирзояна, обратившего наше внимание на возможность наблюдения детектором ТУС событий, обусловленных гамма-вспышками, а также Б. Ж. Залиханова и А. Н. Бородина за полезные обсуждения. Работа поддержана грантом ОМУС ОИЯИ № 24-201-05. Она также поддержана Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант BR21881941.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Castellina A. Highlights from the Pierre Auger Observatory // Proc. ICRC-2019 Conf. 2019.
- 2. Ogio S. Highlights from the Telescope Array Experiment // Ibid.
- Klimov P. A., Panasyuk M. I., Khrenov B. A., Garipov G. K., Kalmykov N. N., Petrov V. L., Sharakin S. A., Shirokov A. V., Yashin I. V., Zotov M. Y., Biktemerova S. V., Grinyuk A. A., Grebenyuk V. M., Lavrova M. V., Tkachev L. G., Tkachenko A. V., Park I. H., Lee J., Jeong S., Martinez O., Salazar H., Ponce E., Saprykin O. A., Botvinko A. A., Senkovsky A. N., Puchkov A. E. The TUS Detector of Extreme Energy Cosmic Rays on Board the Lomonosov Satellite // Space Sci. Rev. 2017. V. 212, No. 3–4. P. 1687–1703.
- 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. The KLYPVE Ultra High Energy Cosmic Ray Detector on Board the ISS // Bull. Russ Acad. Sci.: Phys. 2015. V.79, No.3. P. 326–328.
- 5. The JEM-EUSO Collab. The JEM-EUSO Instrument // Exp. Astron. 2014. V. 40. P. 19-44.
- Olinto A. V., Krizmanicb J. F. The Roadmap to the POEMMA Mission // Proc. ICRC-2021 Conf. 2021.
- Chilingarian A., Hovsepyan G., Karapetyan T., Aslanyan D., Chilingaryan S., Sargsyan B. Genesis of Thunderstorm Ground Enhancements // Phys. Rev. D. 2023. V. 107, No. 10. P. 102003.
- 8. *Mussa R*. Investigating Multiple ELVES and Halos above Strong Lightning with the Fluorescence Detectors of the Pierre Auger Observatory // Proc. ICRC-2023 Conf. 2023.
- 9. *Remington J.* Insight into Lightning Initiation via Downward Terrestrial Gamma-Ray Flash Observations at Telescope Array // Proc. ICRC-2021 Conf. 2021.
- Prechelt R., Wissel S., Romero-Wolf A. An Analysis of a Tau-Neutrino Hypothesis for the Near-Horizon Cosmic-Ray-Like Events Observed by ANITA-IV // Ibid.
- Pshirkov M. S., Zotov M. Yu. Prospects of Observing Gamma-Ray Bursts with Orbital Detectors of Ultra-High Energy Cosmic Rays // Astr. Rep. 2021. V. 65. P. 269–274; arXiv: 1811.05887 [astro-ph.IM]. 2018.
- Østgaard N., Neubert T., Reglero V., Ullaland K., Yang S., Genov G., Marisaldi M., Mezentsev A., Kochkin P., Lehtinen N., Sarria D., Qureshi B. H., Solberg A., Maiorana C., Albrechtsen K., Budtz-Jørgensen C., Kuvvetli I., Christiansen F., Chanrion O., Heumesser M., Navarro-Gonzalez J., Connell P., Eyles C., Christian H., Al-nussirat S. First 10 Months of TGF Observations by ASIM // JGR: Atmospheres. 2019. V. 124, No. 24. P. 14024–14036.
- Meegan Ch., Lichti G., Bhat P. N., Bissaldi E., Briggs M. S., Connaughton V., Diehl R., Fishman G., Greiner J., Hoover A. S., van der Horst A. J., von Kienlin A., Kippen R. M., Kouveliotou Ch., McBreen Sh., Paciesas W. S., Preece R., Steinle H., Wallace M. S., Wilson R. B., Wilson-Hodge C. The Fermi Gamma-Ray Burst Monitor // Astrophys. J. 2009. V. 702. P. 791–804.

- Gehrels N., Chincarini G., Giommi P., Mason K. O., Nousek J. A., Wells A. A., White N. E., Barthelmy S. D., Burrows D. N., Cominsky L. R., Hurley K. C., Marshall F. E., Mészáros P., Roming P. W. A., Angelini L., Barbier L. M., Belloni T., Campana S., Caraveo P. A., Chester M. M., Citterio O., Cline T. L., Cropper M. S., Cummings J. R., Dean A. J., Feigelson E. D., Fenimore E. E., Frail D. A., Fruchter A. S., Garmire G. P., Gendreau K., Ghisellini G., Greiner J., Hill J. E., Hunsberger S. D., Krimm H. A., Kulkarni S. R., Kumar P., Lebrun F., Lloyd-Ronning N. M., Markwardt C. B., Mattson B. J., Mushotzky R. F., Norris J. P., Osborne J., Paczynski B., Palmer D. M., Park H.-S., Parsons A. M., Paul J., Rees M. J., Reynolds C. S., Rhoads J. E., Sasseen T. P., Schaefer B. E., Short A. T., Smale A. P., Smith I. A., Stella L., Tagliaferri G., Takahashi T., Tashiro M., Townsley L. K., Tueller J., Turner M. J. L., Vietri M., Voges W., Ward M. J., Willingale R., Zerbi F. M., Zhang W. W. The Swift Gamma-Ray Burst Mission // Astrophys. J. 2004. V.611, No.2. P.791–804.
- Lindanger A., Skeie C.A., Marisaldi M., Bjørge-Engeland I., Østgaard N., Mezentsev A., Sarria D., Lehtinen N., Reglero V., Chanrion O., Neubert T. Production of Terrestrial Gamma-Ray Flashes during the Early Stages of Lightning Flashes // JGR: Atmospheres. 2022. V. 127, No.8.
- Inan U.S., Barrington-Leigh C., Hansen S., Glukhov V.S., Bell T.F., Rairden R. Rapid Lateral Expansion of Optical Luminosity in Lightning-Induced Ionospheric Flashes Referred to as "Elves" // Geophys. Res. Lett. 1997. V.24, No.5. P.583–586.
- Østgaard N., Cummer S. A., Mezentsev A., Luque A., Dwyer J., Neubert T., Reglero V., Marisaldi M., Kochkin P., Sarria D., Lehtinen N., Ullaland K., Yang S., Genov G., Chanrion O., Christiansen F., Pu Y. Simultaneous Observations of EIP, TGF, Elve, and Optical Lightning // JGR: Atmospheres. 2021. V. 126, No. 11.
- Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupre R. Runaway Electron Mechanism of Air Breakdown and Preconditioning during a Thunderstorm // Phys. Lett. A. 1992. V. 165, No. 5–6. P. 463–468.
- Skeie C.A., Østgaard N., Mezentsev A., Bjørge-Engeland I., Marisaldi M., Lehtinen N., Reglero V., Neubert T. The Temporal Relationship between Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Associated Optical Pulses from Lightning // JGR: Atmospheres. 2022. V. 127, No. 17.

Получено 6 марта 2024 г.