

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. Пушкин,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. Яшин³

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 атмо-

сферных 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 $\sim 8 \text{ m}^2$ и подземный мюонный детектор общей площадью $\sim 5 \text{ m}^2$. Подробное описание установки Tunka-Grande представлено в [5]. Ниже приведены результаты анализа данных, набранных за $\sim 360 \text{ h}$ работы установки.

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

За $\sim 360 \text{ h}$ 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 послепериодические 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 $5 \mu\text{s}$. Основным импульсом ШАЛ в наземных детекторах наблюдался с задержкой $1.5 \mu\text{s}$ 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, а). В большинстве случаев запаздывающие импульсы смещены относительно основных импульсов ШАЛ на $\sim 300 \text{ ns}$ (рис. 2, а). Наиболее вероятное значение амплитуды основных импульсов ШАЛ и опережающих импульсов соответствует амплитуде импульса от одной частицы (рис. 2, б).

Аналогичная картина наблюдается и в подземных детекторах.

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

На рис. 3, а 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 $1.5 \mu\text{s}$ 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

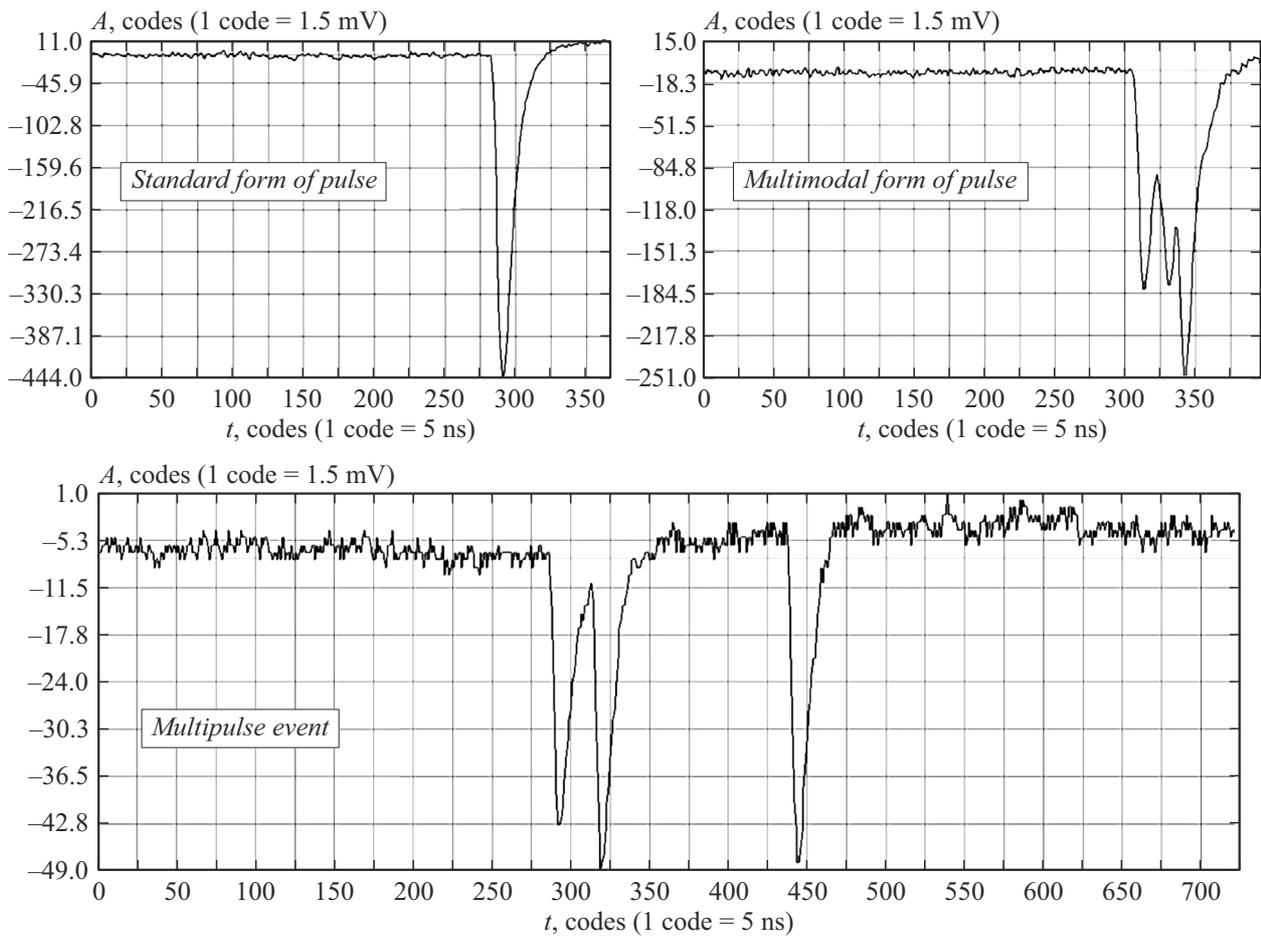


Рис. 1. Формы сигналов в экспериментальных данных (time code = 5 ns, amplitude code = 1.5 mV).

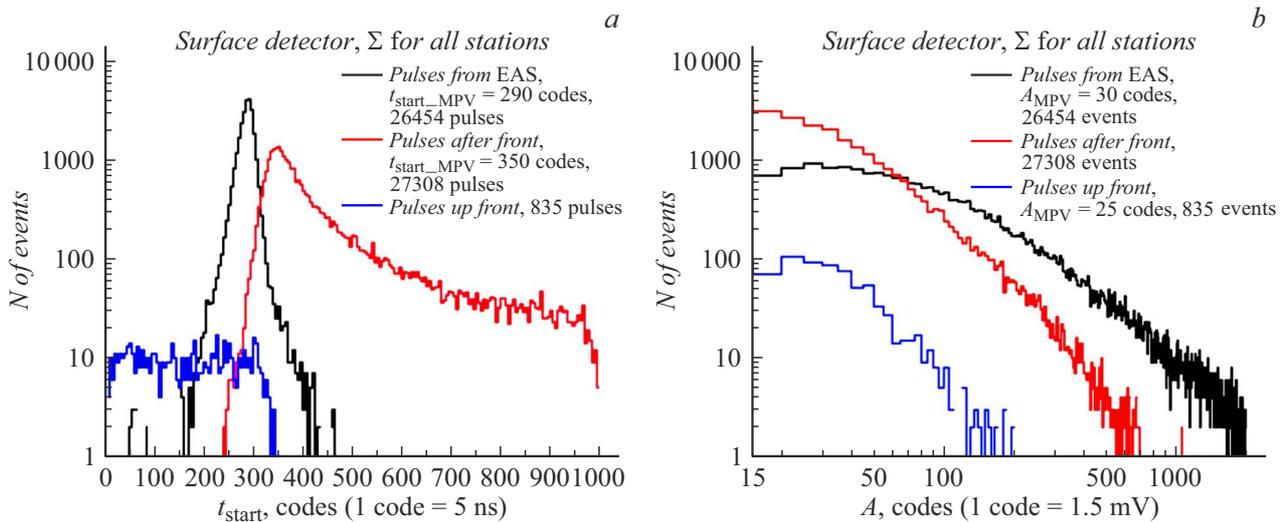


Рис. 2. Распределение импульсов в наземных детекторах: a — в зависимости от времени начала импульса, b — по амплитуде. Амплитуда импульса от одной частицы $A_1 = 30$ codes, графики демонстрируют распределения импульсов с амплитудой не менее $A_{threshold} = 0.5A_1$.

ШАЛ в детектор позволяет объяснить опережающие импульсы, но подобных событий недостаточно, чтобы

обеспечить наблюдаемую статистику по запаздывающим импульсам.

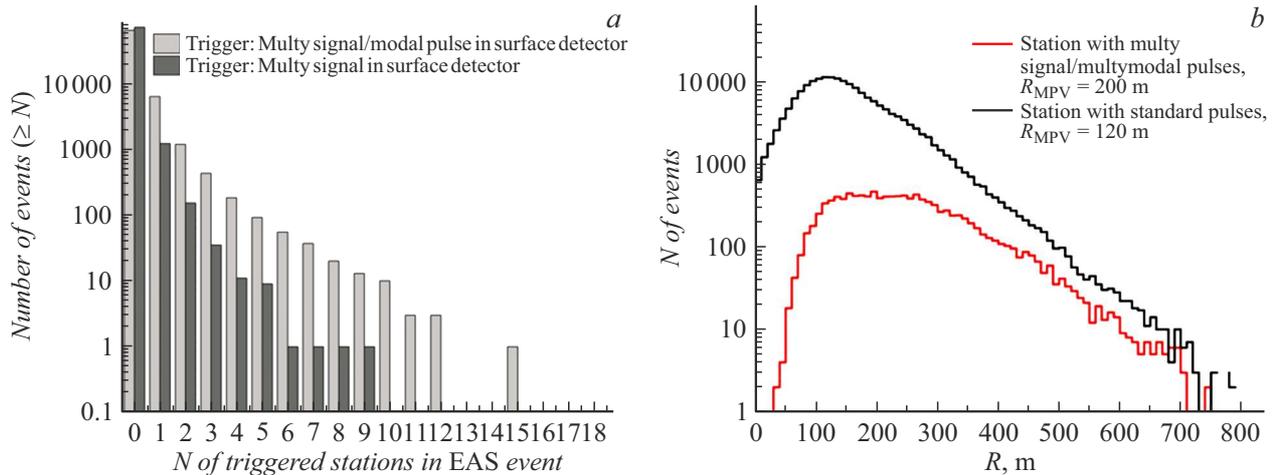


Рис. 3. *a* — распределение событий ШАЛ в зависимости от числа сработавших станций с многоимпульсными сигналами и „многомодальными“ импульсами в наземной части; *b* — распределение сработавших станций в зависимости от расстояния до оси ШАЛ.

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 м 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 м 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).