

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

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

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет,  
664003 Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,  
105043 Москва, Россия

<sup>4</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,  
119991 Москва, Россия

<sup>5</sup> Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская обл., Россия

<sup>6</sup> Алтайский государственный университет,  
656049 Барнаул, Россия

<sup>7</sup> Институт ядерных исследований РАН,  
117312 Москва, Россия

<sup>8</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>9</sup> Государственный университет „Дубна“,  
141982 Дубна, Московская обл., Россия

<sup>10</sup> Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
142191 Троицк, Москва, Россия

<sup>11</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия

<sup>12</sup> 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  $0.5 \text{ km}^2$ . 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  $\sim 3400$  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  $3.5 \text{ ns}$  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

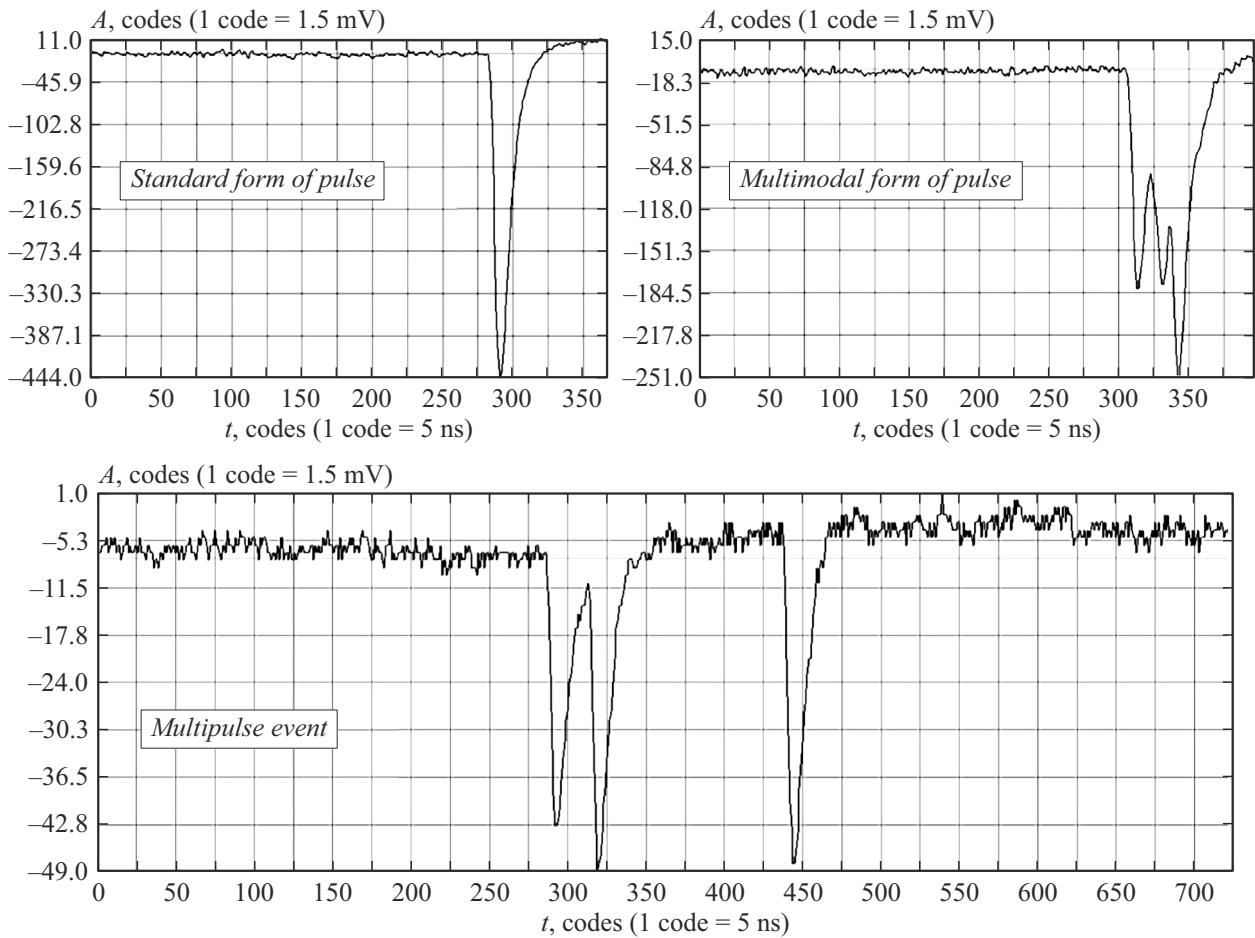


Рис. 1. Формы сигналов в экспериментальных данных (time code = 5 ns, amplitude code = 1.5 mV).

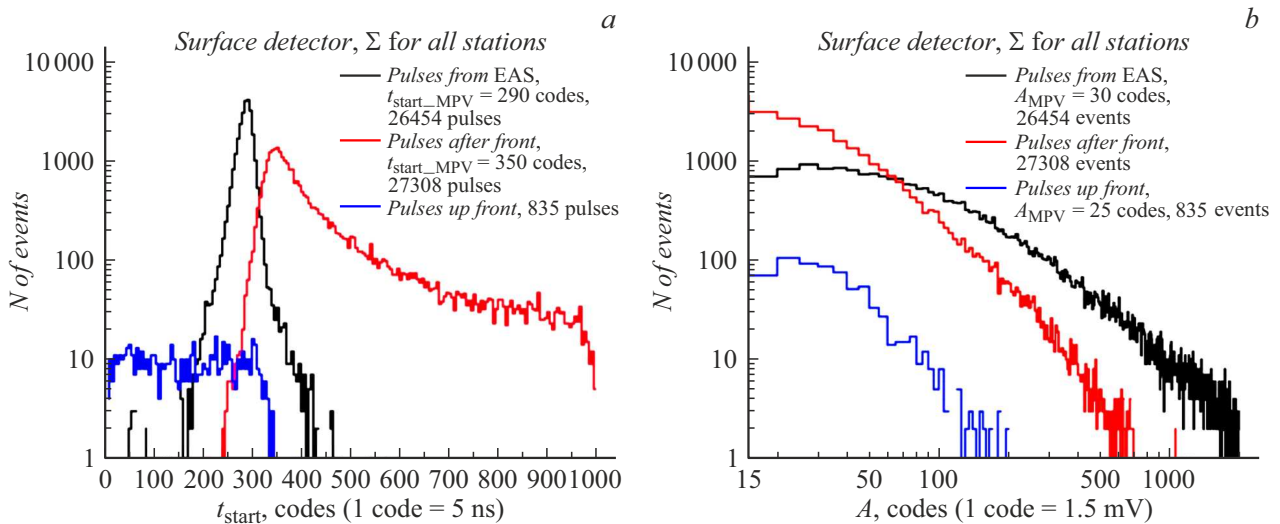
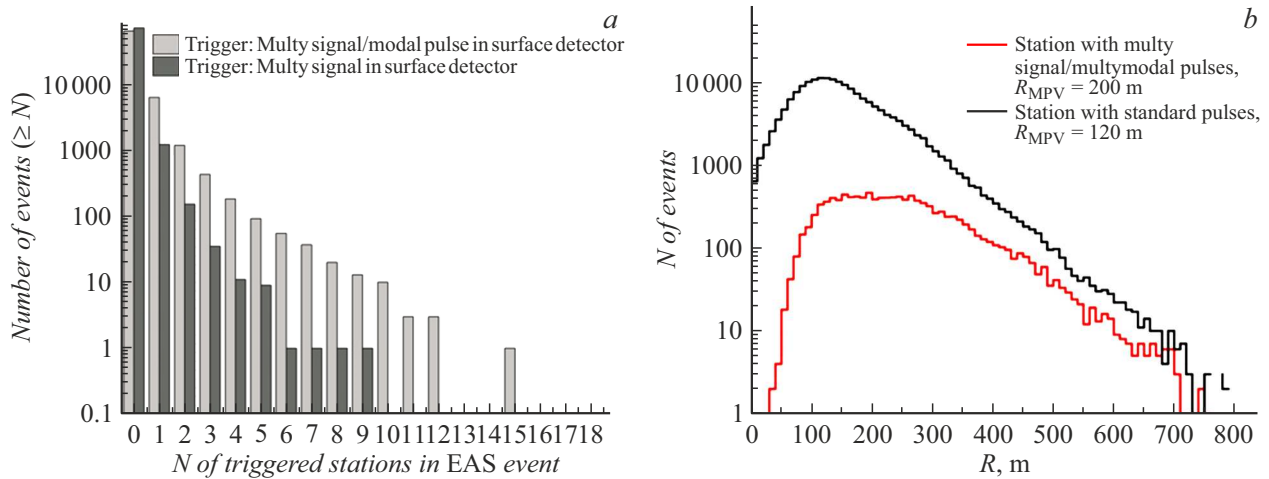


Рис. 2. Распределение импульсов в наземных детекторах:  $a$  — в зависимости от времени начала импульса,  $b$  — по амплитуде. Амплитуда импульса от одной частицы  $A_1 = 30$  codes, графики демонстрируют распределения импульсов с амплитудой не менее  $A_{threshold} = 0.5A_1$ .

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).