Поиск широких атмосферных ливней с аномальной пространственно-временной структурой по данным установки Tunka-Grande

© А.Л. Иванова,[1,2] И.И. Астапов,[3] П.А. Безъязыков,[2] Е.А. Бонвеч,[4] А. Блинов,[5] А.Н. Бородин,[5] Н.М. Буднев,[2] А.В. Булан,[4] П.В. Бусыгин,[2] П.В. Волков,[6] П.А. Волчугов,[4,2] Д.М. Воронин,[7] А.Р. Гафаров,[2] А.Ю. Гармаш,[1,8] В.М. Гребенюк,[5,9] О.А. Гресь,[2] Т.И. Гресь,[2] Е.О. Гресь,[2] А.А. Гринюк,[5] О.Г. Гришин,[2] А.Н. Дячок,[2] В.А. Ерофеева,[2] Д.П. Журов,[2] А.В. Загородников,[2] В. Зиракашвили,[10] А.Д. Иванова,[2,11] М.А. Илюшин,[2] И.А. Кабанник,[1] Н.Н. Калмыков,[4] В.В. Киндин,[3] С.Н. Кирюхин,[2] В.А. Кожин,[4] Р.П. Кокоулин,[3] К.Г. Компаниец,[3] Е.Е. Коростелева,[4] Е.А. Кравченко,[1,8] А.П. Крюков,[4] Л.А. Кузьмичев,[4] А. Кьявасса,[12] М.В. Лаврова,[5] А.А. Лагутин,[6] Ю.Е. Лемешев,[2] Б.К. Лубсандоржиев,[7] Н.Б. Лубсандоржиев,[2,4] А. Луканов,[7] С.Д. Малахов,[2] Р.Р. Миргазов,[2] Р.Д. Монхоев,[1,2] Э.А. Окунева,[2,4] Э.А. Осипова,[4] А. Пан,[5] А.Д. Панов,[4] Л.В. Паньков,[2] А.Л. Пахоруков,[2] А.А. Петрухин,[3] Д.А. Подгрудков,[4] И. Поддубный,[2] Е.Г. Попова,[4] Е.Б. Постников,[4] В.В. Просин,[4] А.А. Пушнин,[2] Р.И. Райкин,[6] А.В. Разумов,[2,4] Г.И. Рубцов,[7] Е.В. Рябов,[2] А.К. Сагдеева,[2] И. Сатышев,[5] В.С. Самолига,[2] Л.Г. Свешникова,[4] А.Ю. Сидоренков,[7] А.А. Силаев,[4] А.А. Силаев (мл.),[4] А.В. Скурихин,[4] А.В. Соколов,[1,8] В.А. Таболенко,[2] А.Б. Танаев,[2] М.Ю. Терновой,[2] Л.Г. Ткачев,[5,9] Н.А. Ушаков,[7] Д.В. Чернов,[4] А.. Шайковский,[5] И.И. Яшин[3]

[1] Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
[2] Иркутский государственный университет,
664003 Иркутск, Россия
[3] Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
105043 Москва, Россия
[4] Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия
[5] Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская обл., Россия
[6] Алтайский государственный университет,
656049 Барнаул, Россия
[7] Институт ядерных исследований РАН,
117312 Москва, Россия
[8] Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[9] Государственный университет „Дубна“,
141982 Дубна, Московская обл., Россия
[10] Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
142191 Троицк, Москва, Россия
[11] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия
[12] Dipartimento di Fisica Generale Universiteta di Torino and INFN,
Torino, Italy
e-mail: annaiv.86@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 27 апреля 2024 г.
Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Изучена пространственно-временная структура широких атмосферных ливней по данным сцинтилляционной установки Tunka-Grande. Представлены результаты анализа временных разверток сигналов от широких атмосферных ливней с энергией выше 10 PeV.

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни, установка Tunka-Grande, многоимпульсный сигнал.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59243.339-24

Введение

Одним из актуальных направлений исследований на установках для регистрации компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ) является изучение событий со сложной пространственно-временной структурой [1–4]. Интерес связан с поиском ШАЛ с несколькими фронтами, отстоящими друг от друга на десятки и сотни

наносекунд, а также с поиском частиц, запаздывающих относительно фронта ливня, либо опережающих его [3]. Поиск подобных событий ведется путем исследования формы сигналов ШАЛ, зарегистрированных в детекторах установки.

В 2023 г. был начат поиск ШАЛ со сложной структурой по данным сцинтилляционной установки Tunka-Grande. Установка Tunka-Grande представляет собой 19 станций наблюдения, распределенных на площади 0.5 km^2. Каждая станция включает в себя наземный детектор заряженной компоненты ШАЛ общей площадью $\sim 8\,\mathrm{m}^2$ и подземный мюонный детектор общей площадью $\sim 5\,\mathrm{m}^2$. Подробное описание установки Tunka-Grande представлено в [5]. Ниже приведены результаты анализа данных, набранных за ~ 360 h работы установки.

1. Сигналы ШАЛ со сложной структурой по данным Tunka-Grande

За ~ 360 h работы сцинтилляционная установка Tunka-Grande зарегистрировала порядка 72 100 событий, в которых в каждой половине трех и более наземных детекторов наблюдались сигналы с амплитудой, превышающей уровень 0.5 амплитуды от одной частицы. В большинстве случаев зарегистрированные импульсы имели стандартную форму с одним пиком, ровным нарастанием и спадом фронта (рис. 1). Однако наблюдались и импульсы „многомодальной“ формы, имеющие двух- и многопиковую структуру (рис. 1). Также были обнаружены многоимпульсные сигналы, когда на временной развертке кроме импульса ШАЛ наблюдались отдельные запаздывающие или опережающие импульсы (рис. 1). При этом основные импульсы ШАЛ и запаздывающие импульсы встречались как стандартной, так и „многомодальной“ формы.

В качестве основных гипотез, объясняющих наличие многопиковых структур на временных развертках сигналов, зарегистрированных в детекторах Tunka-Grande, были выдвинуты следующие: 1) „многомодальные“ импульсы отражают пространственно-временную структуру ШАЛ и связаны с ростом толщины ливневого диска с увеличением расстояния от оси ШАЛ; 2) опережающие импульсы в многоимпульсных сигналах вызваны одиночными атмосферными мюонами, попавшими в детекторы несколько раньше частиц ШАЛ; 3) вклады в запаздывающие импульсы в многоимпульсных сигналах дают послеимпульсы ФЭУ, одиночные мюоны и запаздывающие частицы ШАЛ.

2. Временные и амплитудные распределения сигналов

Для анализа были отобраны $\sim 26\,500$ временных разверток сигналов в наземных детекторах установки, где кроме основного импульса ШАЛ с амплитудой не менее 0.5 от уровня одной частицы имелись дополнительные импульсы, удовлетворяющие аналогичному условию на амплитуду. В подземных детекторах было обнаружено ~ 3400 подобных сигналов.

Длина развертки позволяла наблюдать временное распределение сигнала в интервале $5\,\mu$s. Основной импульс ШАЛ в наземных детекторах наблюдался с задержкой $1.5\,\mu$s относительно начала записи. Из-за временных задержек, связанных с подлетом мюонов к подземным детекторам и передачей сигналов по кабелям большей длины, импульсы от мюонов ШАЛ, зарегистрированные в подземных детекторах, в среднем запаздывали относительно импульсов заряженных частиц ШАЛ в наземных детекторах на время порядка 35 ns.

На рис. 2 представлены амплитудные и временные распределения импульсов в многоимпульсных сигналах, зарегистрированных в наземных детекторах. Опережающие импульсы составляют около 3% от общего числа дополнительных импульсов и распределены равномерно от начала записи временной развертки до основного импульса ШАЛ (рис. 2, *a*). В большинстве случаев запаздывающие импульсы смещены относительно основных импульсов ШАЛ на ~ 300 ns (рис. 2, *a*). Наиболее вероятное значение амплитуды основных импульсов ШАЛ и опережающих импульсов соответствует амплитуде импульса от одной частицы (рис. 2, *b*).

Аналогичная картина наблюдается и в подземных детекторах.

3. Обсуждение природы „многомодальных“ импульсов и многоимпульсных сигналов ШАЛ

На рис. 3, *a* показано интегральное распределение $\sim 72\,100$ зарегистрированных ШАЛ в зависимости от числа сработавших станций, в которых в наземном детекторе наблюдались „многомодальные“ импульсы/многоимпульсные сигналы (диаграмма светло-серого цвета), либо только многоимпульсные сигналы (темно-серая диаграмма).

Анализ статистики по отдельным станциям показал, что в наземных детекторах опережающие импульсы наблюдаются в среднем в $\sim 0.29\%$ случаев, в подземных в $\sim 0.05\%$ случаев. Запаздывающие импульсы наблюдаются в наземных детекторах в $\sim 9.89\%$ случаев, в подземных — в $\sim 1.55\%$ случаев. Зная темп счета одиночных атмосферных мюонов, можно вычислить вероятность попадания ШАЛ и одиночного мюона в детектор в пределах временного окна $1.5\,\mu$s для опережающих импульсов и 3.5 ns для запаздывающих. Расчеты показали, что в первом случае (опережающие импульсы) попадание одиночного мюона и частиц ШАЛ в наземный детектор должно наблюдаться в $\sim 0.3\%$ событий, в подземный — в $\sim 0.09\%$ событий. Во втором случае (запаздывающие импульсы) в наземный в $\sim 0.63\%$ случаев, в подземный — в $\sim 0.21\%$ случаев. Можно заключить, что близкий по времени прилет одиночных мюонов и частиц

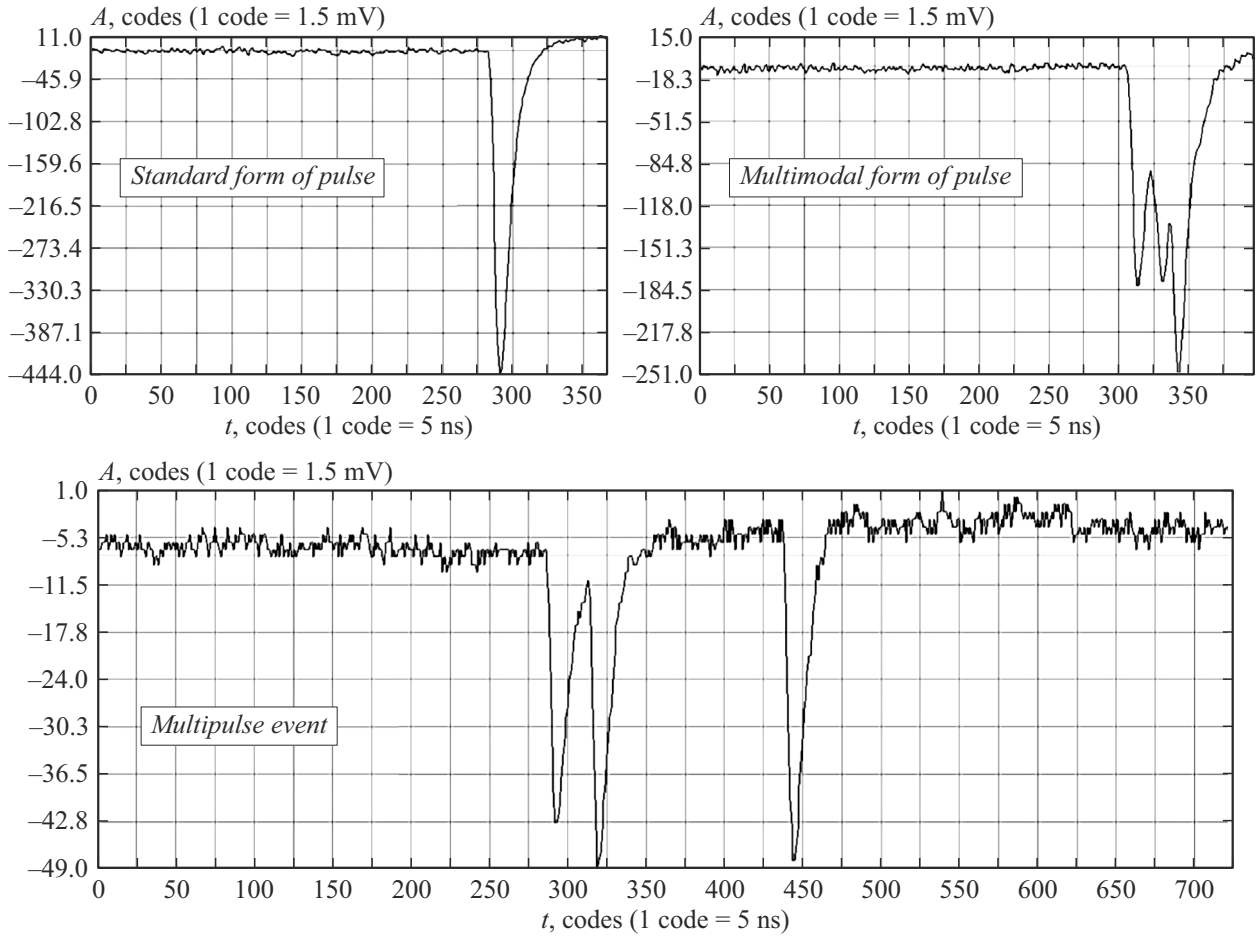


Рис. 1. Формы сигналов в экспериментальных данных (time code = 5 ns, amplitude code = 1.5 mV).

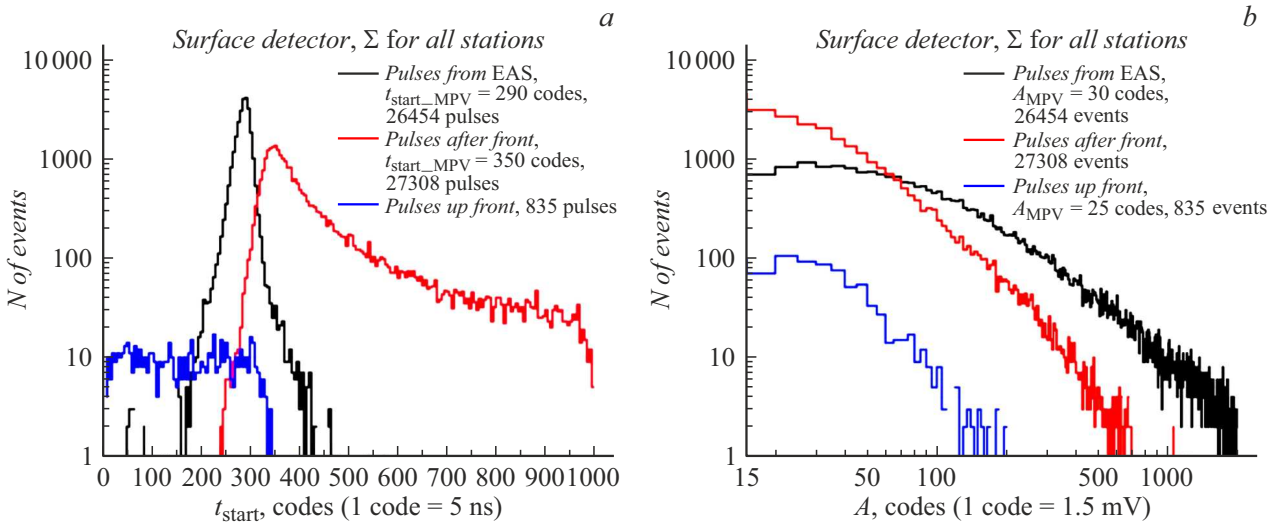


Рис. 2. Распределение импульсов в наземных детекторах: *a* — в зависимости от времени начала импульса, *b* — по амплитуде. Амплитуда импульса от одной частицы $A_1 = 30$ codes, графики демонстрируют распределения импульсов с амплитудой не менее $A_{\text{threshold}} = 0.5A_1$.

ШАЛ в детектор позволяет объяснить опережающие импульсы, но подобных событий недостаточно, чтобы обеспечить наблюдаемую статистику по запаздывающим импульсам.

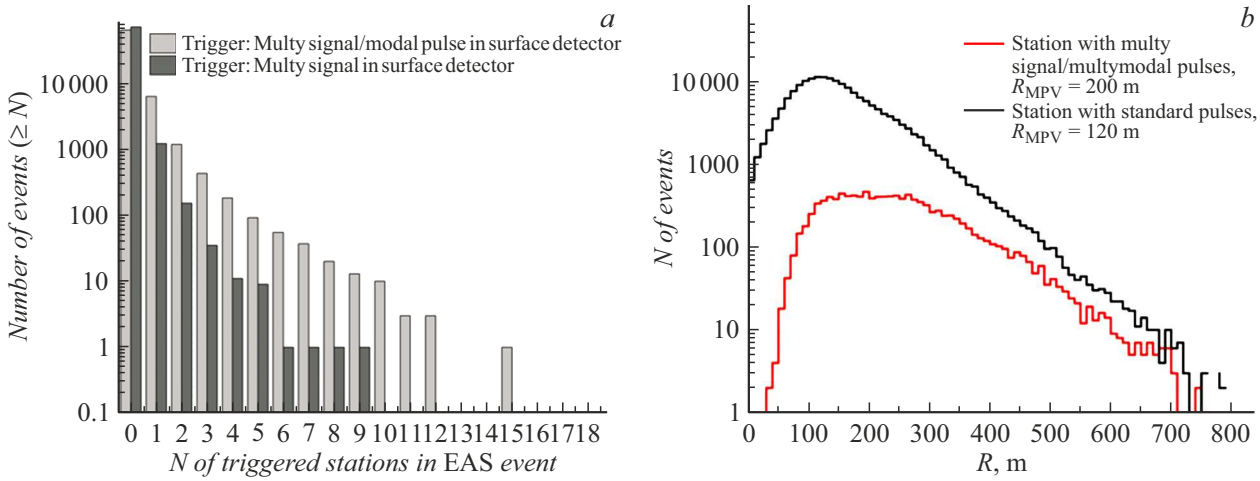


Рис. 3. *a* — распределение событий ШАЛ в зависимости от числа сработавших станций с многоимпульсными сигналами и „многомодальными“ импульсами в наземной части; *b* — распределение сработавших станций в зависимости от расстояния до оси ШАЛ.

Предположение, что запаздывающие импульсы являются после-импульсами ФЭУ не может объяснить обнаруженную зависимость наличия запаздывающих импульсов в станции от ее положения относительно оси ШАЛ. Из рис. 3, *b* видно, что „многомодальные“ импульсы и многоимпульсные сигналы ШАЛ наиболее вероятно наблюдались в станциях, оказавшихся на расстояниях 200 m и более от оси ливня. Можно заключить, что импульсы ШАЛ „многомодальной“ формы и запаздывающие импульсы связаны с пространственно-временной структурой ШАЛ и отражают рост толщины ливневого диска с ростом расстояния от оси ШАЛ.

Заключение

Форма „многомодальных“ импульсов отражает особенности распространения частиц на больших расстояниях от оси ливня. Времена запаздывания частиц относительно переднего фронта ШАЛ растут с увеличением расстояния от оси ливня. В случае если детектор расположен на расстоянии 200 m и более от оси ШАЛ, попадающие в него запаздывающие частицы дают дополнительные пики в регистрируемом сигнале.

Обнаруженные на временных развертках опережающие импульсы вызваны одиночными атмосферными мюонами, попавшими в детектор вместе с частицами ШАЛ. Это подтверждается согласующимися результатами расчетов и эксперимента. Однозначного объяснения природы запаздывающих импульсов нет. Полагаем, что кроме после-импульсов ФЭУ и одиночных мюонов значительный вклад в них вносят запаздывающие частицы ШАЛ. Вопрос природы запаздывающих импульсов остается открытым и требует дальнейшего изучения.

Финансирование работы

Работа выполнена на базе УНУ „Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ“. Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 23-72-00016 (раздел 3), 23-72-00054 (раздел 4)) и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2024-0005, FZZE-2023-0004, FSUS-2022-0015).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Г.К. Гарипов. *Поиск особенностей ШАЛ при регистрации запаздывающих частиц и мюонов на установке ШАЛ МГУ* (ВМУ, 2022) сер. 3, № 1, с. 80–89.
[2] R. Beisembaev, D. Beznosko, E. Beisembaeva, O.D. Dalkarov, V. Mossunov, V. Ryabov, S. Shaulov, M. Vildanova, V. Zhukov, K. Baigarin, T. Sadykov. PoS (ICRC2019), **358**, 195 (2019). DOI: 10.22323/1.358.0195
[3] Г.К. Гарипов, А.А. Силаев. Ядерная физика, **83** (3), 235 (2020).
[4] R. Mayta, Y. Tsunesada, S. Ogio. For the Telescope Array Collaboration. PoS (ICRC2019), **358**, 347 (2019). DOI: 10.22323/1.358.0347
[5] Р.Д. Монхоев. Письма в ЭЧАЯ, **20** (5 (250)), 1117 (2023).