

АНАЛИЗ АНОМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ В ДАННЫХ ОРБИТАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА ТУС

М. В. Лаврова^{1,*}, А. В. Блинов¹, А. А. Гринюк¹,
Х. Караташ^{1,2}, П. А. Климов³, Л. Г. Ткачев^{1,4},
Е. Шолтан^{1,2}

от имени коллаборации Lomonosov UHECR/TLE

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

⁴ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Главной целью эксперимента ТУС был поиск и исследование космических лучей предельно высоких энергий: $E > 70$ 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 настоящего исследования. В качестве их возможных источников рассматриваются события типа космологических гамма-всплесков (GRB), внеапертурные восходящие ШАЛ, а также атмосферные гамма-всплески (TGF и TGE).

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 Extensive Air Shower (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 $E \sim \sim 10^{20}$ 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 из-за недостаточной

* E-mail: lavrova@jinr.ru

статистики работающих в настоящее время в этой области детекторов Auger [1] и TA [2].

Детектор ТУС [3] был первым орбитальным экспериментом для измерения флуоресцентного и черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ). Главная цель эксперимента — исследование КЛПВЭ с энергией $E > 70$ ЭэВ. Вместе с тем детектор ТУС зарегистрировал несколько десятков необычных событий, происхождение которых было неясно. Уникальные и не похожие на ШАЛ события и являются предметом исследования, представленного в данной работе.

ДЕТЕКТОР ТУС

Детектор ТУС [4] на спутнике «Ломоносов» был выведен на солнечно-синхронную орбиту 28 апреля 2016 г. с наклоном $97,3^\circ$, периодом 94 мин и высотой около 500 км. Поле зрения инструмента на уровне моря составляет 80×80 км. Схематический вид детектора представлен на рис. 1. Он состоит из двух основных частей: фокусирующего зеркала Френеля площадью $\sim 2 \text{ м}^2$ и фотоприемника в фокальной плоскости, представляющего собой матрицу 16×16 фотоумножителей (ФЭУ). Сигнал на аноде ФЭУ оцифровывается с помощью 10-канального АЦП с постоянной времени $RC = 0,6$ мкс.

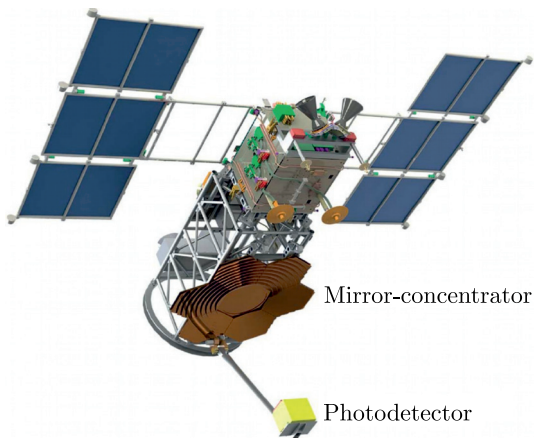


Рис. 1. Схематический вид детектора ТУС на борту спутника «Ломоносов» с фокусирующим зеркалом Френеля и фотодетектором

Детектор ТУС может работать в одном из четырех режимов, с различным временным разрешением — длительностью dt одного такта измерения — в интервале 256 временных шагов (тактов). Для измерения ШАЛ используется временное разрешение $dt = 0,8$ мкс [4], т. е. длительность события 204,8 мкс. Остальные более грубые режимы предназначены для

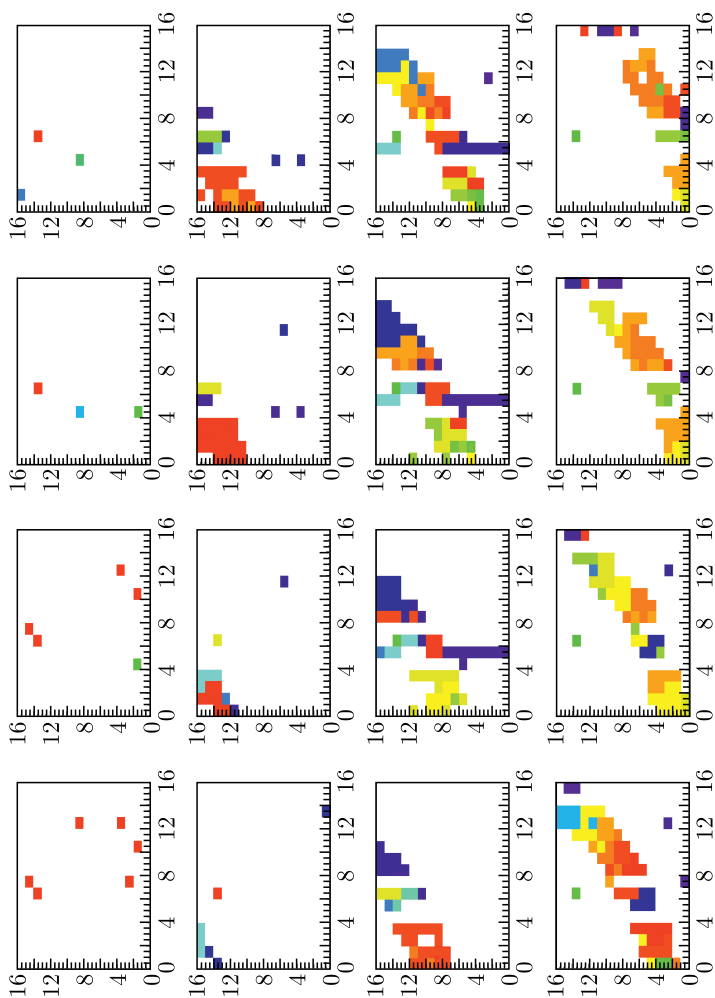


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Показанная развертка события типа ELVE 170823_074747-066 с шагом 16 тактов. По оси X — номер модуля фотодетектора, по оси Y — номер ФЭУ в модуле. Размер одного пикселя на двумерной гистограмме соответствует размеру 5×5 км видимой поверхности с высоты 500 км. Цветом показана относительная величина амплитуды сигнала в ячейке

измерений атмосферных световых вспышек и являются вспомогательными научными задачами эксперимента.

Выборка событий реализуется двухуровневым триггером: события отбираются как по величине сигнала dQ (пороговый триггер), так и по пространственно-временной топологии сработавших пикселей за N кадров (триггер смежности). Таким образом, режим работы триггерной системы определяется длительностью такта dt , величиной порога dQ и длиной смежности N . В режиме ШАЛ dQ варьировался в интервале от 230 до 330 АЦП кодов, N — от 3 до 6. При срабатывании триггера амплитуды сигнала $A(t_i)$ оцифровываются в течение 256 тактов t_i ($i = 0, 1, \dots, 255$, $dt_i = 0,8$ мкс) и записываются в память детектора в интервале от $t_{\text{trig}} - 64$ до $t_{\text{trig}} + 192$, где t_{trig} — время выработки триггера. Затем событие копируется из памяти детектора в память бортового компьютера, которая длится 50–60 с, что и определяет мертвое время детектора, а также величину порога dQ .

На рис. 2 приведена в качестве примера покадровая развертка события 170823_074747-066 типа ELVE (Emission of Light and Very-low frequency perturbation from an Electromagnetic pulse sources), из которой видно, что скорость распространения сигнала в атмосфере $\sim 0,3 \times 10^6$ км/с.

АНОМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ

Детектором ТУС измерено необычное событие 170818_131536-072 с триггером ШАЛ с расстоянием до ближайшей грозовой активности ~ 900 км. В отличие от событий — ШАЛ-кандидатов, в этом событии засвечена вся матрица фотодетектора и во всех пикселях возникли аналогичные кривые блеска — зависимости амплитуд сигналов от времени. Для событий с засветкой всего поля зрения либо источником должна быть вся площадь 80×80 км, видимая детектором с орбиты, либо источник света должен находиться на борту спутника и освещать всю матрицу фотодетектора. Таким источником, как обсуждается ниже, может быть мощная вспышка света в атмосфере, диффузно отраженная от солнечных панелей и зеркала ТУС.

На рис. 3 слева приведена интегральная кривая блеска события 170818_131536-072, справа показана динамика развития события: временная покадровая развертка начиная с 7-го кадра с шагом 4 такта. По оси X нумеруются модули фотодетектора от 1 до 16, по оси Y — номера ФЭУ, белые полосы и пятна на кадрах соответствуют неработающим ФЭУ. Видно, что сигналы в событии перемещаются по матрице фотодетектора — начало в левой нижней части на 17-м кадре и окончание в правой верхней части на последнем 64-м кадре. Сигнал был независимо измерен в каждом из «живых» пикселей фотодетектора.

На рис. 4 приведены еще три подобных события, в которых виден сигнал во всех пикселях матрицы фотодетектора. В отличие от события

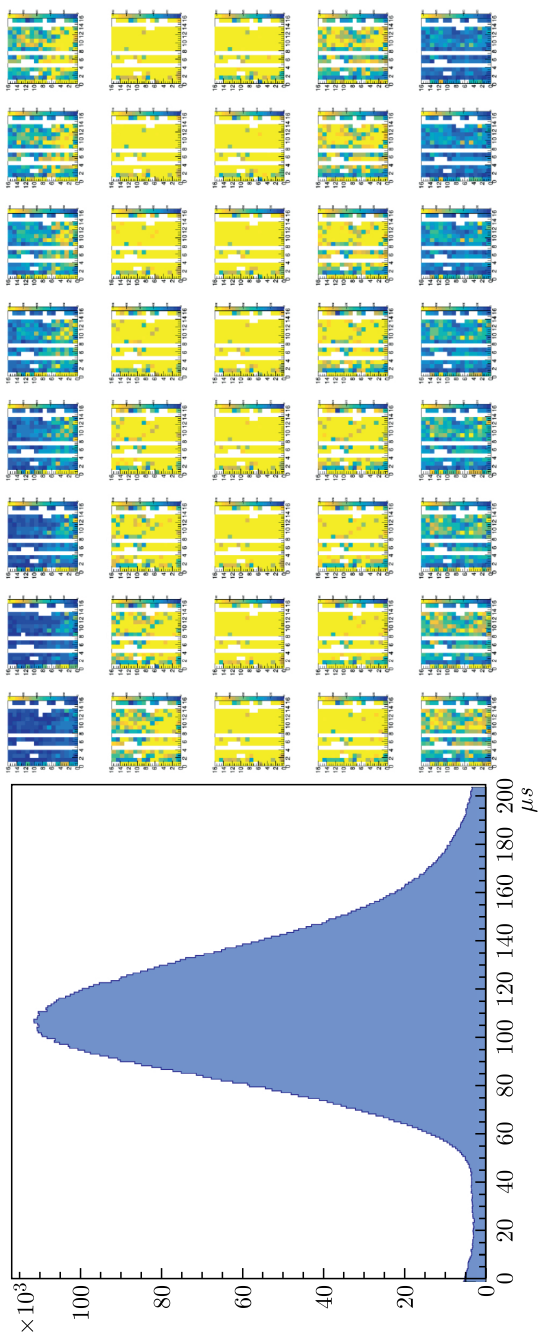


Рис. 3. Слева — интегральная кривая блеска события 170818_131536-072; справа — покадровая развертка события с шагом 4 такта. По оси X — номер модуля фотодетектора, по оси Y — номер ФЭУ в модуле

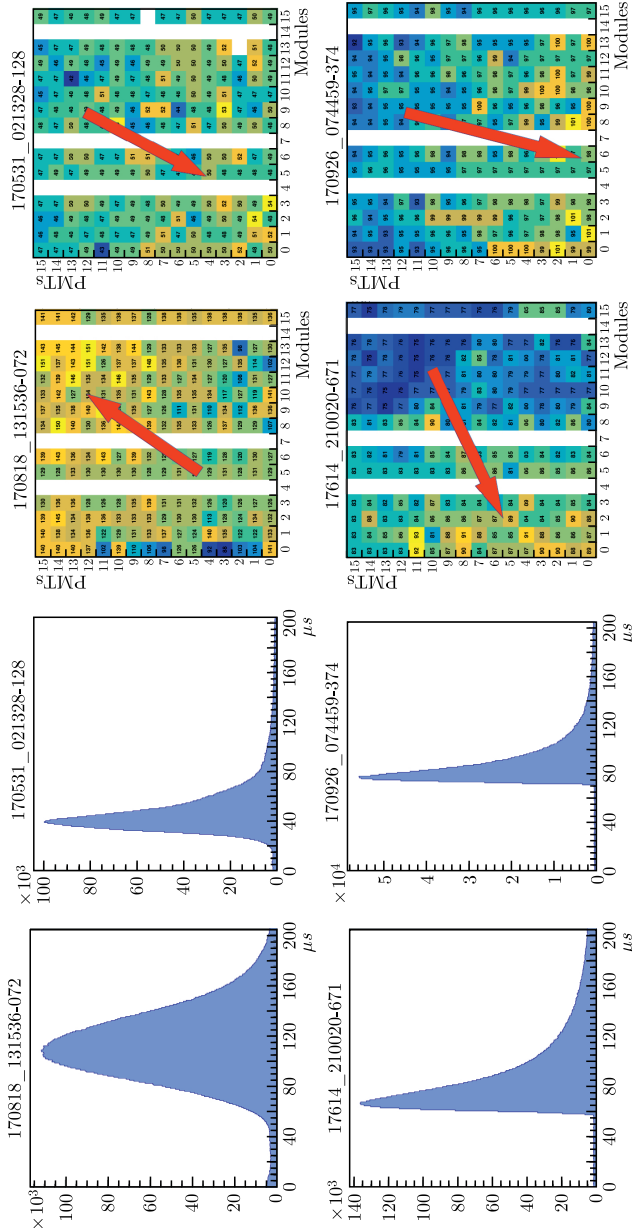


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Слева — интегральные кривые блеска; справа — распределение времен прохождения максимумов амплитуд сигналов по матрице фотодетектора. Стрелка указывает направление перемещения сигнала. По оси X — номер модуля фотодетектора, по оси Y — номер ФЭУ в модуле. Цветом показано время в тактах максимальной амплитуды сигнала в ячейке

170818_131536-072, у этих событий не обнаружено грозовой активности в радиусе 1000 км согласно каталогу Vaisala [5].

Для анализа динамики событий построены 2D-гистограммы распределения времен прохождения максимумов амплитуд сигналов через пиксели фотодетектора, приведенные на рис. 4 справа.

Для измерения скорости перемещения сигнала по матрице фотодетектора анализировались 3D-поверхности (x, y, t_{\max}) координат максимумов сигналов в пикселях, где t_{\max} — время прихода максимального сигнала в x - y -пиксель. Видно, что в событии 170818_131536-072 сигнал перемещался вдоль диагонали S поля зрения от точки слева внизу (временные такты в интервале 120–130) к точке справа вверху (временные такты в интервале 140–150). Промежуток времени $\Delta t \sim 20$ мкс позволяет оценить видимую скорость перемещения сигнала по поверхности Земли:

$$v = \frac{S}{t} \sim 80 \frac{\sqrt{2}}{20 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6}} \sim 7 \cdot 10^6 \text{ км/с}, \quad (1)$$

что больше скорости света. Как показано ниже, на самом деле сигнал движется по матрице фотоприемника со скоростью $\sim 2,1 \cdot 10^5$ м/с. Кажущаяся сверхсветовая скорость получается из-за проекции этого движения на удаленную поверхность Земли.

Качественно наиболее близко к аномальным событиям относятся события типа ELVE на рис. 2, происходящие в апертуре детектора. В этом случае также видно движение сигнала в атмосфере и его образа на матрице фотодетектора. В таблице представлено сравнение характеристик аномальных событий, а также события ELVE и 161003_054859-487 — кандидата в ШАЛ: направления φ и скорости перемещения сигнала v , а также интегралы от кривых блеска пропорциональны полной энергии.

Событие	Азимутальный угол φ	v , км/с	Интеграл, АЦП коды
170818_131536-072	56,6158	$\sim 7 \cdot 10^6$	$9,4 \cdot 10^6$
170531_021328-128	-118,681	$\sim 15 \cdot 10^6$	$3,4 \cdot 10^6$
170614_210020-671	-161,9	$\sim 12 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^6$
170926_074459-374	-98,8	$\sim 7 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$
170823_074747-066	Событие ELVE	$\sim 0,3 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^6$
161003_054859-487	ШАЛ с энергией 100 ЭэВ	—	34 663

Какова природа процессов в атмосфере, приводящих к аномальным событиям? Можно предположить, что на атмосферу падает плоская волна излучения типа гамма-всплеска (GRB), и отдельные фотоны создают миниШАЛы, которые и порождают детектируемое флуоресцентное излучение. Подробнее это рассмотрено в разделе «Обсуждение результатов».

На рис. 5 представлены гистограммы корреляций соседних пикселей для «нормальных» (фоновых) и аномальных событий. Средние значения

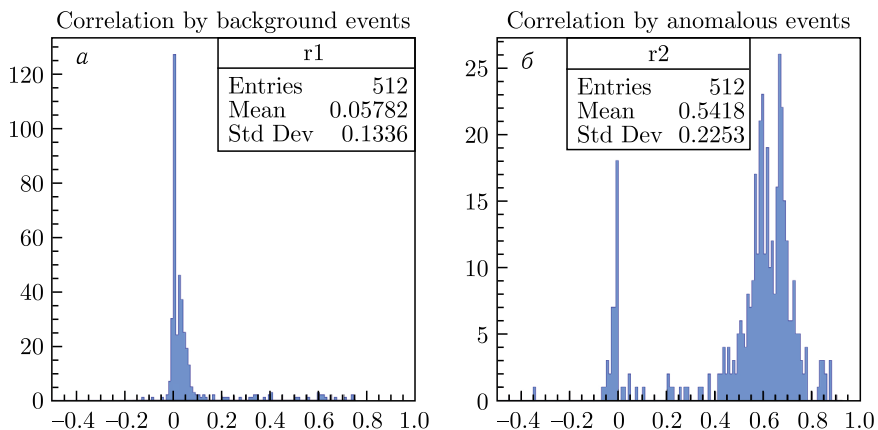


Рис. 5. Корреляция между соседними пикселями: а) нормальные фоновые события, б) anomальные

корреляций для «нормальных» событий $r_1 = 0,1 \pm 0,1$, для anomальных — $r_2 = 0,6 \pm 0,2$. Таким образом, особенность рассматриваемых событий: появление близких по форме сигналов во всех пикселях с коэффициентом корреляции $r_2 = 0,6 \pm 0,2$ и большие, вплоть до насыщения, амплитуды сигнала с длительностью более 100 тактов.

С помощью указанных критериев найдено более 40 anomальных событий, кривые блеска которых представлены на рис. 6. События распределены в основном в экваториальной зоне, что указывает на их корреляцию с электрическими грозowymi явлениями. Как правило, виден резкий передний фронт во всех пикселях, поэтому движение максимума сигнала по матрице фотодетектора отсутствует. События отличаются большим разнообразием по формам и амплитудам.

ГИБРИДНЫЕ СОБЫТИЯ

Среди anomальных событий есть несколько необычных. Сигнал регистрируется во всех пикселях, но кривые блеска имеют существенно другой вид. Примеры «гибридных» событий приведены на рис. 7: узкий, шириной в несколько временных тактов пик в начале события сопровождается широким распределением, выходящим за пределы временного окна. Анализ широких распределений показывает в ряде событий перемещение максимума сигнала по фотодетектору подобно тому, как показано на рис. 4.

Возможно узкий пик является черенковским и флуоресцентным излучением от восходящего ШАЛ, который затем инициировал разряд грозовой молнии и срабатывание триггера и который виден как широкое последующее распределение. Однако таким образом невозможно осветить

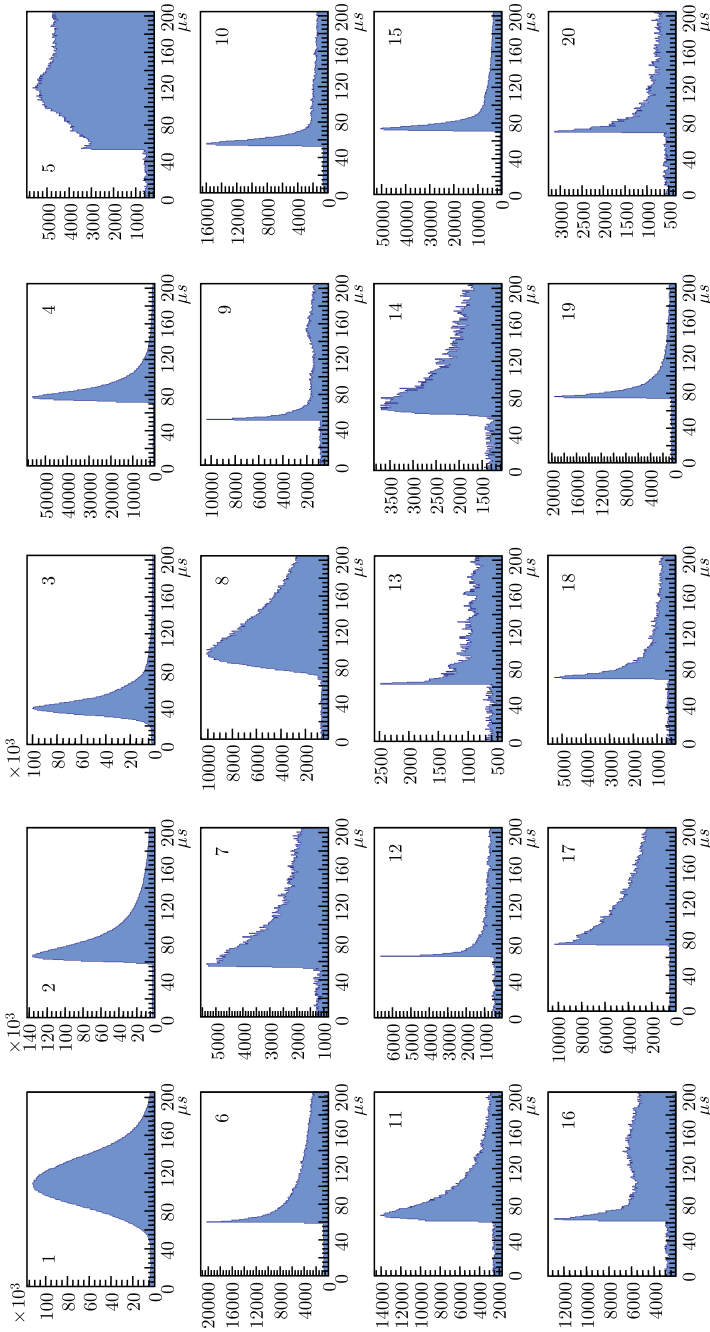


Рис. 6. Примеры интегральных кривых блеска аномальных событий

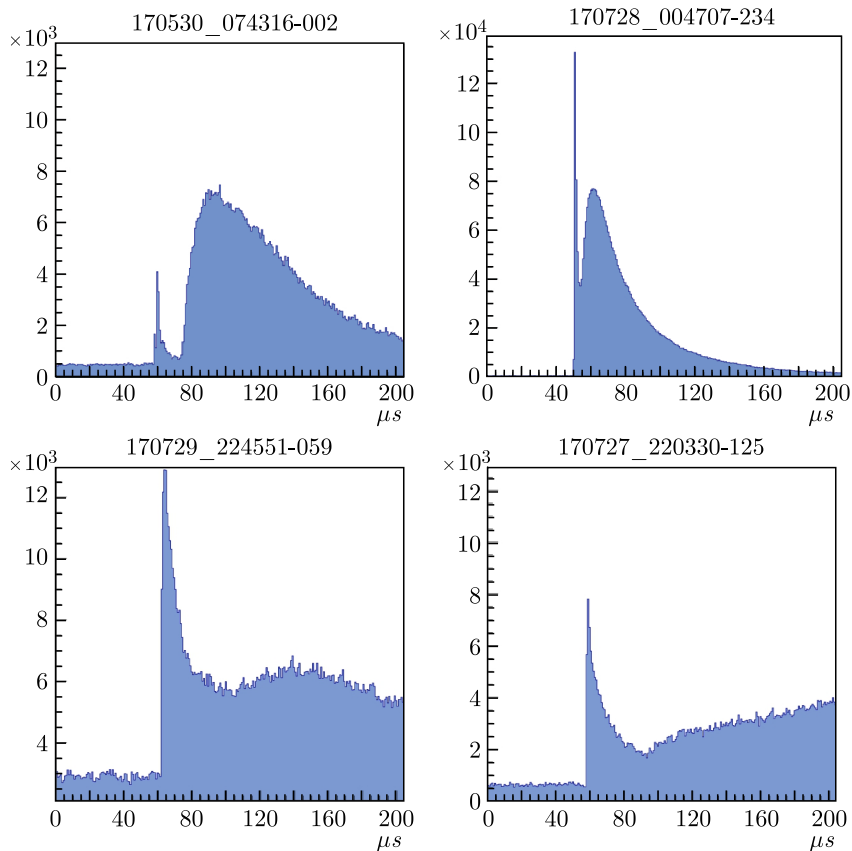


Рис. 7. Примеры интегральных кривых блеска гибридных событий

видимую детектором площадь 80×80 км и, по-видимому, измеряется диффузно отраженный корпусом спутника сигнал, возникший от мощного источника в атмосфере Земли. В разделе «Обсуждение результатов» это рассмотрено более подробно.

КОМБИНИРОВАННЫЕ ГИБРИДНЫЕ СОБЫТИЯ

Среди аномальных событий найдены два комбинированных гибридных события, ХУ-проекции которых представлены на рис. 8. Они возникли от ШАЛ и разряда молнии *в апертуре детектора*, поэтому в них присутствуют одновременно как нормальный сигнал, сфокусированный зеркалом на небольшую локально связанную часть пикселей, так и аномальный, диффузно отраженный на все пиксели фотодетектора сигнал.

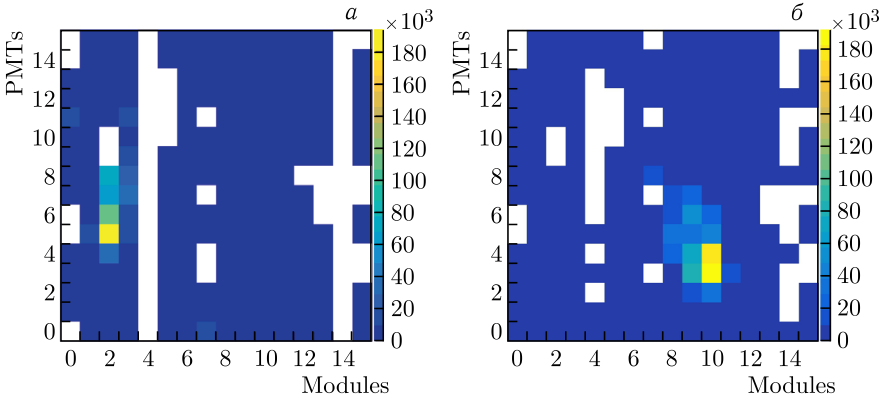


Рис. 8 (цветной в электронной версии). XY-проекции интегральных амплитуд комбинированных гибридных событий 170426_181903-393 (а) и 160906_020449-129 (б) за вычетом фона. По оси X — номер модуля фотодетектора, по оси Y — номер ФЭУ в модуле. Цветом показана относительная величина амплитуды сигнала в ячейке в соответствии с правой шкалой

Как видно из рис.8, событие 170426_181903-393 расположено на краю поля зрения и рядом с неработающим пятым модулем, что затрудняет его исследование. Событие 160906_020449-129 расположено в более удобном для изучения месте: оно находится в центре поля зрения и вокруг него нормально работающие модули.

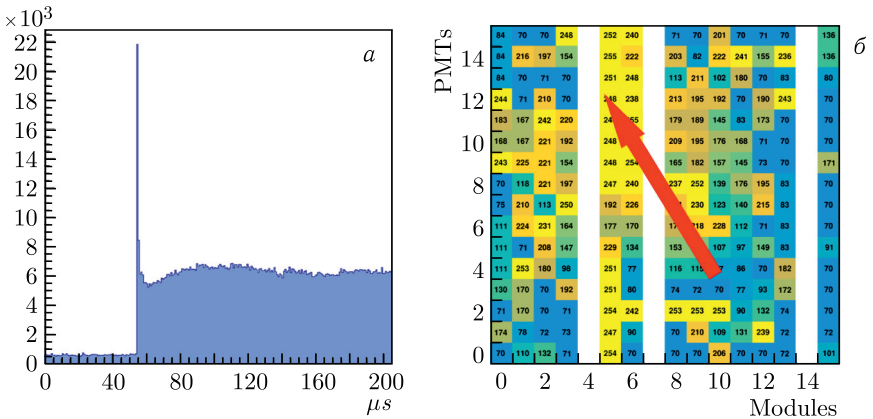


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Событие 160906_020449-129. а) Интегральная кривая пика. б) Перемещение максимума сигнала по фотодетектору после обрезания пика ($t > 70$). По оси X — номер модуля фотодетектора, по оси Y — номер ФЭУ в модуле. Цветом показано время в тактах максимала амплитуды сигнала в ячейке

Событие 160906_020449-129 представляет особый интерес, так как его анализ позволил установить, по-видимому, природу аномальных событий. На рис. 9 приведена его более детальная структура. Как и в гибридных событиях, узкий высокий пик сопровождается широким, выходящим за пределы кадра сигналом последующей молнии. Так как событие апертурное, то острый пик мог возникнуть от черенковского и флюоресцентного света вертикально восходящего ШАЛ, сфокусированного зеркалом в пятно из нескольких пикселей, как показано на рис. 8, б.

Известно, что Земля становится непрозрачной для нейтрино с энергией больше 100 ТэВ из-за роста сечения его взаимодействия с нуклонами. Рассмотрен идеальный вариант, когда вся энергия нейтрино передается протону на уровне моря, который образует вертикальный восходящий ШАЛ с энергией 100 ТэВ. Из монте-карло-моделирования такого ШАЛ получено, что на зеркало ТУС попадет ~ 10 черенковских фотонов, что в сотни раз ниже порога регистрации и делает невозможным измерение такого сигнала. Как обсуждается в следующем разделе, вероятной причиной данного события может быть флюоресцентное и черенковское излучение атмосферного гамма-всплеска (ТGF), возникшего при грозовом разряде.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интерпретация аномальных событий менялась по мере роста их количества и изучения свойств. Вначале было найдено несколько событий гаусс-подобного типа (гистограммы 1–4 на рис. 6) и возникла гипотеза, что это переизлучение в УФ-область от плоской волны гамма-всплеска GRB на видимую с детектора площадь. Детектор FERMI-GBM [6] имеет временное разрешение 2,6 мкс, широкую угловую апертуру и регистрирует фотоны начиная с кэВного диапазона, поэтому он должен был видеть подобные GRB события. Ненаблюдение подобных коротких (~ 200 мкс) GRB в течение многолетней работы FERMI-GBM, а также спутника SWIFT [7] и других гамма-детекторов означает, что таких «гамма-всплесков» не существует и должна быть другая причина их появления.

Естественно предположить, что аномальные события вызваны диффузным отражением светового сигнала от обратной стороны солнечных панелей и зеркала, как это представлено на рис. 10, которое освещает всю матрицу фотодетектора. Это может приводить к наблюдаемому движению сигнала по матрице фотодетектора, если отражение от солнечных панелей не вполне диффузное. При такой интерпретации наблюдаемое кажущееся перемещение сигнала в событии 170818_101809-072 согласно равенству (1) по обозреваемой с детектора поверхности 80×80 км соответствует движению отраженного сигнала по матрице фотодетектора,

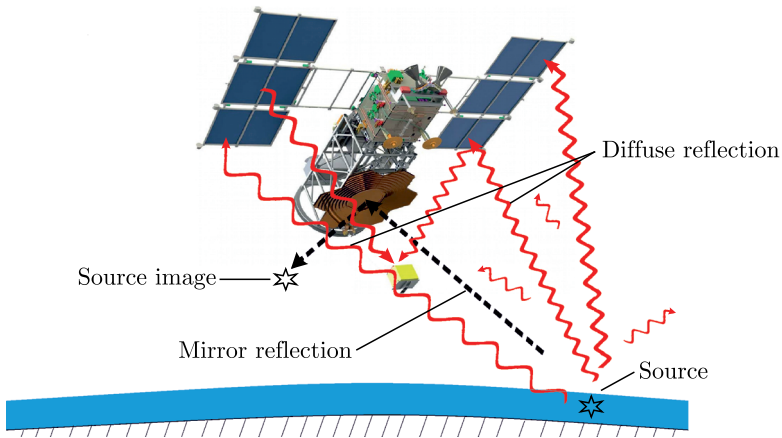


Рис. 10. Схематический вид аномального события в детекторе ТУС

размер которой 240×240 мм, так что скорость в $10000/3$ меньше и равна $2,1 \cdot 10^5$ м/с.

Гипотетической причиной гибридных событий и появления восходящих ШАЛ являются прошедшие сквозь Землю нейтрино высоких энергий из области лимба Земли за пределами апертуры детектора. Восходящие ШАЛ могут быть инициированы нейтрино в результате процесса, называемого scrambling, когда τ -нейтрино большой энергии входит почти касательно в Землю (зенитный угол $\theta > 90^\circ$), взаимодействует с ядрами атомов породы, образуя τ -лептон, который затем на выходе в атмосферу распадается с вероятностью $\sim 65\%$ по адронным каналам, образуя восходящий ШАЛ, который инициирует разряд молнии, дающий триггер и запись события от -64 до $+192$ тактов, так что во временное окно попадает и узкий сигнал восходящего ШАЛ.

Большая часть аномальных событий (см. рис.6) имеет резкий передний фронт, что может быть обусловлено наложением черенковского пика от ШАЛ с последующим широким сигналом от разряда молнии. В последнее время интерес к восходящим ШАЛ обострился в связи с данными эксперимента ANITA [8] — наблюдения нескольких так называемых анитонов — событий от кандидатов в восходящие ШАЛ непонятной природы.

Среди гибридных событий нашлось два события в апертуре детектора, где виден как сигнал от вертикально восходящего ШАЛ, сфокусированный зеркалом на несколько пикселей, так и диффузно рассеянный сигнал ШАЛ от солнечных панелей на всех пикселях. Однако, как следует из монте-карло-моделирования, от вертикального 100-ТэВ ШАЛ на зеркало ТУС попадет не более 10 черенковских фотонов, что в сотни раз ниже порога регистрации, и черенковский сигнал ШАЛ

в таком событии не может быть зарегистрирован, что опровергает гипотезу восходящих ШАЛ.

Изучение проблем атмосферного электричества, в том числе грозových разрядов, естественным образом приводит к предположению о том, что наблюдаемые гибридные и комбинированные события — атмосферные гамма-всплески, так называемые TGF (Terrestrial Gamma Ray Flashes), представляющие собой ливни фотонов с энергией до нескольких десятков мегаэлектронвольт, образующиеся в атмосфере в процессе развития релятивистской лавины убегающих электронов RREA (Relativistic Runaway Electron Avalanche).

Физика грозových процессов представляет собой сложное многопараметрическое явление. Считается, что при внутриоблачных или грозových разрядах облако–земля могут образовываться мощные электромагнитные импульсы EMP (electromagnetic pulse) или EIP (energetic in-cloud pulse) [9], порождающие на высотах 12–20 км релятивистские электронные ливни, образующие TGF-всплески, которые на длине ускорения в сотню метров достигают энергии в десятки мегаэлектронвольт [10, 11] и имитируют излучение ШАЛ. Мощные импульсы EMP достигают ионосферы и на высоте ~ 90 км порождают молнии типа ELVE [9].

В современном понимании динамики грозových облаков TGF-всплеск возникает раньше или одновременно с основным грозovým разрядом [12]. Именно это и наблюдается в гибридных и комбинированных событиях. При такой интерпретации в аномальных событиях ТУС регистрировал изотропное флуоресцентное излучение RREA-ливней. Они являются естественными кандидатами на события TGF длительностью более 10 мкс.

Существует еще один тип атмосферных гамма-всплесков — thunderstorm ground enhancements (TGEs) [13] с тем же механизмом RREA электронного развития ливня. В отличие от восходящего TGF, события TGE возникают в нижней части облаков и направлены вниз. Пик флуоресцентного излучения TGE может быть шире по сравнению с TGF из-за перерассеяния света в окружающих облаках, как это видно на рис. 7. В отличие от других экспериментов ТУС работал в ночное время и мог измерять оптические сигналы TGF, тогда как другие эксперименты проводились в основном в дневное время и не могли их наблюдать.

Из измерений TGF-событий детектором ASIM [14] на МКС получено, что восходящие TGF имеют длительность 20–200 мкс. Большинство аномальных событий в ТУС, как видно из рис. 6, начинаются с острого пика длительностью ~ 10 мкс, что естественно, если их источником является один или несколько накладываемых друг на друга TGF. Ширина наблюдаемых пиков в гибридных событиях обусловлена продольным размером области ускорения RREA-ливня, который может быть существенно меньше, чем в измерениях из работ [10, 11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зарегистрированы несколько десятков аномальных событий с подобными по форме сигналами в каждом пикселе фотодетектора, в том числе несколько гибридных событий, в которых есть мощный и узкий пик в начале события, сопровождаемый широким распределением, выходящим за пределы кадра. При этом «черенковский» пик может быть 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.

Более вероятной причиной появления аномальных событий являются грозовые разряды молний, при которых могут образовываться мощные электромагнитные импульсы (ЕМР), порождающие релятивистские электронные ливни и атмосферные гамма-всплески (TGF и TGE), которые имитируют сигналы ШАЛ, а также его тормозное, черенковское и флюоресцентное излучение.

Благодарности. Авторы благодарят Р. Мирзояна, обратившего наше внимание на возможность наблюдения детектором ТУС событий, обусловленных гамма-всплесками, а также Б. Ж. Залиханова и А. Н. Бородина за полезные обсуждения.

Финансирование. Работа поддержана грантом ОМУС ОИЯИ № 24-201-05, Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант BR21881941.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Castellina A.* // Proc. of ICRC-2019 Conf. 2019. V. 358. P. 004.
2. *Ogio S.* // Ibid. P. 013.
3. *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.* arXiv e-prints. 2017; <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0403-3>.
4. *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.* // Space Sci. Rev. 2017. V. 212, Nos. 3–4. P. 1687–1703.
5. *Vaisala.* www.vaisala.com.
6. *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 Kien-*

- lin A., Kippen R. M., Kouveliotou Ch., McBreen Sh., Paciasas W. S., Preece R., Steinle H., Wallace M. S., Wilson R. B., Wilson-Hodge C. // Astrophys. J. 2009. V. 702. P. 791–804.*
7. *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., Sasseeen 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. // Astrophys. J. 2004. V. 611, No. 2. P. 791–804.*
 8. *Prechelt R., Wissel S., Romero-Wolf A. for the ANITA Collab. // Proc. of ICRC-2021 Conf. 2021. V. 395. P. 1110.*
 9. *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. // JGR: Atmospheres. 2021. V. 126, No. 11.*
 10. *Lindanger A., Skeie C. A., Marisaldi M., Børge-Engeland I., Østgaard N., Mezentsev A., Sarria D., Lehtinen N., Reglero V., Chanrion O., Neubert T. // JGR: Atmospheres. 2022. V. 127, No. 8.*
 11. *Inan U. S., Barrington-Leigh C., Hansen S., Glukhov V. S., Bell T. F., Rairden R. // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24, No. 5. P. 583–586.*
 12. *Skeie C. A., Østgaard N., Mezentsev A., Børge-Engeland I., Marisaldi M., Lehtinen N., Reglero V., Neubert T. // JGR: Atmospheres. 2022. V. 127, No. 17.*
 13. *Chilingarian A., Hovsepian G., Karapetyan T., Aslanyan D., Chilingaryan S., Sargsyan B. // Phys. Rev. D. 2023. V. 107, No. 10. P. 102003.*
 14. *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. // JGR: Atmospheres. 2019. V. 124, No. 24. P. 14024–14036.*