ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 8, с. 1173–1176

УДК 537:591.15

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ЧАСТИЦ И МЮОНОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ НА УСТАНОВКЕ ШАЛ МГУ

© 2021 г. Г. К. Гарипов*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

**E-mail: ggkmsu@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.
После доработки 12.03.2021 г.
Принята к публикации 28.04.2021 г.

На установке ШАЛ МГУ изучались временные распределения частиц в широких атмосферных ливнях, в которых образуется от 10^4 до 10^8 частиц. В 3.5% событий были зарегистрированы запаздывающие частицы, а в 60% событий – мюоны. Обсуждается, что запаздывающие частицы образуются выше, чем мюоны и электроны. Число частиц в широких атмосферных ливнях, в которых наблюдаются запаздывающие частицы, больше, чем в ливнях с мюонами.

DOI: 10.31857/S0367676521080081

ВВЕДЕНИЕ

Частицы широких атмосферных ливней (ШАЛ), в основном электроны и мюоны, образуются в атмосфере и движутся компактной группой в виде диска частиц со скоростью близкой к скорости света. Толщина диска на расстояниях менее 200 м от оси не превышает нескольких метров, а временные интервалы между частицами ливня не превышают десятков нс. Если возникают тяжелые долгоживущие частицы, то такие частицы отстают от диска ШАЛ из-за большой массы, сигналы от которых могут быть обнаружены при изучении временных распределений частиц, образующихся в ШАЛ. С увеличением расстояния до оси ливня, уменьшается плотность частиц и увеличивается время прихода частиц на уровень наблюдения, т.е. фронт частиц имеет кривизну. Чем выше область возникновения частиц в атмосфере, тем меньше кривизна фронта. Целью исследований временных распределений являются изучение процессов при взаимодействиях космических лучей высоких энергий и поиск новых тяжелых долгоживущих частиц.

ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ В ШАЛ

Исследования временных распределений частиц проводились с помощью сконструированной осциллографической установки, сконструированного из центрального неэкранированного сцинтилляционного детектора площадью 4 м^2, состоящего из четырех частей площадью 1 м^2, и детектора площадью 5 м^2, экранированного слоем грунта толщиной, соответствующей 20 метрам водного эквивалента. Детекторы располагались в центре установки ШАЛ МГУ. Сигналы с детекторов регистрировались с помощью двулучевого аналогового осциллографа. Длительность развертки осциллографа составила около 500 нс. Осциллограф запускался при совпадении сигналов, поступающих с четырех равных частей центрального неэкранированного детектора. Осциллограммы сигналов фотографировались с экрана электроннолучевой трубки при совпадении сигнала запуска осциллографа и сигнала срабатывания установки ШАЛ МГУ. Одновременно с осциллограммой с экрана цифрового дисплея, фотографировались дата, время и номер ливня. Для изучения корреляций временных распределений частиц в диске ШАЛ использовался дополнительный неэкранированный сцинтилляционный детектор площадью 4 м^2, расположенный на расстоянии 22.5 м от центра установки ШАЛ МГУ.

СТАТИСТИКА ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

В рассматриваемом эксперименте за 1000 ч наблюдений на установке ШАЛ МГУ с помощью ос-

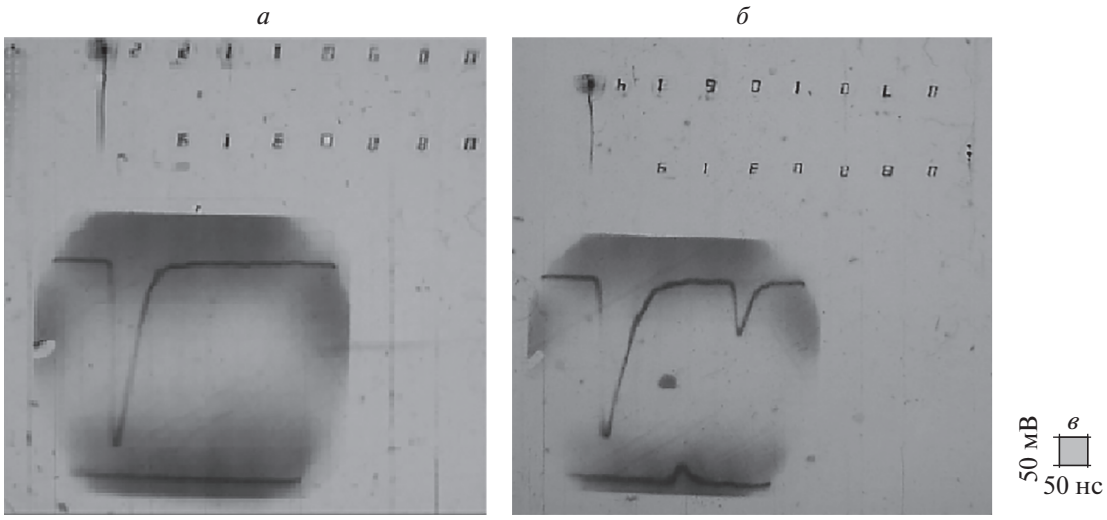

Рис. 1. Примеры осциллограмм временных распределений частиц в диске ШАЛ. Верхняя кривая – сигнал с неэкранированного детектора, нижняя кривая – сигнал с экранированного детектора. Пример осциллограммы сигналов типичного ШАЛ. Число частиц $Ne \approx 2.1 \cdot 10^5$, расстояние до оси $R \approx 35$ м, число частиц, соответствующих сигналу сцинтилляционного детектора, $n \approx 39$ (*а*). Пример осциллограммы ШАЛ, в котором зарегистрирована запаздывающая частица. Первый импульс – сигнал от частиц диска ШАЛ, второй импульс, сигнал, от запаздывающей частицы, следующей за диском ШАЛ. Параметры ШАЛ: $Ne = 1.1 \cdot 10^5$, $R = 61$ м, $n = 34$, ионизационные потери от запаздывающей частицы соответствуют 15 релятивистским частицам. Время задержки относительно фронта частиц ШАЛ около 300 нс. На нижней развертке представлен пример регистрации мюона с помощью экранированного сцинтилляционного детектора (*б*). Масштаб шкалы осциллографа (*в*).

циллографической установки было зарегистрировано около 35000 осциллограмм временных распределений частиц в ШАЛ. Наблюдения проводились с 1986 по 1990 годы сеансами по несколько сотен часов ежегодно. Осциллограф запускался примерно 4 раза в мин. Осциллограмма с экрана электроннолучевой трубки фотографировалась примерно один раз в 3 мин. За время наблюдений примерно в 1200 случаях запаздывающие частицы были зарегистрированы с помощью центрального неэкранированного детектора, время запаздывания их превышало 100 нс. Среди этих ШАЛ наблюдалось 110 случаев, когда в тех же событиях запаздывающие частицы регистрировались в центральном неэкранированным детекторе, и в дополнительном неэкранированном детекторе. При этом примерно в 21 000 осциллограмм были зарегистрированы мюоны с помощью экранированного детектора.

Более подробно описание установки ШАЛ МГУ приведено в [1, 2]. Основные свойства задержанных частиц, зарегистрированных на этой установке, представлены в работе [3, 4], основные свойства запаздывающих частиц на уровне гор представлены в работах [5, 6]. Свойства запаздывающих частиц на расстояниях более 1 км от оси представлены в [7].

На рис. 1 приведены примеры осциллограмм регистрации временных распределений частиц в типичных ШАЛ (без запаздывающих частиц) (*а*) и ШАЛ, в которых наблюдались запаздывающие частицы (*б*).

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ ОТ ЧИСЛА ЧАСТИЦ В ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЯХ

На рис. 2 показана вероятность регистрации ШАЛ в зависимости от числа частиц Ne. На рис. 2*а* сравниваются две выборки: для типичных ШАЛ и для ШАЛ, в которых зарегистрированы мюоны, а на рис. 2*б* – типичные ШАЛ и ШАЛ, в которых есть задержанные частицы.

Из рис. 2*а* и 2*б* видно, что вероятность регистрации ШАЛ с мюонами больше, чем типичных ШАЛ (в которых не зарегистрированы мюоны) при числе частиц $Ne = 10^5–10^6$. Вероятность регистрации ШАЛ с запаздывающими частицами оказывается больше, чем типичных ШАЛ, в диапазоне числа частиц $Ne = 10^6–10^7$. При этом, в интервалах, отмеченных буквами α и β, вероятность регистрации отличаются более чем на 5σ. В диапазоне числа частиц $Ne = 10^4–10^5$ вероятность регистрации событий с мюонами и запаздывающими частицами меньше, чем в типичных ШАЛ.

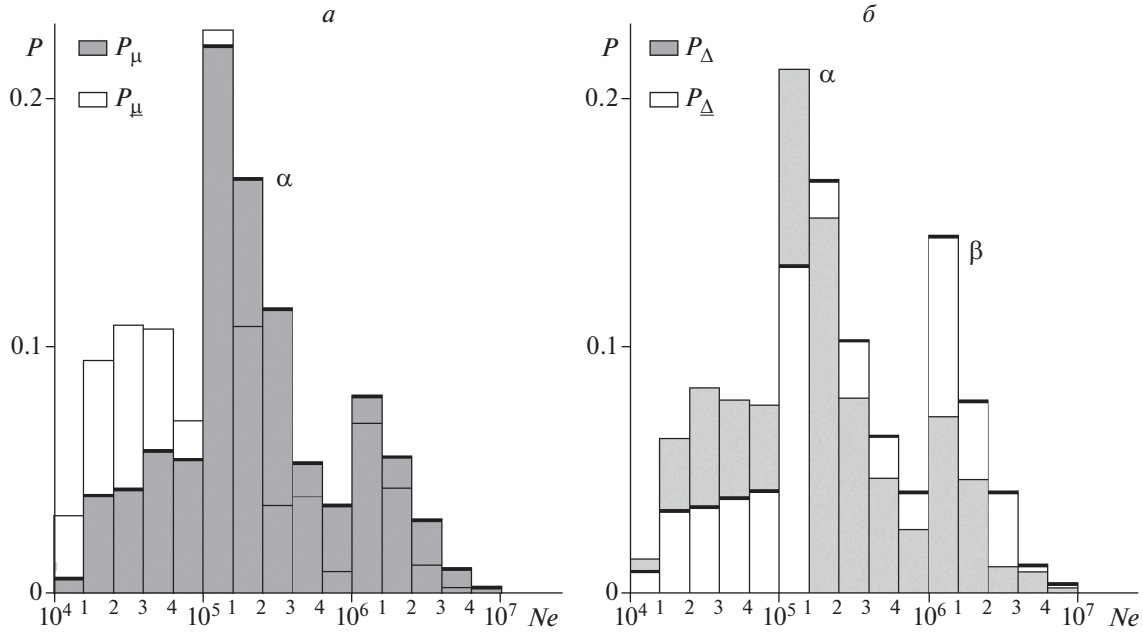

Рис. 2. Вероятность регистрации ШАЛ в зависимости от числа частиц *Ne* в ШАЛ: для типичных ШАЛ, в которых не зарегистрированы мюоны (тонкие линии); для ШАЛ, в которых зарегистрированы мюоны (жирные линии) (*а*); вероятность регистрации ШАЛ в зависимости от числа частиц *Ne*: в типичных ШАЛ (тонкие линии); и в ШАЛ, в которых есть задержанные частицы (жирные линии) (*б*).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные распределения вероятности регистрации типичных ШАЛ, ШАЛ с мюонами и ШАЛ с запаздывающими частицами в зависимости от *Ne* можно объяснить, если исходить из того, что вероятность регистрации задержанных частиц не зависит от расстояния до оси ШАЛ, а вероятность зарегистрировать мюоны зависит. Иными словами, функция пространственного распределения (ФПР) мюонов более узкая, чем ФПР запаздывающих частиц, откуда следует, что высота возникновения запаздывающих частиц находится выше, чем высоты возникновения основной части мюонов в ШАЛ. Вместе с тем, среднее время запаздывания на расстояниях менее 200 м не зависит от расстояния до оси ШАЛ и составляет около 115 ± 10 нс, что соответствует плоскому фронту и, следовательно, большой высоте возникновения запаздывающих частиц. При этом распределения по возрасту ШАЛ, в которых зарегистрированы запаздывающие частицы, и типовых ШАЛ с точностью до статистических ошибок совпадают, что соответствует тому, что высота возникновения ШАЛ, в которых зарегистрированы запаздывающие частицы, совпадает с высотой возникновения типовых ШАЛ. Из этого также следует, что запаздывающие частицы заметно не влияют на развитие ливня и возникают на больших высотах, чем основная часть электронов и мюонов как в типовых ШАЛ, так и в ШАЛ, в которых регистрируются запаздывающие частицы и мюоны.

Автор выражает благодарность своим коллегам за помощь в создании и эксплуатации осциллографической установки, обработке и обсуждении полученных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вернов С.Н., Христиансен Г.Б., Атрашкевич В.Б. и др.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 9. С. 1822.
2. *Atrashkevich V.B., Chernykh R.I., Fomin Yu.A. et al.* // Proc. 20th ICRC. (Moscow, 1987). V. 6. P. 63.
3. *Khristiansen G.B., Atrashkevich V.B., Chernykh R.I. et al.* // Proc. 21th ICRC. (Adelaida, 1990). V. 9. P. 150.
4. *Гарипов Г.К., Силаев А.А.* // Яд. физ. 2020. Т. 83. № 3. С. 235.
5. *Яковлев В.И., Вильданова М.И., Вильданов Н.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85. № 2. С. 111.
6. *Бейсембаев Р.У., Вавилов Ю.Н., Вильданов Н.Г. и др.* // Яд. физ. 2009. Т. 72. № 11. С. 1913.
7. *Linsley J.* // Proc. 19th ICRC. (La Jolla, 1985). V. 7. P. 355.

Some features of extensive air showers in the study of muons and delayed particles observed at the MSU EAS array

G. K. Garipov*

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

**e-mail: ggkmsu@yandex.ru*

At the MSU EAS array, have been studied the temporal distributions of particles in extensive air showers in which from 10^4 to 10^8 particles are formed. Delayed particles were recorded in 3.5% events, and muons were recorded in 60% events. It is shown that delayed particles are formed at higher altitudes than muons and electrons, and the number of particles in extensive air showers in cases where delayed particles were observed is recorded significantly more particles than in cases of the observations of muons.