

## ПОИСК ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ И ОПЕРЕЖАЮЩИХ ЧАСТИЦ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С АТМОСФЕРОЙ В ПОТОКЕ МЮОНОВ ШАЛ НА УСТАНОВКЕ ШАЛ МГУ

© 2020 г. Г. К. Гарипов<sup>1)\*</sup>, А. А. Силаев<sup>1)</sup>

Поступила в редакцию 05.08.2019 г.; после доработки 23.09.2019 г.; принята к публикации 23.09.2019 г.

Приводятся результаты изучения временных распределений частиц с энергией более 5 ГэВ в широких атмосферных ливнях с энергиями, превышающими  $10^{15}$  эВ, на расстояниях менее 200 м от оси ШАЛ с целью поиска запаздывающих и опережающих новых частиц, которые могут возникать при взаимодействиях первичных космических лучей с атмосферой, на установке ШАЛ МГУ. Исследования проводились с помощью неэкранированного детектора, расположенного на поверхности земли, и подземного детектора, экранированного слоем грунта, эквивалентного 20 м водного столба. Показано, что запаздывающие частицы, имеющие время задержки в интервале от 100 до 300 нс со спадающим по экспоненте законом временного распределения с показателем, равным 120 нс, обладают большей ионизационной способностью, чем релятивистские мюоны. Поток таких частиц ослабляется слоем грунта, разделяющим детекторы, примерно в 30 раз. Отмечено, что частицы, движущиеся впереди диска ШАЛ, в настоящей работе не обнаружены. Обсуждаются свойства задержанных частиц. Рассмотрены особенности калибровок и вспомогательных экспериментов, подтверждающие данные измерений.

DOI: 10.31857/S0044002720020105

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованиям временных распределений частиц, возникающих в ШАЛ, вызывается тем, что взаимодействия частиц происходят при сверхвысоких энергиях, вследствие которых могут рождаться новые частицы.

Частицы ШАЛ образуют диск частиц, в основном электронов и мюонов, скорость которого близка к скорости света.

Если в результате взаимодействия первичной космической частицы с атмосферой рождаются частицы, скорость которых будет меньше скорости света, то такие частицы, а также продукты их взаимодействия с атмосферой придут на уровень наблюдения с задержкой по времени относительно частиц диска ШАЛ.

В случае, если при взаимодействии появится частица, способная двигаться со скоростью, превышающей скорость света, то из-за высокой скорости продукты ее взаимодействия с атмосферой придут на уровень наблюдения раньше, чем частицы ШАЛ.

Частицы ШАЛ движутся компактной группой, в виде диска, толщина которого в районе оси составляет несколько метров, а разброс времен прихода между частицами такой группы не превышает нескольких наносекунд. Таким образом, с помощью современной аппаратуры с наносекундным временным разрешением на малых расстояниях до оси ШАЛ можно выделить сигналы от запаздывающих и опережающих частиц, время отклонения которых от момента прихода частиц диска ШАЛ превышает несколько наносекунд.

На практике задача существенно усложняется, поскольку, кроме отмеченных выше релятивистских электронов и мюонов, в обычных ШАЛ образуются в относительно небольших количествах и нерелятивистские протоны, нейтроны, электроны и мюоны, скорость которых значительно меньше скорости света. Частицы нерелятивистских энергий отстают от основных частиц диска ШАЛ и имеют повышенную ионизацию в пластике детектора из-за своей низкой скорости. Сигналы от таких частиц в сцинтилляционном детекторе, которые в основном используются для изучения временных распределений частиц, не различаются ни по амплитуде, ни по длительности, ни по времени задержки времени прихода на уровень наблюдения относительно диска ШАЛ. В силу отмеченных при-

<sup>1)</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия.

\*E-mail: ggkmsu@yandex.ru

чин, несмотря на многочисленные экспериментальные работы, непротиворечивого ответа о природе задержанных частиц не получено.

Действительно, по поводу таких частиц высказываются самые противоречивые суждения [1–8].

Например, в работе [2] исследовались временные распределения частиц в ШАЛ при регистрации осциллограмм сигналов с неэкранированного сцинтилляционного детектора. На некоторых осциллограммах наблюдались сигналы, время запаздывания которых превышало ожидаемое время прихода частиц диска ШАЛ. Авторами этой работы было высказано предположение, что задержанные сигналы можно объяснить существованием гипотетических тяжелых частиц, которые рождаются при взаимодействии космических лучей с воздухом. Скорость таких частиц меньше скорости света из-за большой массы, вследствие чего эти частицы либо продукты их взаимодействия с атмосферой достигают поверхности земли с задержкой относительно более легких релятивистских частиц, образующих ливневой диск.

Но есть и другие мнения, так, например, в работе [3] измерялись временные интервалы между сигналами, поступающими с сцинтилляционных детекторов, находящихся в различных слоях адронного калориметра при регистрации ШАЛ. В этой работе также наблюдались запаздывающие сигналы, которые, по мнению авторов этой работы, можно объяснить тем, что в эксперименте были зарегистрированы нерелятивистские адроны, в основном протоны и нейтроны малых энергий. Такие частицы рождаются в атмосфере и отстают от фронта ШАЛ из-за своей скорости, а в сцинтилляционном детекторе вызывают сигналы, похожие на ожидаемые сигналы от новых частиц. Основная задача настоящей работы — выявить свойства сигналов от запаздывающих частиц, которые отличаются от свойств частиц, образующих обычные ШАЛ.

Интересно отметить, что при изучении запаздывающих частиц на установке ШАЛ МГУ с помощью неэкранированного сцинтилляционного детектора были получены также противоположные выводы. Так, в работе [4] сделано предположение, что ливень запаздывающих частиц вызван первичной тяжелой частицей, возникшей при взаимодействии первичных космических лучей с атмосферой. А в работе [5], выполненной несколько позже, делается противоположное заключение и утверждается, что задержанные сигналы можно объяснить флуктуацией числа нерелятивистских адронов, достигающих уровня наблюдения, скорость которых меньше скорости диска ШАЛ.

Тем не менее, в более поздней работе [6], выполненной в ФИАН, подтвердились выводы работы [4] о том, что задержанные сигналы вызваны частицами, возникшими при взаимодействии частиц

сверхвысоких энергий с атмосферой, в результате которого возникает ливень запаздывающих частиц, отстающих от диска ШАЛ. В этой работе высказываются два предложения о природе возникновения ливня задержанных частиц. Согласно первому они могут образовываться множеством малоэнергичных адронов, возникших при освобождении кварк-глюонной плазмы. Согласно второму — вследствие возникновения тахиона при первом взаимодействии космических лучей с атмосферой.

Предположение возникновения в первом взаимодействии одиночной тяжелой частицы, которая может инициировать ливень задержанных частиц, авторами этой работы отрицается.

Как видно из приведенных примеров, несмотря на то что исследования временной структуры частиц в ШАЛ проводятся на протяжении нескольких десятилетий, существуют прямо противоположные мнения о природе запаздывающих частиц, что, главным образом, определяется недостатком экспериментальных данных, полученных при изучении космических лучей, и данных, полученных на ускорителях, а также теоретические работы, способствующие выработке однозначного суждения. Поэтому для выбора правильного ответа требуются дальнейшие исследования с применением более совершенных методик, например, методика эксперимента должна исключать влияние нерелятивистских протонов и нейтронов малых энергий, возникающих в ШАЛ, на данные наблюдений.

Отметим также, что в одной из наиболее ранних работ, выполненной на установке Вулкано Ренч, изучались осциллограммы сигналов сцинтилляционного детектора на расстояниях более 1 км от оси ШАЛ [7]. В этой работе также указывается, что задержанные сигналы, вызванные частицами, отстающими на микросекунды от частиц, образующих диск ШАЛ, можно объяснить тривиально медленными нейтронами, но амплитуда импульса их сигналов в детекторе противоречит такому объяснению. До настоящего времени однозначного ответа на этот вопрос не существует. Из этой работы также следует, что полученных амплитудно-временных данных измерений сигналов в сцинтилляционном детекторе недостаточно для окончательных выводов.

Таким образом, несмотря на многолетние исследования, до настоящего времени отсутствуют экспериментальные данные, позволяющие сделать выбор в пользу одного из рассматриваемых предположений или, по крайней мере, исключить возможную имитацию сигналов запаздывающих новых частиц нерелятивистскими протонами и нейтронами, образующимися в ШАЛ.

В России в разные годы подобные исследования проводились на установке ШАЛ МГУ, расположенной на уровне моря, и сотрудниками ФИАН на

Тянь-Шане на высоте гор. Исследования проводились с помощью детекторов, расположенных как на поверхности земли, так и с помощью детекторов, расположенных под слоем грунта. На Тянь-Шане для регистрации сигналов с помощью неэкранированного детектора [6] использовались цифровые осциллографы, а для исследования временных распределений частиц с помощью экранированного детектора — цифровые измерители временных интервалов [8]. На установке ШАЛ МГУ в этой работе для синхронной регистрации сигналов с экранированного и неэкранированного детекторов, установленных в центре установки, использовался двухлучевой аналоговый запоминающий осциллограф, кроме того, с целью повышения временного разрешения для изучения временных распределений мюонов в диске ШАЛ временные интервалы между мюонами регистрировались с помощью цифровых измерителей временных интервалов [1]. Достоинством цифрового метода является то, что временные интервалы измеряются между фронтами импульсов сигналов от частиц, попавших в детектор, что позволяет достичь максимального временного разрешения в измерениях.

Отметим, что временное распределение запаздывающих проникающих частиц, полученное в работе [8] на высоте гор, совпадает с временным распределением частиц для неэкранированного детектора, полученным в работе [1] на уровне моря. Это указывает на то, что временное распределение запаздывающих частиц не зависит от высоты максимума числа частиц в ШАЛ от детектора.

Тем не менее, преимущество регистрации сигналов от опережающих и запаздывающих частиц с помощью осциллографа объясняется тем, что регистрируется осциллограмма сигнала, что позволяет в исследуемом временном интервале отличать полезные сигналы от импульсов, вызванных помехами. В цифровых измерителях временных интервалов сигналы не распознаются по форме импульса. В этом случае временные интервалы измеряются не только для сигналов, вызванных частицами с заданными параметрами, но и для шумовых сигналов, включая импульсы, вызванные флуктуациями тока ФЭУ или электромагнитными помехами. При этом возникают ложные временные интервалы, имитирующие регистрацию запаздывающих и опережающих частиц, особенно в случае, если частота возникновения шумовых импульсов сравнима с частотой реальных событий. Что является источником неопределенности. Кроме этого, при таких методах происходит преобразование сигналов в цифровой код за время более длительное, чем интервал измерения, что повышает вероятность нарушения логики управления цифровой электроники при случайном следовании сигналов, поступающих с детектора, время появления которых не совпадает с импульсами синхронизации

опорного генератора преобразователя временных интервалов.

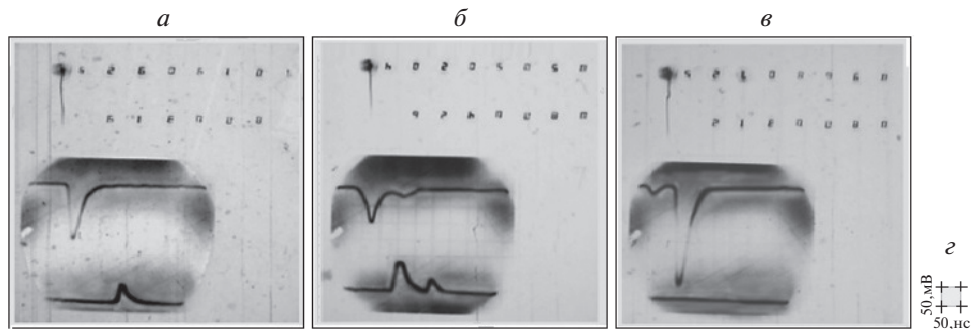
В отмеченных выше работах, исходя из данных измерений, также не получалось экспериментально исключить имитацию запаздывающих частиц нерелятивистскими протонами и нейтронами, возникающими в ШАЛ, хотя данные математического моделирования эксперимента позволяли утверждать, что, по крайней мере, регистрация нерелятивистских нейтронов и протонов маловероятна [9].

Основным достоинством данной работы является то, что распределение времен прихода частиц изучалось одновременно с помощью неэкранированного детектора, расположенного на поверхности земли, и детектора, экранированного слоем грунта, синхронно с помощью двухлучевого аналогового осциллографа в реальном времени. В этом случае развертки осциллографа запускались одновременно, что позволило улучшить точность временных измерений и уменьшить уровень шума, характерного для цифровой электроники при регистрации сигналов, возникающих случайно во времени.

Также отметим, что в этом эксперименте опережающих частиц не обнаружено, поэтому в настоящей работе, в основном, рассматриваются сигналы в сцинтилляционном детекторе, вызванные задержанными частицами, но приведено описание аппаратуры, которая позволяла регистрировать как задержанные, так и опережающие частицы.

#### СТАТИСТИКА ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СОБЫТИЙ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗАДЕРЖАННЫХ ЧАСТИЦ

В рассматриваемом эксперименте за 1000 ч наблюдений на установке ШАЛ МГУ было зарегистрировано около  $35 \times 10^3$  осциллограмм ШАЛ с энергией более  $10^{15}$  эВ, в которых регистрировались временные распределения частиц в ШАЛ. Наблюдения проводились с 1986 г. по 1990 г. сеансами по несколько сотен часов ежегодно, в основном в ночное время. При этом в  $1.2 \times 10^3$  случаях запаздывающие частицы наблюдались с помощью неэкранированного детектора (вероятность наблюдения  $P_{\Delta 1} = 1.2 \times 10^3 / 35 \times 10^3 \approx 0.034$  в случае, если вероятность не зависит от особенностей ШАЛ), а в 36 случаях наблюдались проникающие запаздывающие частицы с помощью экранированного детектора, энергия которых превышала 5 ГэВ (вероятность наблюдения  $P_{\Delta 2} = 36 / 35 \times 10^3 \approx 0.001$ ). При этом в пяти случаях запаздывающие частицы наблюдались одновременно и в неэкранированном, и в экранированном детекторе во временном интервале длительностью 300 нс (вероятность наблюдения  $P_{\Delta 2} = 5 / 35 \times 10^3 \approx 1.4 \times 10^{-4}$ ). Отметим, что в работах [4]



**Рис. 1.** Примеры регистрации осциллограмм сигналов временных распределений, в основном электронов (верхний луч) и мюонов (нижний луч) на расстояниях менее 200 м от оси ШАЛ: *a* — пример регистрации сигнала от обычного ШАЛ с параметрами  $R = 20$ ,  $n_e = 29$ ,  $N_e = 6.9 \times 10^4$ ; *б* — пример регистрации задержанных сигналов незранированным детектором и детектором, расположенным под слоем грунта в ШАЛ, с параметрами  $R \approx 30$ ,  $n_e \approx 23$ ,  $N_e \approx 4.6 \times 10^4$ , первый импульс на развертке — сигнал от частиц диска ШАЛ, второй импульс на развертке — сигнал от задержанной частицы; *в* — пример регистрации сигнала от частицы фона космических лучей, попавшей в незранированный детектор перед ШАЛ с параметрами  $R \approx 15$ ,  $n_e \approx 40$ ,  $N_e \approx 1.1 \times 10^5$ ; *з* — шкала экрана осциллографа по вертикали и горизонтали.

и [5] для этих же ШАЛ наблюдалось  $1.1 \times 10^2$  случаев, когда в том же временном интервале запаздывающие частицы одновременно с незранированным детектором регистрировались и в дополнительном детекторе с площадью, также равной  $4 \text{ м}^2$ , установленном на поверхности земли на расстоянии  $22.5 \text{ м}$  от центра установки ШАЛ МГУ. Также отметим, что в этих работах была измерена средняя амплитуда сигнала от запаздывающих частиц в детекторе, которая превышала амплитуду от одного релятивистского мюона примерно в 1.7 раза. Скорость счета одиночных частиц фона космических лучей экранированного и незранированных детекторов составляла около  $800 \text{ Гц}$ , при этом ожидается, что число случайных попаданий этих частиц при регистрации ШАЛ за время измерений не превышает семи случаев. Вероятность наблюдения в одном ШАЛ задержанных частиц с помощью незранированного и экранированного детекторов  $P_{\Delta 1} \times P_{\Delta 2} = 0.34 \times 10^{-4}$ . Вероятность наблюдения этих сигналов в случае их возникновения из-за фона космических лучей составит  $(7/35 \times 10^3)^2 \approx 0.4 \times 10^{-7}$ . Интересно также отметить, что исходя из статистики наблюдения задержанных частиц с помощью двух незранированных детекторов, можно оценить и вероятность появления ШАЛ, в которых можно наблюдать задержанные частицы. Действительно, пусть вероятность попадания задержанной частицы в один детектор равна  $P_{\Delta}$ , а вероятность появления ШАЛ, в которых возникают задержанные частицы, —  $P_{EAS}$ . Тогда вероятность зарегистрировать с помощью установки ШАЛ задержанные частицы одним детектором равна  $P_{\Delta} \times P_{EAS}$ , вероятность в этом же ШАЛ зарегистрировать задержанную частицу с помощью дополнительного детектора равна  $P_{\Delta}^2 \times P_{EAS}$ . Подставляя приведенные вы-

ше цифры в эти соотношения, получим:  $P_{\Delta} \times P_{EAS} = 1.2 \times 10^3 / 35 \times 10^3 = 3.4 \times 10^{-2}$ ;  $P_{\Delta}^2 \times P_{EAS} = 1.1 \times 10^2 / 35 \times 10^3 = 3.1 \times 10^{-3}$ , решая эту систему уравнений, получим  $P_{\Delta} = 0.034 / 3.1 \times 10^{-3} = 1.1 \times 10^{-3}$ ,  $P_{EAS} \approx 1.1 \times 10^{-3} / 0.034 = 0.3$ . Таким образом, видно, что примерно в 30% ливней, зарегистрированных установкой ШАЛ МГУ, возникали задержанные частицы.

#### ПРИМЕРЫ ОСЦИЛЛОГРАММ СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ДЕТЕКТОРОМ

Как уже отмечалось, в настоящей работе с целью исключения имитации сигналов запаздывающих частиц нерелятивистскими протонами и нейтронами, а также электронами и мюонами малых энергий, образующихся в ШАЛ, амплитудные и временные распределения частиц изучались с помощью экранированного сцинтилляционного детектора площадью  $5 \text{ м}^2$ , расположенного под слоем грунта эквивалентного  $20 \text{ м}$  водяного столба.

Также синхронно с сигналами этого детектора в тех же временных интервалах регистрировались сигналы с помощью незранированного сцинтилляционного детектора площадью  $4 \text{ м}^2$ , расположенного на поверхности земли. Толщина пластика детекторов составляла  $5 \text{ см}$ . Амплитуда сигнала от одной частицы с детектора соответствовала ионизационным потерям частицы, равным приблизительно  $10 \text{ МэВ}$ . Оба детектора располагались в центре установки ШАЛ МГУ.

Сигналы на фотопленку фотографировались с экрана дулучевого запоминающего аналогового осциллографа С8-14. На рис. 1*a* приведен пример осциллограммы сигнала при регистрации типичного ШАЛ. Для удобства сигнал отрицательной

поляжности с неэкранированного детектора регистрировался с помощью луча, расположенного в верхней части экрана осциллографа. Синхронно с ним сигнал с экранированного детектора положительной поляжности регистрировался с помощью нижнего луча. Длина развертки обоих лучей позволяла наблюдать распределение частиц в интервале около 500 нс при регистрации события на установке ШАЛ МГУ. Причем технические характеристики были выбраны так, что для неэкранированного детектора в начале развертки луча осциллографа во временном интервале длительностью примерно 100 нс можно было наблюдать опережающие частицы, затем в течение 300 нс запаздывающие частицы относительно импульса, вызванного частицами диска ШАЛ. Соответственно при запуске развертки осциллографа синхронно с экранированного детектора в начале развертки луча осциллографа в интервале 200 нс можно было наблюдать опережающие проникающие частицы, затем в течение примерно 300 нс запаздывающие проникающие частицы.

Запуск развертки осциллографа осуществлялся от ШАЛ при четырехкратных совпадениях сигналов с четырех равных частей площадью  $1 \text{ м}^2$  неэкранированного детектора. При этом частота запуска осциллографа составляла примерно 4 раза в минуту. Частота совпадений импульсов запуска осциллографа и импульсов запуска установки ШАЛ МГУ около 35 раз в час. После запуска развертки осциллографа осциллограмма сигнала запоминалась на полсекунды на экране осциллографа на время, достаточное для фотографирования изображения осциллограммы с помощью фоторегистратора, который запускался при совпадении запуска развертки осциллографа и импульса запуска установки ШАЛ МГУ. С целью возможности наблюдения сигналов опережающих частиц сигналы с детекторов на вход осциллографа подавались через кабель связи с временем задержки 180 нс. Для экранированного детектора, находящегося в подземном помещении, возникала еще дополнительная задержка длительностью около 70 нс, вызванная полетным временем мюонов к экранированному детектору относительно поверхности земли. Время задержки синхроимпульса осциллографа относительно момента появления ШАЛ определялось временем выработки импульса совпадения сигналов в четырех равных частях неэкранированного детектора, не превышало 50 нс. Таким образом, развертка осциллографа запускалась раньше момента времени прихода сигнала с детектора примерно на 100 нс относительно появления сигнала с неэкранированного детектора и примерно на 200 нс раньше появления сигнала с экранированного детектора, что позволяло в этом

временном интервале наблюдать сигналы от опережающих частиц. В оставшемся временном интервале длительностью около 300 нс наблюдались запаздывающие частицы, следующие за сигналом от частиц диска ШАЛ. Вместе с осциллограммой сигнала на фотопленку фотографировалось цифровое табло с информацией, содержащей номер события, дату и время, включенное параллельно с информационным табло установки ШАЛ МГУ.

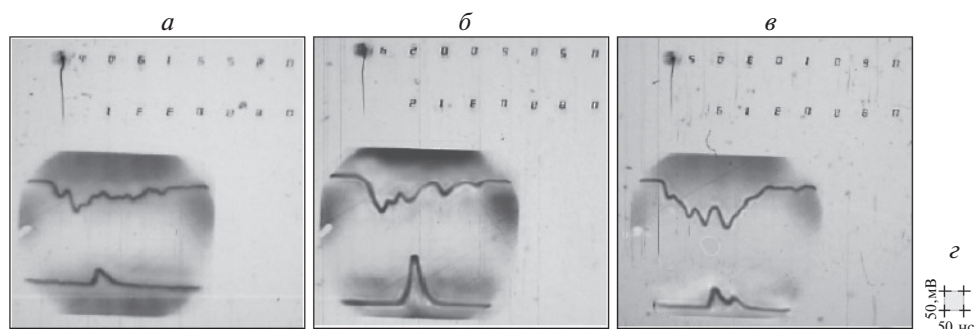
В рассмотренном выше примере представлена типичная осциллограмма сигнала, подобные импульсы на установке ШАЛ МГУ регистрировались в большинстве случаев. Как видно из рисунка, в большинстве ШАЛ на малых расстояниях от оси осциллограммы для экранированного и неэкранированного детекторов выглядят в виде одиночных импульсов, длительность которых существенно меньше длительности развертки.

На рис. 1б приведен пример наблюдения запаздывающих частиц одновременно на двух развертках осциллографа, первый импульс на верхней и нижней развертках — это сигнал от частиц диска ШАЛ, второй импульс — от запаздывающей частицы, причем времена задержки частиц относительно первого импульса совпадают по времени. В этом редком случае задержанный сигнал отстает относительно диска ШАЛ на время около 120 нс и для неэкранированного детектора, и для экранированного детектора.

На рис. 1в представлен пример наблюдения сигнала одиночной частицы фона космических лучей (первый импульс на верхней развертке), попавшей в детектор, имитирующей сигнал от опережающей частицы при регистрации ШАЛ (второй импульс на верхней развертке).

Точность измерений временных интервалов в приведенных примерах определяется толщиной луча развертки осциллографа, временем нарастания сигнала и составляет около 10 нс. Над осциллограммами расположены числа цифрового табло, указывающие дату, номер события, зарегистрированного установкой ШАЛ МГУ, и московское время. На рис. 1г показана цена делений шкалы экрана осциллографа. В подписи к рисунку для каждой осциллограммы указано расстояние до оси —  $R$ , полное число частиц в ШАЛ —  $N_e$  и число частиц, попавших в верхний детектор —  $n_e$ .

Разрешение детектора позволяло наблюдать тонкую структуру временного распределения частиц в диске ШАЛ на расстояниях более 200 м до его оси. На расстояниях менее 200 м от оси временное разрешение детектора было недостаточным для наблюдения тонкой временной структуры частиц ШАЛ, которая сливалась в один импульс без видимой структуры. Тем не менее, и в этом случае можно определять число частиц в импульсе, расстояния до оси и число частиц в



**Рис. 2.** Примеры осциллограмм регистрации сигналов частиц диска ШАЛ (верхний луч) и мюонов (нижний луч) на расстояниях более 200 м от оси ШАЛ. Видно, что временное распределение мюонов значительно уже, чем частиц ШАЛ, достигших уровня наблюдения. Примеры осциллограммы ШАЛ с параметрами: *а* —  $R = 442$ ,  $n_e = 22$ ,  $N_e = 8.2 \times 10^7$ ; *б* —  $R = 275$ ,  $n_e = 30$ ,  $N_e = 6.2 \times 10^6$ ; *в* —  $R = 220$ ;  $n_e = 28$ ;  $N_e = 1.7 \times 10^8$ . *з* — Шкала экрана осциллографа по вертикали и горизонтали.

ливне, поскольку длительность сигнала связана с расстоянием до оси, а площадь под импульсом с числом частиц, попавших в детектор, и энергией ШАЛ. На рис. 2 приведены примеры регистрации временных распределений на расстояниях более 200 м от оси ШАЛ.

Как видно из рисунка, временное распределение частиц, образующих диск ливня, значительно шире, чем мюонов, сигналы от которых видны на нижней развертке. Более широкое распределение времен прихода частиц ливня объясняется рассеиванием траекторий движения электронов в атмосфере. В отличие от электронов, мюоны в атмосфере движутся практически прямолинейно и поэтому имеют существенно меньший разброс времен прихода на уровень наблюдения.

### КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРОВ

Калибровка сцинтилляционных детекторов производилась при регистрации широких атмосферных ливней установкой ШАЛ МГУ. При регистрации ШАЛ импульсы от мюонов наблюдались менее чем на одной третьей части осциллограмм. В этом случае, в основном, регистрировались сигналы от одиночных мюонов, поскольку вероятность попадания в детектор двух мюонов от ШАЛ не превышала 10%. Это позволяло измерять амплитуду сигнала, вызванного ионизацией от одной релятивистской однозарядной частицы, и контролировать стабильность работы детектора непосредственно во время эксперимента.

Калибровка и измерение числа частиц, попавших в неэкранированный детектор, производилась с помощью счетчиков Гейгера—Мюллера, расположенных в центре установки ШАЛ МГУ.

При этом были получены следующие величины. Средняя амплитуда сигнала от одного релятивистского электрона при регистрации сигнала с

неэкранированного детектора соответствовала на экране осциллографа 6 мВ. Число частиц, попавших в неэкранированный сцинтилляционный детектор, определялось по числу сработавших счетчиков Гейгера—Мюллера, уклонение измеренной величины от среднего в этом случае определялось статистическими флуктуациями числа зарегистрированных в детекторе частиц.

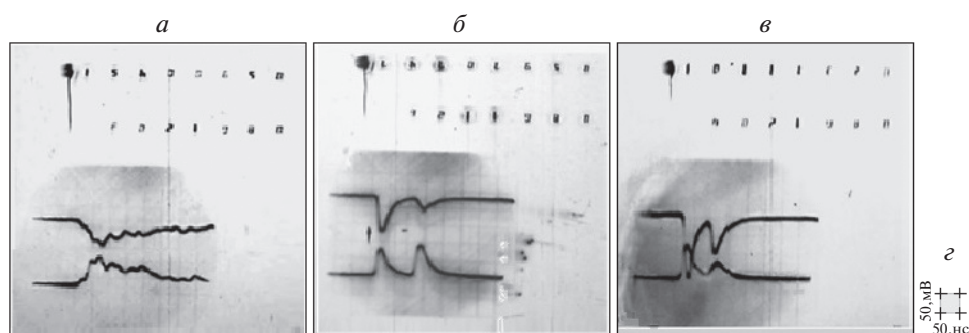
Для мюонов, зарегистрированных в ШАЛ с помощью экранированного детектора, было получено, что амплитуда сигнала от одной релятивистской частицы равна  $30 \pm 15$  мВ. При этом отметим, одно деление осциллографа в приведенных рисунках по горизонтали равно 50 нс, по вертикали — 50 мВ, за исключением осциллограмм, зарегистрированных во вспомогательных экспериментах, где амплитуда сигнала измерялась в относительных единицах.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Случайные импульсные помехи могут исказить данные измерений в случаях, если частота появления таких сигналов соизмерима с частотой полезного сигнала, поскольку их сложно выделить за счет увеличения статистики. В частности, при изучении запаздывающих частиц в ШАЛ регистрируются редкие события, поэтому источником неопределенности может быть имитация их сигналов нерелятивистскими протонами и нейтронами, возникающими в ШАЛ, а также после-импульсами ФЭУ и электрическими помехами. Ниже рассматриваются методические эксперименты, подтверждающие данные измерений.

### ПРОВЕРКА РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

При регистрации сигналов с помощью осциллографа импульсные электрические помехи отфильтровываются при визуальной обработке осциллограмм, поскольку сигналы с детектора от частиц



**Рис. 3.** Примеры осциллограмм регистрации сигналов с одного пластика сцинтилляционного детектора с помощью двух ФЭУ. Верхний луч — сигнал с первого ФЭУ, нижний луч — сигнал со второго ФЭУ. *а* — Пример регистрации временного распределения частиц на расстоянии более 200 м от оси ШАЛ. *б* и *в* — Примеры регистрации сигналов запаздывающих частиц на расстоянии менее 200 м от оси ШАЛ. Первый импульс на развертках осциллографа — сигнал, вызванный диском частиц ШАЛ, второй импульс — сигнал от запаздывающей частицы; *з* — шкала экрана осциллографа по вертикали и горизонтали.

ШАЛ имеют характерную форму, которая отличается от импульсов, вызванных электромагнитными наводками на аналоговую электронику детектора от цепей цифровой электроники либо помехами от электрической сети, возникающими при коммутации электрических приборов. Отбраковка таких помех на фотопленке не вызывает особых трудностей.

#### ПРОВЕРКА ИМИТАЦИИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ЧАСТИЦ ПОСЛЕ-ИМПУЛЬСАМИ ФЭУ

Одной из проблем, связанной с работой аппаратуры, предназначенной для исследования запаздывающих частиц, отмеченной, например в работе [7], являются после-импульсы, которые возникают в некоторых моделях ФЭУ. Такие сигналы по форме импульса не отличаются от сигналов, вызванных запаздывающими и опережающими частицами, и могут вносить существенные искажения в данные исследований, если частота появления после-импульсов либо сравнима, либо превосходит частоту регистрации полезного сигнала.

В настоящей работе имитация запаздывающих частиц после-импульсами ФЭУ исследовалась в двух вспомогательных экспериментах. В первом эксперименте для случайной выборки ФЭУ типа ФЭУ-110, используемых в детекторах, проводилась регистрация сигналов от светодиода. В этом случае на аноде ФЭУ наблюдались импульсы от всплеск света светодиода, но после-импульсов ФЭУ зарегистрировано не было. Во втором случае сигналы с одного и того же сцинтилляционного пластика регистрировались с помощью двух ФЭУ. Сигнал с каждого ФЭУ подавался на свою развертку осциллографа. В этом случае задержанные импульсы наблюдались синхронно на выходе обоих ФЭУ. Результаты этого эксперимента обсуждаются в следующем разделе.

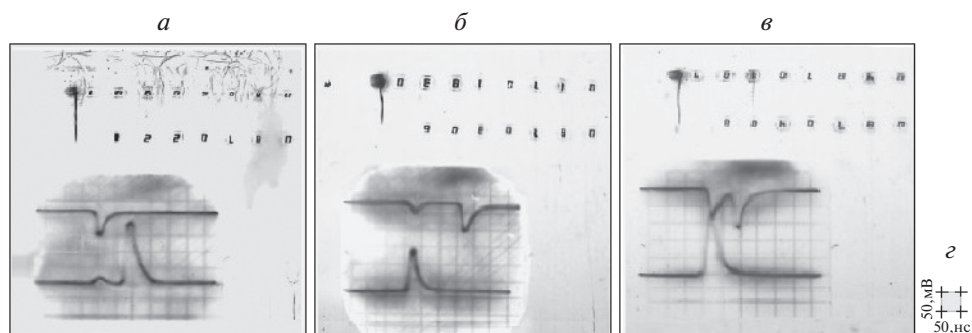
#### ПРОВЕРКА СУЩЕСТВОВАНИЯ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ЧАСТИЦ

В этом эксперименте во всех ШАЛ, в которых наблюдались запаздывающие частицы во вспомогательном детекторе, соответствующие им импульсы наблюдались в двух ФЭУ и имели равные времена задержки относительно фронта ливня. Осциллограмм с запаздывающими сигналами, зарегистрированными только одним ФЭУ, обнаружено не было. Это означает, что задержанные сигналы возникают в пластике сцинтилляционного детектора, а не в ФЭУ, которые использовались в эксперименте.

На осциллограммах, показанных на рис. 3б и 3в, приведены примеры регистрации задержанных сигналов с помощью двух ФЭУ с одного пластика детектора, где видно, что задержанный сигнал регистрируется одновременно двумя ФЭУ. Разница по амплитуде задержанных сигналов в ФЭУ определяется местом попадания запаздывающей частицы в пластик детектора. Также на этом рисунке слева показана осциллограмма сигнала временной структуры диска на большом расстоянии от оси ШАЛ, зарегистрированного с помощью двух ФЭУ с одного и того же сцинтилляционного пластика. На этой осциллограмме отчетливо видно, что сигналы ФЭУ на обеих развертках осциллографа совпадают с точностью до уровня флуктуаций сигнала по амплитуде, что также зависит от места попадания частиц в детектор, а по времени совпадают с точностью не хуже толщины луча.

#### ПРОВЕРКА ПОВЫШЕННОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ И ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОЛИВНЕЙ ЗАПАЗДЫВАЮЩИМИ ЧАСТИЦАМИ

Как уже отмечалось выше, особенностью задержанных сигналов является то, что их импульсы



**Рис. 4.** *а, б, в* — Примеры осциллограмм сигналов с двух неэкранированных сцинтилляционных детекторов, расположенных в одной плоскости, зазор между пластиками которых менее 5 см. Верхний луч — сигнал с первого детектора, нижний луч — сигнал со второго детектора. Первый импульс на осциллограммах — сигнал от частиц диска ШАЛ, второй импульс — сигнал от запаздывающей частицы. *z* — Шкала экрана осциллографа по вертикали и горизонтали.

не имеют временной структуры, а их амплитуда значительно превышает сигнал от одной релятивистской частицы. В этой связи возникает вопрос, чем вызван этот сигнал, попаданием в детектор одной или нескольких запаздывающих частиц? Для изучения этого вопроса временные распределения частиц в ШАЛ регистрировались с помощью двух неэкранированных сцинтилляционных детекторов, разделенных щелевым промежутком шириной менее 5 см и длиной 1 м, каждый из которых имел площадь 0.5 м<sup>2</sup>. Детекторы располагались в одной плоскости в центре установки ШАЛ МГУ. Сигнал с каждого детектора подавался на свой луч развертки осциллографа.

На рис. 4 приведены примеры осциллограмм сигналов, зарегистрированных в этом эксперименте. Первый импульс на развертках осциллографа — это сигнал от частиц диска ШАЛ, второй импульс — сигнал от запаздывающих частиц. Разброс амплитуды сигнала первого импульса вызван флуктуациями числа частиц диска ливня, попавших в детектор. Как видно из приведенных примеров, амплитуда задержанного сигнала превышает сигнал от нескольких релятивистских частиц, но регистрируется только одним детектором. Действительно, по данным счетчиков Гейгера—Мюллера, исходя из порога срабатывания установки ШАЛ МГУ, можно определить, что амплитуда первого импульса соответствует как минимум  $4 \pm 2$  частицам, попавшим в детектор, а амплитуда задержанного импульса, которая значительно больше по величине, соответствует как минимум 7 релятивистским частицам. Наиболее вероятно, что этот сигнал вызван попаданием одной частицы в детектор, поскольку если бы задержанный сигнал был сигналом от локального ливня, возникшего в атмосфере, то его частицы рассеялись бы в атмосфере, сигналы от которых наблюдались бы в двух детекторах одновременно.

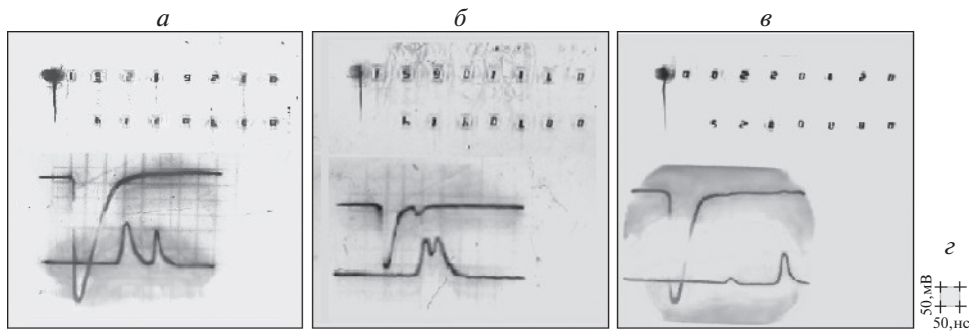
Таким образом, исходя из данных этого эксперимента можно утверждать, что преобладающая

часть задержанных сигналов, зарегистрированных в детекторе, вызвана одиночными частицами, имеющими повышенную ионизационную способность по сравнению с обычными релятивистскими частицами, и что запаздывающие частицы имеют низкую вероятность образовывать лавины вторичных запаздывающих частиц и не испытывают ядерных взаимодействий.

#### ПРИМЕРЫ РЕГИСТРАЦИИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ПРОНИКАЮЩИХ ЧАСТИЦ С ПОВЫШЕННОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТЬЮ С ЭНЕРГИЕЙ БОЛЕЕ 5 ГэВ

На рис. 5 приведены примеры регистрации проникающих задержанных частиц, сигналы от которых показывают их повышенную ионизационную способность. На осциллограмме рис. 5*а* приведен пример регистрации проникающей запаздывающей частицы. Первый импульс на нижней развертке — сигнал от одного мюона диска ШАЛ, второй импульс — сигнал от запаздывающей частицы. Из рисунка видно, что запаздывающая частица отстает от частиц диска ливня на время около 100 нс, а ее ионизационные потери в этом случае более чем в 5 раз превышают потери от одного мюона. На рис. 5*б* видно, что запаздывающие частицы наблюдаются в двух детекторах с различной временной задержкой. Причем на верхней развертке наблюдается сигнал, превышающий сигнал от одной релятивистской частицы примерно в 2 раза, на нижней развертке — более чем в 5 раз. Этот пример интересен еще и тем, что видно, что разброс временных интервалов между запаздывающими частицами превышает 70 нс, что заведомо больше разброса временных интервалов между частицами, образующими диск ШАЛ на расстояниях менее 200 м от оси. На рис. 5*в* приведен еще один пример регистрации запаздывающей частицы, сигнал от которой также примерно в 5 раз превышает сигнал от одного





**Рис. 5.** *а, б, в* — Примеры регистрации проникающих запаздывающих частиц с энергией более 5 ГэВ, сигнал которых превышает ионизирующую способность одной релятивистской частицы. Верхний луч — сигнал с неэкранированного детектора. Нижний луч — сигнал с детектора, находящегося под слоем грунта. *z* — Шкала экрана осциллографа по вертикали и горизонтали.

мюона. Таким образом, из приведенных примеров видно, что проникающие запаздывающие частицы, наблюдающиеся в интервалах от 50 до 300 нс, имеют повышенную ионизационную способность.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящем эксперименте за 1000 ч наблюдений на установке ШАЛ МГУ было зарегистрировано около  $35 \times 10^3$  осциллограмм ШАЛ с энергией более  $10^{15}$  эВ, в которых регистрировались временные распределения частиц в ШАЛ. При этом в  $1.2 \times 10^3$  случаях запаздывающие частицы наблюдались с помощью неэкранированного детектора, а в 36 случаях наблюдались проникающие запаздывающие частицы с помощью экранированного детектора, энергия которых превышала 5 ГэВ. Из приведенных данных видно, что поток задержанных частиц ослабляется слоем грунта, эквивалентным 20 м водяного столба почти в  $30 \pm 6$  раз. Время задержки этих частиц превышает ожидаемое время прихода электронов и мюонов на уровень наблюдения и находилось во временном интервале от 50 до 300 нс, а амплитуда сигнала от запаздывающих частиц превышает амплитуду сигнала от одной релятивистской частицы.

### ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОЙ ВЫСОТЫ ТОЧКИ ГЕНЕРАЦИИ ПРОНИКАЮЩИХ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ЧАСТИЦ

Оценим расстояние, которое пролетела релятивистская частица, в данном случае мюон, имеющая время задержки 160 нс, как показано на рис. 5*в*, энергия которой превышает 5 ГэВ. При массе покоя мюона 105 МэВ лоренц-фактор такого мюона  $\gamma \geq 50$ . Известно, например, [10], что время задержки релятивистской частицы  $\tau$  равно:

$$\tau = h/v - h/c \approx 1667 \times h/\gamma^2 \text{ [нс];}$$

$$h \approx \tau\gamma^2/1667 \text{ [км];} \quad v = c(1 - 1/\gamma^2)^{1/2};$$

где  $v$  — скорость запаздывающей частицы,  $c$  — скорость света в вакууме,  $h$  — высота (км) генерации частицы в ШАЛ. Из этого следует, что при известных  $\tau > 160$  нс и  $\gamma > 50$  минимальная высота генерации таких частиц составит более 250 км. На таких высотах практически отсутствует атмосфера и поэтому данные измерений трудно объяснить запаздывающими мюонами, возникающими в ШАЛ. То, что это не мюоны, также указывает и амплитуда сигнала запаздывающей частицы, которая в приведенных примерах превышает сигнал от одного релятивистского мюона более чем в 1.5 раза. Также из данных этого эксперимента запаздывающие частицы трудно объяснить и протонами, и нейтронами. В самом деле, при массе частицы около 1 ГэВ лоренц-фактор для частиц с энергией более 5 ГэВ будет не менее 5. При времени запаздывания около 160 нс это соответствует длине пробега более 2.5 км, что не противоречит длине свободного пробега адронов в атмосфере. Но с одной стороны, протоны и нейтроны таких энергий эффективно поглощаются слоем грунта, экранирующего детектор. С другой стороны, такие частицы имеют достаточную энергию для образования запаздывающих микроливней, что также противоречит данным наблюдений, поскольку не были обнаружены задержанные микроливни. Если предположить, что задержанные частицы возникли в ШАЛ на высоте 10 км, то в этом случае можно ожидать, что масса этих частиц в 2 раза превышает массу мюона. В случае, если сигналы возникли от протонов или нейтронов, возникших в ШАЛ, которые не испытывают ядерного взаимодействия, то их энергия должна быть меньше 50 МэВ. Заряженные частицы таких энергий могут вызывать в пластике вспышки в неэкранированном детекторе с амплитудой импульса, превышающей сигнал от одной релятивистской частицы. Но протоны таких энергий из-за ионизационных потерь погло-

щаются слоем грунта, экранирующим детекторы. Также исключаются и нейтроны таких энергий, поскольку согласно расчетам [9] в грунте такой толщины их поток ослабляется более чем в  $10^5$  раз, что значительно больше измеренного ослабления потока запаздывающих частиц, который по данным настоящей работы ослабляется менее чем в  $30 \pm 6$  раз.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, существование запаздывающих частиц и их повышенная ионизационная способность подтверждаются во вспомогательных экспериментах. Кроме того, проникающие запаздывающие частицы не могут имитироваться мюонами с энергией более 5 ГэВ, поскольку ионизационная способность запаздывающих частиц существенно больше, чем у мюонов таких энергий. Также получена оценка возможной высоты генерации задержанных частиц, которая превышает 250 км для случая, если масса запаздывающих частиц соответствует массе мюона, что противоречит существующим представлениям о высоте начала развития ШАЛ. Отметим, что полученная оценка высоты генерации запаздывающих частиц содержит указание и на то, что задержанные частицы, возможно, возникают вне атмосферы, что требует отдельного рассмотрения в дальнейших работах.

Вместе с тем экспериментально не обнаружено задержанных микроливней, которые могли бы возникнуть в атмосфере при ядерных взаимодействиях запаздывающих частиц, либо способности запаздывающих частиц вызывать электромагнитные каскады.

Также получено, что поток запаздывающих частиц, дошедший до уровня наблюдения, ослабляется слоем грунта, эквивалентным 20 м водяного столба, в  $30 \pm 6$  раз, что существенно отличается от ослабления таким слоем грунта потоков электронов, мюонов и адронов, образующихся в ШАЛ.

Отметим, что в работе [4] запаздывающие частицы исследовались с помощью двух детекторов, разнесенных на 22.5 м и расположенных в одной плоскости на поверхности земли. При этом было получено, что частота совпадений регистрации запаздывающих частиц в двух детекторах соответствует тому, что в некоторых ШАЛ наблюдается стив запаздывающих частиц, средняя величина задержки которых на расстояниях менее 200 м до оси ШАЛ не изменяется и составляет около 120 нс. При этом в круге радиусом 200 м, превышающем площадь детекторов в несколько тысяч раз, можно ожидать, что число запаздывающих частиц в ШАЛ может достигать как минимум нескольких десятков тысяч частиц. Для возникновения такого

потока задержанных частиц энергия первичной задержанной частицы по современным представлениям должна превышать  $10^{13}$  эВ. Действительно, энергия первичной задержанной частицы для получения задержанного ливня с таким числом частиц должна превышать  $E \geq (1-2)N_{\Delta}$  ГэВ, где  $N_{\Delta}$  — число запаздывающих частиц. При числе частиц в задержанном ливне более нескольких десятков тысяч частиц соответствуют энергии первичных задержанных частиц, образовавшей ливень, более  $10^{13}$  эВ. Возникновение частиц с такой энергией в первичном взаимодействии космических лучей с атмосферой представляется маловероятным, что, возможно, указывает на существование новых явлений при взаимодействии частиц сверхвысоких энергий, способствующих возникновению первичных запаздывающих частиц таких энергий [6]. Вместе с тем очевидно, что известные частицы ШАЛ с такой энергией не отстают от частиц диска ШАЛ и, следовательно, не могут рассматриваться как источник запаздывающих частиц. Также отметим, что за указанное время наблюдений не было зарегистрировано частиц, опережающих диск ШАЛ. В эксперименте было зарегистрировано два сигнала, опережающих сигнал от частиц диска ШАЛ с помощью неэкранированного детектора, регистрацию которых можно объяснить случайным попаданием в детектор частиц фона космических лучей. Что позволяет определить вероятность наблюдения опережающих частиц, которая заведомо меньше, чем  $2/35 \times 10^3 \approx 0.6 \times 10^{-4}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из эксперимента следует, что:

1. Энергия запаздывающих частиц превышает 5 ГэВ.
2. Задержанные частицы не образуют микроливней и теряют свою энергию в основном на ионизацию.
3. Ионизационная способность задержанных частиц превышает ионизацию от одной однозарядной релятивистской частицы.
4. Поток задержанных частиц ослабляется слоем грунта, эквивалентным 20 м водного столба, примерно в 30 раз.
5. Суммарная энергия потока запаздывающих частиц, дошедших до уровня наблюдения в ШАЛ, превышает сотни ГэВ.

Таким образом, данные измерений, выполненных в настоящей работе, показывают, что сигналы от задержанных частиц в сцинтилляционном детекторе отличаются от сигналов обычных релятивистских частиц, таких как протоны, нейтроны, мюоны и электроны, образующихся в ШАЛ. Но измеренных параметров недостаточно для ответа

на вопрос о существовании новых частиц в ШАЛ или новых типов взаимодействий частиц при сверхвысоких энергиях. Для решения этой задачи требуются более подробные исследования свойств запаздывающих частиц и процессов, происходящих при взаимодействии космических лучей сверхвысоких энергий, с целью выработки обоснованного суждения.

Авторы выражают благодарность своим коллегам за помощь при создании и эксплуатации осциллографической установки, обработке экспериментальных данных, а также за участие в обсуждениях результатов этой работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. B. Atrashkevich, R. I. Chernykh, Yu. A. Fomin, G. K. Garipov, *et al.*, in *Proceedings of the 20th ICRC, Moscow, 1987*, Vol. 6, p. 63.
2. I. M. Yoshida, Y. Toyoda, and T. Maeda, *J. Phys. Soc. Jpn.* **53**, 1983 (1984).
3. S. C. Tonwar and V. B. Sreekantan, *J. Phys. A* **4**, 868 (1971).
4. G. B. Christiansen *et al.*, in *Proceedings of the 21th ICRC, Adelaide, 1990*, Vol. 9, p. 150.
5. V. B. Atrashkevich, G. K. Garipov, N. N. Kalmykov, *et al.*, in *Proceedings of the 22th ICRC, Dublin, 1991*, Vol. 4, p. 319.
6. В. И. Яковлев, М. И. Вильданова, Н. Г. Вильданов, *Письма в ЖЭТФ* **85**, 111 (2007) [*JETP Lett.* **85**, 101 (2007)].
7. J. Linsley, in *Proceedings of the 19th ICRC, La Jolla, United States, 1985*, Vol. 7, p. 355.
8. Р. У. Бейсембаев, Ю. Н. Вавилов, Н. Г. Вильданов, А. В. Круглов, А. В. Степанов, Ж. С. Такибаев, *ЯФ* **72**, 1913 (2009) [*Phys. At. Nucl.* **72**, 1852 (2009)].
9. Ю. Н. Вавилов, Л. Г. Деденко, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 9 (2009).
10. A. Mincer, H. Freudenreich, J. A. Goodman, S. C. Tonwar, G. B. Yodh, R. W. Ellsworth, and D. Berley, *Phys. Rev. D* **32**, 541 (1985).

## SEARCH FOR DELAYED AND ADVANCED PARTICLES IN THE INTERACTION OF COSMIC RAYS OF ULTRA-HIGH ENERGIES IN THE ATMOSPHERE IN THE FLOW OF EAS MSU SET-UP

G. K. Garipov<sup>1)</sup>, A. A. Silaev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia*

The results of the study of time distributions of particles with energy greater than 5 GeV in extensive air showers (EAS) with energies exceeding  $10^{15}$  eV at distances less than 200 m from the EAS axis are presented in order to search for delayed and advanced new particles that can occur in interactions of primary cosmic rays with the atmosphere at the EAS MSU array. The studies were carried out using an unshielded detector located on the surface of the earth and an underground detector shielded by a layer of ground equivalent to 20 m of water column. It is shown that delayed particles, which can be caused by heavy long-lived particles and have a delay time in the range from 100 to 300 ns with exponentially decreasing distribution law the index being equal to 120 ns, have greater ionization ability than relativistic muons. The flow of such particles arising in EAS is attenuated by a layer of ground between shielded and unshielded detector by about 30 times. The mass of such particles is estimated as more than two times greater than the mass of the muon. It is noted that particles moving in front of the EAS disk, are not detected. Possible sources of delayed signals are discussed. The features of calibrations and auxiliary tests confirming the measurement data are also considered.