

Мультимодальные события ШАЛ с энергиями $10^{16} - 5 \times 10^{18}$ эВ по данным Corsika на уровне Тянь–Шаньской станции ФИАН

М. А. Самойлов,^{1,2,3*} А. М. Анохина^{1,2†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

³Физический институт им. П. Н. Лебедева
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53
(Поступила в редакцию 07.06.2024; подписана в печать 08.07.2024)

В различных экспериментах, где регистрируются Широкие Атмосферные Ливни (ШАЛ) сверхвысоких энергий, наблюдаются события ШАЛ с необычной, «мультимодальной» временной структурой: в детекторных пунктах установки регистрируется несколько импульсов, связанных с одним событием, разнесенных по времени на несколько сотен нс.

В настоящей работе продемонстрирована возможность мультимодальных событий в детекторных пунктах установки типа Горизонт-Т, расположенной на Тянь–Шаньской высокогорной станции ФИАН на высоте 3346 м над уровнем моря, на основе данных моделирования с помощью кода Corsika с использованием общеупотребительной модели ядерного взаимодействия QGSJETII-04. Для объяснения возникновения мультимодальных событий было предположено, что во временные ворота детектора попадает несколько частиц или групп частиц одного ШАЛ, разнесенных на значительное время, что приводит к образованию последовательности из нескольких импульсов. Данная гипотеза была успешно подтверждена при моделировании ШАЛ с энергиями от 10^{16} до 5×10^{18} эВ близких к вертикальным (до 30°) и сильно наклонных (от 30° до 70°).

PACS: 95.75.Pq

УДК: 53.04

Ключевые слова: ШАЛ, широкие атмосферные ливни, мультимодальные события, код Corsika.

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах, где изучаются космические лучи сверхвысоких энергий посредством регистрации Широких Атмосферных Ливней (ШАЛ), наблюдаются события ШАЛ с мультимодальной временной структурой: в детекторных пунктах установки, расположенных на расстояниях до 0.5 км, регистрируется несколько импульсов от одного ШАЛ, разнесенных по времени на несколько сотен нс [1, 7]. Подобные события на первый взгляд могут противоречить классическим представлениям о прохождении фронта частиц ШАЛ через детекторные модули установки.

В данной работе продемонстрирована возможность формирования мультимодальных импульсов от событий ШАЛ на примере прототипа установки Горизонт-Т [7], расположенной в горах Тянь–Шаня, на высоте 3346 м над уровнем моря без привлечения экзотических частиц и процессов, но при анализе данных ШАЛ, смоделированных с помощью широко используемого кода Corsika [8, 9].

Установка Горизонт-Т [7], регистрирующая частицы ШАЛ на высокогорной Тянь–Шаньской станции ФИАН, состоит из 13 регистрирующих пунктов, представляющих собой сцинтилляционные детек-

торы из пластин полистирола толщиной 5 см, площадью 1 м^2 . Сцинтилляционная вспышка регистрируется ФЭУ Hamamatsu R7723 или Hamamatsu H6527, что позволяет регистрировать частицы ШАЛ с наносекундным временным разрешением [10].

Установка была задумана для регистрации сильно наклонных ШАЛ с энергиями больше 10^{17} эВ. Детекторы эксперимента Горизонт-Т расположены на больших расстояниях (до 1000 м от центра установки) друг от друга и на значительно отличающихся (до 400 м) высотах. Площадь покрытия установки составляет около 2 км^2 .

В течение нескольких лет на установке регистрируются сигналы от ШАЛ с двухкомпонентной (а также многокомпонентной) структурой — мультимодальные импульсы. Высказывалось предположение, что подобные события могут быть связаны с ШАЛ, состоящими из двух и более равноправных ливневых дисков, и что такого рода необычную временную структуру ШАЛ невозможно объяснить в рамках стандартного механизма развития ядерно-электромагнитных каскадов [6]. В качестве одной из гипотез, объясняющей такие события, было предположено, что мультимодальные события могут быть результатом взаимодействия с ядрами атомов атмосферы некоторых гипотетических кварковых объектов, странглетов, которые могут рассматриваться в качестве кандидатов на роль частиц темной материи [6].

В настоящей работе для прототипа установки Горизонт-Т, состоящего из 7 детекторных пунктов

* samoilov.ma19@physics.msu.ru

† anokhannamsu@gmail.com

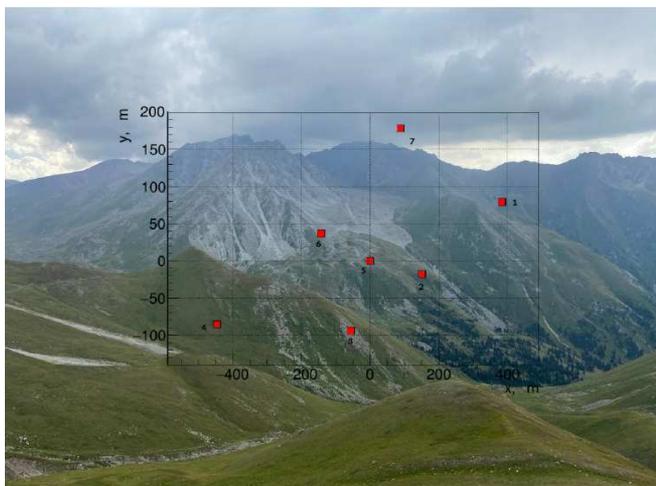


Рис. 1. Схема рассматриваемой системы детекторов на фоне горного массива Тянь-Шаня без привязки к конкретному расположению

каждый из которых имеет площадь 1 м^2 , расположенных на высотах 1 — 3379.0, 2 — 3358.0, 3 — 3350.0, 4 — 3327.0, 5 — 3307.0, 6 — 3252.0, 7 — 3125.0 м проанализирована возможность генерации мультимодальных событий с помощью широко используемого программного кода Corsika-77500 [11]. Расположение детекторов указано на рис. 1 на фоне горного массива.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование проводилось с помощью Corsika-77500 — программного комплекса, широко применяемого в физике космических лучей высоких энергий, позволяющего анализировать развитие ШАЛ в атмосфере для различных первичных частиц, энергий, углов наклона, высот и земных магнитных полей. На настоящем этапе в качестве модели ядерного взаимодействия выбрана QGSJETII-04.

В качестве модели детекторного пункта был задан слой пластикового сцинтиллятора (полистирол) размерами $1 \times 1 \text{ м}$, толщиной 5 см в соответствии с детектором установки Горизонт-Т, см. рис. 2.

Для оценки были смоделированы две группы ливней с различными углами наклона оси: $0\text{--}30^\circ$ — условно вертикальные, и $30\text{--}70^\circ$ — условно наклонные. В каждой группе первичной частицей был протон с 6 вариантами первичной энергии: 10^{16} эВ, 5×10^{16} эВ, 10^{17} эВ, 5×10^{17} эВ, 10^{18} эВ, 5×10^{18} эВ.

В результате моделирования для наборов индивидуальных ливней получены списки заряженных частиц с энергиями выше пороговых (300 МэВ) на высотах, соответствующих расположению детекторов в системе координат Corsika, связанной с осью ШАЛ. Величина порога в 300 МэВ задана для феноменологических оценок, которые являются предметом настоящего ис-



Рис. 2. Детектор одного из пунктов установки Горизонт-Т

следования. Работа, связанная с расчетами эффективности и пороговой энергии уже не прототипа, а реальной установки Горизонт-Т еще предстоит.

В рамках рассматриваемой задачи для частиц известны их тип, энергии, направляющие косинусы, координаты на уровне наблюдения и времена прихода на уровень наблюдения. Для оптимизации расчетов, наиболее полного использования полученных данных и увеличения статистики, детекторная система прототипа, изображенная на рис. 2, перемещалась параллельным переносом по плоской квадратной сетке со сторонами $400 \times 400 \text{ м}$ без изменения высоты с шагом в пять метров. Центр сетки соответствовал центру системы координат Corsika. В результате такого перемещения детекторной системы из каждого смоделированного ливня можно получить суммарную статистику для каждого детектора, соответствующую 6400 отдельных ливней с равномерно распределенными различными расположениями (по направлению и по расстоянию) осей ШАЛ относительно детектирующих модулей.

Вывод Corsika производится в бесформатный файл, из которого нужно с помощью созданной программы извлечь данные о частицах, попадающих в детекторы на 7 уровнях наблюдения с учетом времени прихода частицы в данный детектор.

С учетом будущих задач, связанных с калибровкой детекторов, и определением энергии ШАЛ по данным всех детекторных пунктов, частицы, полученные с помощью кода Corsika проводились через 5 см чувствительного вещества (полистирола) с помощью моделирующего комплекса GEANT4, рассчитывалось энерговыделение в слое детектора. На данном этапе задача моделирования сигнала в детекторе еще не решена комплексно и полностью. В дальнейшем планируется преобразование энерговыделения в сцинтилляционную вспышку, прослеживание сцинтилляционных фотонов в каждом из детекторов с учетом геометрии и отражающих свойств световодов, формирование сигнала от индивидуальных фотонов с учетом особенностей ФЭУ и электроники каждого из детекторных пунктов.

Для моделирования временной зависимости сигнала в детекторе (импульса), рассчитанное энерговыде-

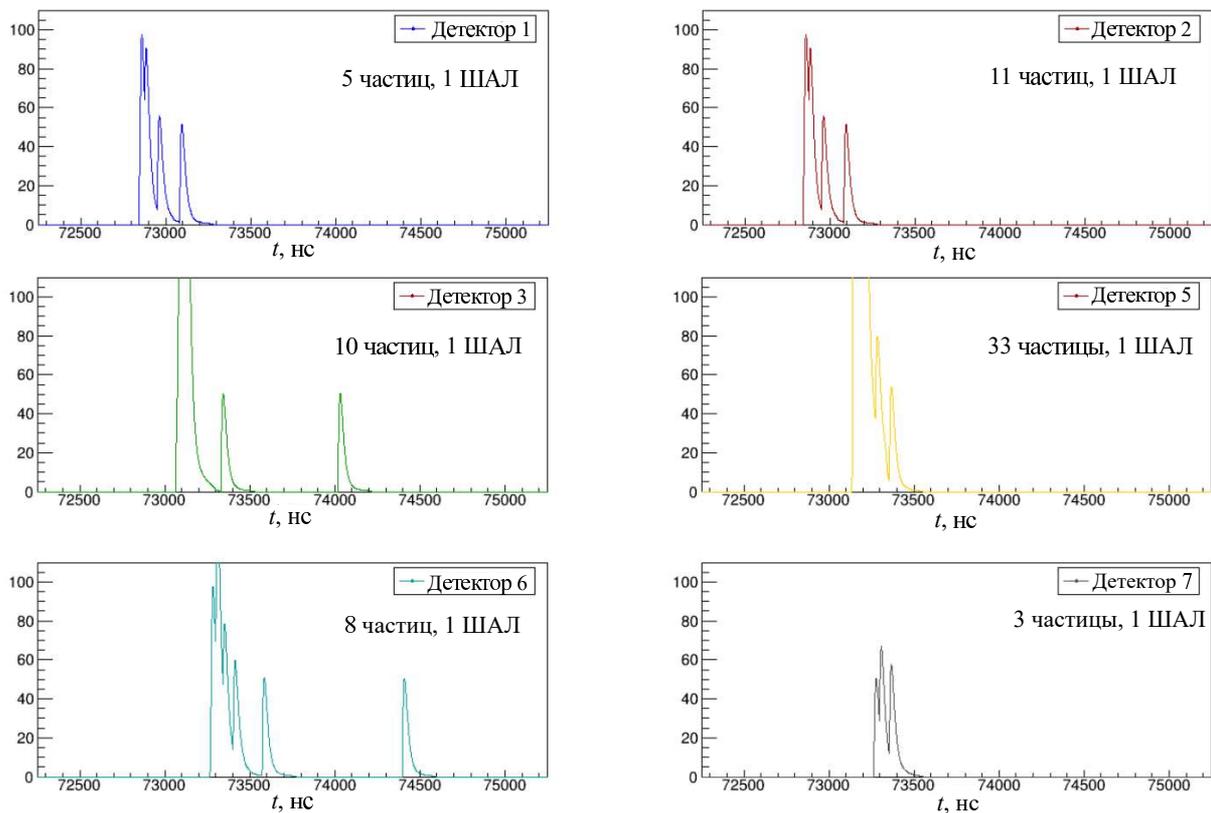


Рис. 3. Примеры временных разверток сигналов от вертикальных ШАЛ с энергией 10^{16} эВ в разных детекторных пунктах. Указано количество частиц одного из смоделированных ШАЛ, попавших в детекторный модуль

ление для каждой из частиц распределялось по характерной для полистирола временной развертке [12]. На рис. 3 показаны примеры таких смоделированных сигналов от частиц одного ливня, попавших в различные детекторные пункты. Как можно видеть, иногда сигнал от отдельных частиц может быть объединен в единый импульс большей амплитуды, в соответствии с суммарным энерговыделением от нескольких частиц, а иногда импульсы от отдельных частиц ливня могут отстоять друг от друга на сотни нс.

2. СТАТИСТИКА МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

В качестве результата моделирования для различных начальных энергий протонных ШАЛ были получены наборы частиц ливней, попавших в различные детекторные пункты во временные ворота 1000 нс. Примеры распределений по временным промежуткам Δt прихода частиц в детекторы на наибольшей и наименьшей высотах для близких к вертикальным и для сильно наклонных ливней, нормированные на один ШАЛ с энергиями 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} эВ, приведены на рис. 4–9. Для расчета величин Δt использовались данные Corsika о временах прихода частиц на уровень наблюдения в каждый из детекторных модулей площадью 1 м^2 .

Рассчитывается время между приходом в детектор первой и последующих частиц. Для ситуации, когда для данного ШАЛ и данного детекторного пункта в детектор попали только одна или ноль частиц, величина Δt не рассчитывалась и не анализировалась. Гистограммы нормировались на количество рассмотренных ШАЛ для различных расположений детекторов на каждом из уровней наблюдения, т.е. события с одной (или менее) частиц в детекторе учитываются в нормировке.

Основные выводы, которые можно сделать на основании приведенных распределений следующие: разброс времен прихода частиц одного ШАЛ в детектор достигает 1000 нс, что собственно и объясняет мультимодальность событий; с ростом начальной энергии ШАЛ на порядок, количество частиц в бине временной задержки также растет приблизительно на порядок, т.к. в той же пропорции растет количество частиц выше порога на уровне наблюдения; средняя задержка для сильно наклонных ливней существенно больше, чем для ливней, близких к вертикальным (на это обстоятельство обращается внимание в работах [1]–[7], описывающих мультимодальные эффекты); распределения по временным промежуткам между приходом частиц в детекторный пункт существенно различны для разных уровней наблюдения и для разных диапазонов углов ШАЛ.

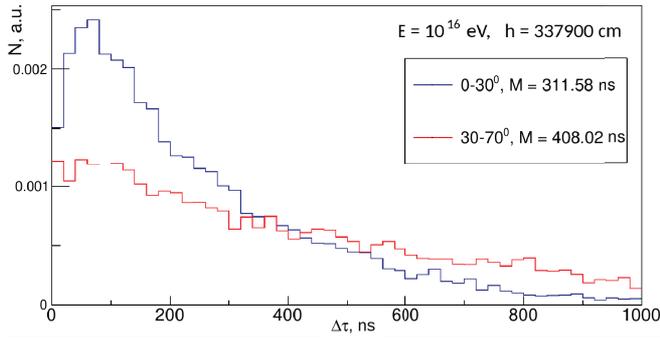


Рис. 4. Нормированное на одно событие количество частиц ШАЛ, попавших в детекторный пункт, во временной промежуток $\Delta\tau$. Начало отсчета соответствует времени прихода частиц на оси ливня на уровень наблюдения. ШАЛ близкие к вертикальным ($0^\circ \leq \Delta\theta < 30^\circ$) и наклонные ($30^\circ \leq \Delta\theta \leq 70^\circ$). Детектор 1, уровень — 337900 см, энергия ШАЛ — 10^{16} эВ

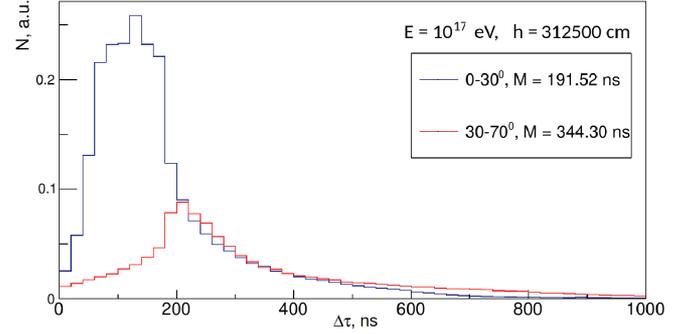


Рис. 7. То же, что и на рис. 4, детектор 7, уровень — 312500 см, энергия ШАЛ — 10^{17} эВ

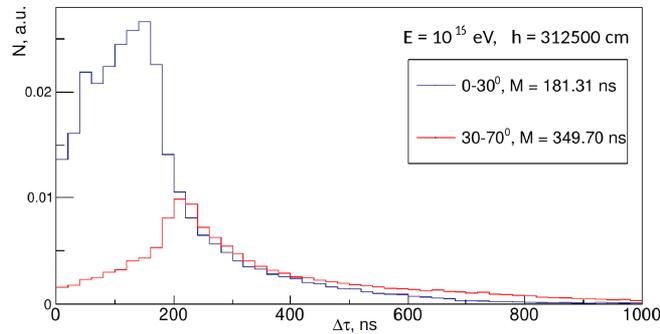


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, детектор 7, уровень — 312500 см, энергия ШАЛ — 10^{15} эВ

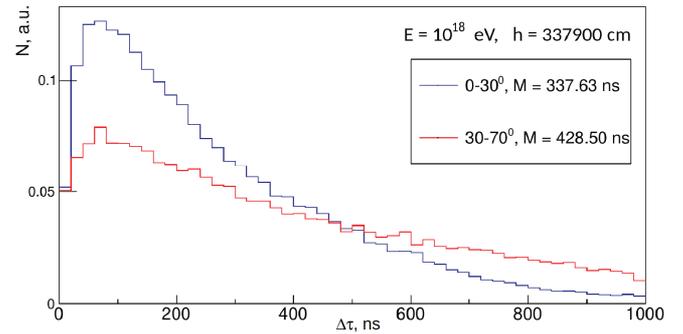


Рис. 8. То же, что и на рис. 4, детектор 1, уровень — 337900 см, энергия ШАЛ — 10^{18} эВ

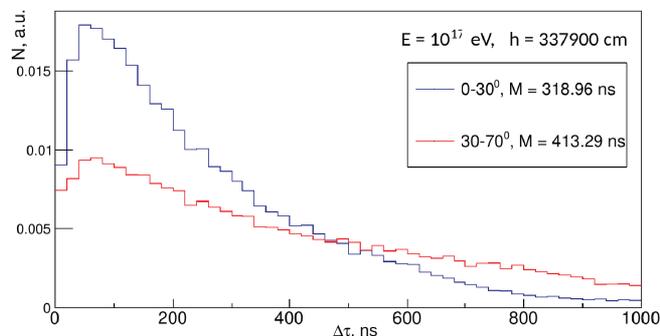


Рис. 6. То же, что и на рис. 4, детектор 1, уровень — 337900 см, энергия ШАЛ — 10^{17} эВ

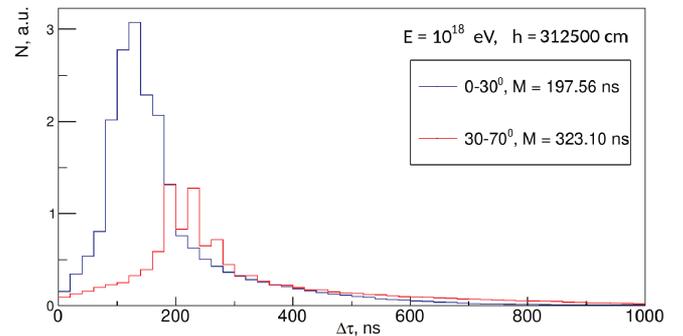


Рис. 9. То же, что и на рис. 4, детектор 7, уровень — 312500 см, энергия ШАЛ — 10^{18} эВ

Можно уточнить, что для приведенных гистограмм размер бина составляет 20 нс и при необходимости может быть уменьшен до минимального значения в 2 нс, составляющего временное разрешение ФЭУ.

Параметры временных распределений для начальных энергий ШАЛ от 10^{16} до 5×10^{18} эВ приведены в таблице. В качестве примера рассмотрен детектор-

ный пункт 1 (рис. 1), расположенный на максимальной высоте 3379.0 м над уровнем моря. Как уже указывалось выше, оси ливней распределялись равномерно по квадрату, с центром в детекторе 5 (см. рис. 1) со стороной 400 м с шагом 5 м. Средняя по распределению $\Delta\tau$ задержка (временной промежуток) между приходами отдельных частиц в детектор 1 обозначена величиной M . Интегральный сигнал в виде количества попавших в детекторный пункт частиц с энергиями больше 300 МэВ (в соответствии с выбранным порогом для Corsika) для временных ворот в 1000 нс, нормированный на один ШАЛ, обозначен величиной

Таблица. Характеристики событий ШАЛ в детекторном модуле площадью 1 м^2 на высоте 3379.00 м. Близкие к вертикальным ($0^\circ \leq \Delta\theta < 30^\circ$) и сильно наклонные ливни ($30^\circ \leq \Delta\theta \leq 70^\circ$)

	10^{16}	5×10^{16}	10^{17}	5×10^{17}	10^{18}	5×10^{18}
$0^\circ \leq \Delta\theta < 30^\circ$, М (ns)	311.58	309.37	318.96	324.67	337.63	322.96
$0^\circ \leq \Delta\theta < 30^\circ$, Σ (a.u.)	0.038	0.147	0.306	1.274	2.34	9.16
$30^\circ \leq \Delta\theta \leq 70^\circ$, М (ns)	408.02	418.87	413.29	424.02	428.50	406.52
$30^\circ \leq \Delta\theta \leq 70^\circ$, Σ (a.u.)	0.032	0.133	0.247	1.173	2.06	10.0

Σ . Данные, приведенные в таблице, объясняют тот факт, что с ростом энергии ШАЛ количество мультимодальных событий ШАЛ и количество отдельных импульсов в событии растет. Можно уточнить, что в соответствии с возможностями электроники, включая разрешающие временные свойства ФЭУ, как показано на рис. 3 одному импульсу (различной амплитуды) могут соответствовать и одиночные частицы ливня и группы частиц, которые согласно данным моделирования Corsika имеют неразличимые времена прихода в детекторный пункт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании моделирования близких к вертикальным и сильно наклонных ШАЛ от протонов сверхвысоких энергий (от 10^{16} до $5 \cdot 10^{18}$ эВ) с помощью кода Corsika с использованием модели ядерного взаимодействия QGSJETII-04 было показано, что на высотах около 3350 м над уровнем моря в детекторных пунктах прототипа установки типа Горизонт-Т площадью 1 м^2 можно наблюдать мультимодальные события. Временные промежутки между приходом отдельных частиц в детектор могут достигать 1000 нс. Средняя задержка

для частиц ШАЛ существенно больше для наклонных ливней и данный эффект значительнее для детекторов, расположенных на низших уровнях наблюдения.

Смоделированные «мультимодальные» события ШАЛ были получены с использованием общепотребительной модели ядерного взаимодействия (QGSJETII-04) без привлечения модели ШАЛ с экзотическими компонентами, несколькими равноправными дисками частиц и др.

На следующих этапах работы модельные данные будут более аккуратно по форме, амплитуде и временным характеристикам сравниваться с экспериментальными данными установки Горизонт-Т и делаться более детальные выводы о свойствах мультимодальных событий ШАЛ, регистрируемых на высокогорной станции ФИАН.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФИАН им. П.Н. Лебедева В.А. Рябову, С.Б. Шаулову, М.И. Вильдановой, Е.А. Бейсембаевой за предложенное направление исследования и полезные обсуждения.

[1] Sakuyama H., Suzuki N., Watanabe K. // *Nuovo Cimento A* **78**, 147 (1983).
 [2] Буднев Н.М., Вишневецкий Р., Гресс О.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. **73**, 627 (2009). (N. Budnev, R. Vishnevski, O. Gress et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **73**, 588 (2009)).
 [3] Бейсембаев Р.У., Вавилов Ю.Н., Вильданов Н.Г. и др. // *ЯФ* **72**, 1913 (2009). (R. Beisembaev, U. Vavilov, N. Vildanov et al. // *Phys. At. Nucl.* **72**, 1852 (2009)).
 [4] Яковлев В.И., Вильданова М.И., Вильданов Н.Г. // Письма в ЖЭТФ, **85**:2 111 (2007). (V. Yakovlev, M. Vildanova, N. Vildanov // *JETP Letters*, **85**:2 101 (2007))
 [5] Бейсембаев Р.У., Е.А. Бейсембаева, О.Д. Далькаров и др. // **82**, № 6. 495 (2019).
 [6] Beznosko D., Baigarin K., Beisembaev R. et al. // arXiv:2204.04045v4 [hep-ex] 1 May (2022).
 [7] Beisembaev R.U., Baigarin K.A., Beznosko D. et al. //

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, **A 1037** 166901 (2022).
 [8] Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. - 1998. FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE Technik und Umwelt Wissenschaftliche Berichte FZKA-6019.
 [9] Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers, <https://www.iap.kit.edu/corsika/70.php>
 [10] Yessenov M., Duspayev A., Beznosko D. et al. // arXiv:physics.ins-det/1703.07919. (2017).
 [11] Beisembaev R., Beznosko D., Beisembaeva E. et al. // *PoS (ICRC2019)* **195**. (2019).
 [12] Fast and simple glass-based charged particles detector with large linear detection range. JINST_001T_0617 v2. (2017).

Multimodal EAS events with energies $10^{16} - 5 \times 10^{18}$ eV according to Corsika data at the level of the Tien Shan station (3346 m)

M. A. Samoilo^{1,2,3,a}, A. M. Anokhina^{1,2,b},

¹ Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU)
Moscow 119991, Russia

³ Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI RAS)
Moscow 119991, Russia

E-mail: ^asamoilov.ma19@physics.msu.ru, ^banokhannamsu@gmail.com

In various experiments where Extensive Atmospheric Showers (EAS) are recorded, EASs with an unusual, «multimodal» temporal structure are observed - several pulses separated in time by several hundred ns are recorded at the installation detector modulators. In this work, the task was to demonstrate the possibility of multimodal events at the detector points of the Horizon-T installation, located at the Tien Shan high-mountain station of the Lebedev Physical Institute at an altitude of 3346 m above sea level without the involvement of exotic particles and processes. Simulation based on the commonly used Corsika code with nuclear interaction model QGSJET. It was assumed that several particles or groups of particles from one EAS, separated by a significant time, enter the detector's time gate, which leads to the formation of a sequence of several pulses. This hypothesis was successfully confirmed by modeling ultra-high energy EASs from 10^{16} to 5×10^{18} eV close to vertical (up to 30°) and highly inclined (from 30° up to 70°).

PACS: 95.75.Pq

Keywords: Extensive Air Showers, EAS, Tien Shan station, multimodal events, Corsika code.

Received 07 June 2024.

Сведения об авторах

1. Самойлов Михаил Александрович — студент; e-mail: samoilov.ma19@physics.msu.ru.
2. Анохина Анна Михайловна — канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: anokhannamsu@gmail.com.