

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 537.591.15+523.165

ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ТУНКА

© 2009 г. Р. В. Васильев, О. А. Гресс**, Е. Е. Коростелева*, Л. А. Кузьмичев*,
Б. К. Лубсандоржиев, А. И. Панфилов, Ю. В. Парфенов**, Л. В. Паньков**, В. В. Просин*,
Б. А. М. Шайбонов, Ch. Spiering***, T. Schmidt***, Д. В. Чернов*, И. В. Яшин*

Институт ядерных исследований РАН
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

*НИИЯФ им. Скобелева МГУ, Россия, Москва

**НИИПФ ИГУ, Россия, Иркутск

***DESY, Zeuthen, Germany

Поступила в редакцию 07.08.2008 г.

Описываются оптический детектор и электронная система, разработанные для изучения формы импульсов черенковского света широких атмосферных ливней в эксперименте ТУНКА. Представлены некоторые результаты измерений, полученные с описанной экспериментальной установкой.

PACS: 29.40.Ka; 96.50.sd; 85.60.Na

Энергетический спектр первичного космического излучения имеет ярко выраженный степенной характер – $I(>E) \sim AE^{-\gamma}$. В конце 50-х годов прошлого века советскими физиками под руководством акад. Г.Б. Христиансена было открыто изменение показателя спектра γ при энергии $\sim 3 \times 10^{15}$ эВ [1]. Показатель спектра в этой точке изменяется с $\gamma \sim 1.7$ на $\gamma \sim 2.1$. Это изменение показателя спектра при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ получило известность в физике космических лучей как “излом” или “колени” в спектре первичного космического излучения. Со времени открытия этого явления прошло уже более 50 лет, но до сегодняшнего дня до конца не ясна его природа – каково происхождение самого излома, и какие изменения претерпевает при этом первичное космическое излучение, в первую очередь его химический состав.

Сложность экспериментальных исследований в этой области заключается в том, что при таких энергиях прямые измерения первичного космического излучения в спутниковых и стратосферных баллонных экспериментах сильно затруднены, если вообще возможны, в силу малости потока частиц (на уровне ~ 1 частица/м² · год). Остается только изучать первичное космическое излучение, исследуя широкие атмосферные ливни (ш.а.л.), вызванные взаимодействиями первичного космического излучения с ядрами атомов воздуха в верхних слоях атмосферы, с помощью наземных экспериментов. В таких экспериментах детектируются заряженные частицы ш.а.л. и вызванные ими черенковское и флуоресцентное излучения. На сегодняшний день, по-видимому, одним из наиболее информативных методов исследования

первичного космического излучения в области “излома” его спектра является изучение черенковского излучения ш.а.л.

Широкоугольный черенковский детектор ш.а.л. ТУНКА [2–6] успешно работает с 1994 г. Детектор расположен в Тункинской долине в Республике Бурятия в 50 км от оз. Байкал на высоте 675 м над уровнем моря. Детектор состоит из 25 оптических модулей и охватывает геометрическую площадь 340×340 м². Общая схема детектора представлена на рис. 1. Расстояние между соседними модулями составляет 85 м. Базовым элементом оптических модулей установки является крупногабаритный гибридный вакуумный фотодетектор КВАЗАР-370G [7]. Энергетический порог детектора соответствует ~ 500 ТэВ, направление прихода первичной частицы определяется с погрешностью $\sim 0.5^\circ$, а погрешность определения положения оси ливня составляет ~ 10 м. В эксперименте ТУНКА проводятся исследования энергетического спектра и химического состава первичного космического излучения, основанные на определении функции пространственного распределения черенковского излучения ливней.

Другой возможностью исследования свойств первичного космического излучения является изучение формы импульса черенковского света, порожденной заряженной компонентой ливней. В работах [8, 9] показано, что длительность импульса черенковского излучения ш.а.л. на расстояниях ≥ 200 м от оси ливня зависит от химического состава первичного космического излучения, вызвавшего данный ливень. Длительность импульса

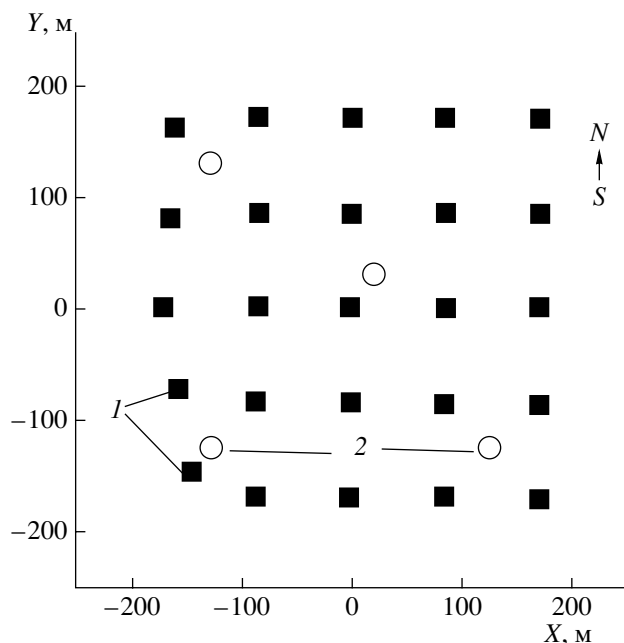


Рис. 1. Общая схема широкоугольного черенковского детектора ш.а.л. ТУНКА. 1 – оптические модули на базе фотодетекторов КВАЗАР-370G; 2 – оптические модули для регистрации формы импульса черенковского излучения ш.а.л. на базе фотодетекторов THORN-EMI D668KB/5.

ш.а.л. $\Delta t_{п.ш.п.в.}$ связана с глубиной максимума развития ливня X_{max} следующим соотношением [10]:

$$(X_{абс}/\cos\theta) - X_{max} = K(R) \lg(\Delta t_{п.ш.п.в.}) + C(R), \quad (1)$$

где X_{max} , г/см² – глубина максимума развития ливня; $X_{абс}$, г/см² – полная толщина атмосферы над установкой; θ , град – зенитный угол падения ш.а.л.; $\Delta t_{п.ш.п.в.}$, нс – полная ширина на половине высоты импульса; R , м – расстояние до оси ливня.

Зависимости параметров K и C от расстояния R хорошо описываются полиномами второй степени для диапазона расстояний 200–500 м до оси ливня. Ошибка метода определения глубины максимума развития ливня по длительности импульса черенковского излучения ш.а.л. не превышает 20 г/см².

Проводить такие исследования с помощью базовых фотодетекторов КВАЗАР-370G детектора ТУНКА не представляется возможным. Дело в том, что задний фронт выходных импульсов фотодетектора описывается экспоненциальной функцией (с постоянной времени $\tau \sim 30\text{--}50$ нс), которая определяется экспоненциальным характером высвечивания сцинтиллятора, используемого в качестве первого каскада усиления фотодетектора. В силу этого в состав установки введены дополнительные оптические модули на основе быстродействующего фотоэлектронного умножителя (ф.э.у.) THORN-EMI D668KB/5 классического типа (с полу-

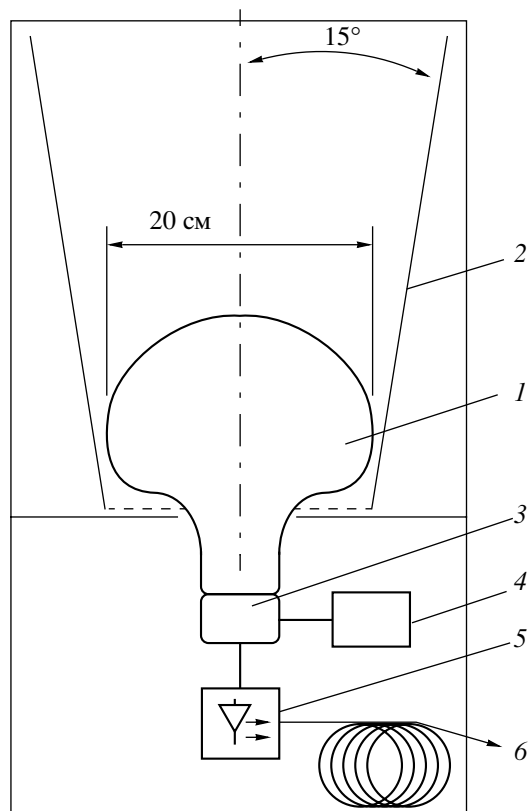


Рис. 2. Оптический модуль для регистрации формы импульса черенковского излучения ш.а.л. 1 – ф.э.у. THORN-EMI D668KB/5; 2 – конический концентратор света; 3 – активный делитель напряжения питания ф.э.у.; 4 – высоковольтный источник напряжения питания ф.э.у.; 5 – преобразователь анодных импульсов ф.э.у. в аналоговые световые импульсы; 6 – оптоволоконный кабель.

сферическим фотокатодом $\varnothing \sim 20$ см и диодной системой с линейной фокусировкой с шестью каскадами умножения). Ф.э.у. разработан фирмой THORN-EMI для использования в черенковском детекторе ш.а.л. AIROBICC [11], действовавшего в 90-е годы прошлого века на острове Ла Пальма в Испании.

Эскиз оптического модуля для исследования формы импульса черенковского излучения ш.а.л. показан на рис. 2. Ф.э.у. и детекторная электроника установлены в металлическом контейнере с коническим концентратором света. Концентратор света выполнен из акрилового пластика и покрыт зеркальным слоем алюминия. Полный угол раствора конуса составляет 30°. Применение конических концентраторов света увеличивает эффективную площадь оптического модуля до ~ 0.1 м². Использование небольшого количества каскадов умножения ф.э.у. позволяет работать в условиях светового фона ночного неба, средний уровень которого составляет в районе расположения детектора $(1\text{--}1.2) \cdot 10^{12}$ фотонов/м² · с · стер. Уровень по-

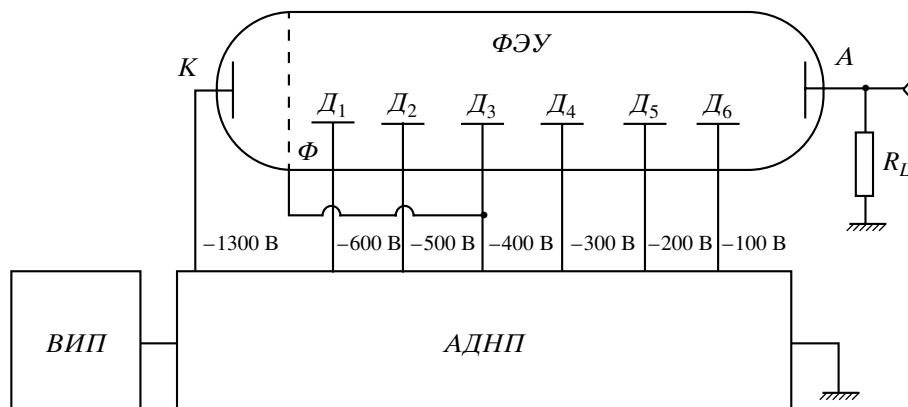


Рис. 3. Функциональная схема подключения активного делителя напряжения питания ф.э.у. АДНП – активный делитель напряжения питания; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель THORN-EMI D668KB/5; К – фотокатод; А – анод; Д₁–Д₆ – диоды; R_L – нагрузочное сопротивление; ВИП – высоковольтный источник питания; Ф – фокусирующий электрод.

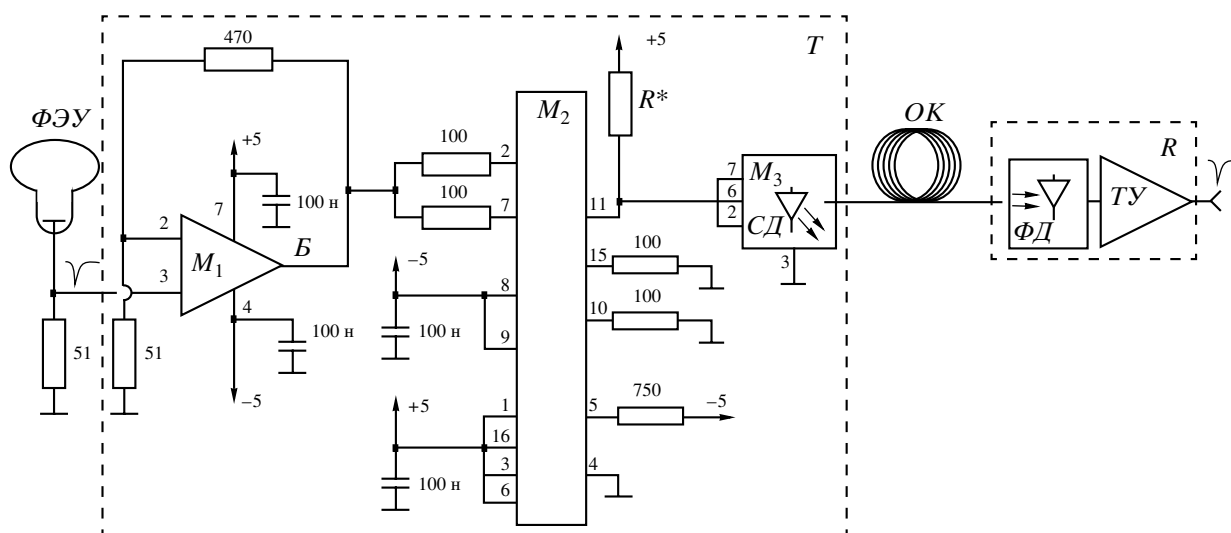


Рис. 4. Функциональная схема электронной системы передачи выходных сигналов оптического модуля детектора по оптоволоконному кабелю. ФЭУ – фотоэлектронный умножитель THORN-EMI D668KB/5; Т – передатчик-преобразователь электрических импульсов в оптические (СД – светодиод); ОК – оптоволоконный кабель UB04-080U-W; R – приемник-преобразователь оптических импульсов в электрические HFBR-2316-T (AGILENT Electronics); ФД и ТУ – фотодиод и трансимпедансный предусилитель HFBR-2316-T; M₁ – AD8001AR; M₂ – OPA2662AP; M₃ – LST0500 (AGILENT Electronics).

стоянного анодного тока ф.э.у., соответствующий такой фоновой засветке, не превышает 30 мкА. Для надежной и стабильной работы ф.э.у. применяется активный делитель напряжения питания ф.э.у., обеспечивающий стабильность коэффициента усиления ф.э.у. в широком диапазоне изменения уровня фоновой засветки и подробно описанный в [12].

Функциональная схема подключения такого активного делителя напряжения к ф.э.у. и типичное распределение потенциалов на электродах ф.э.у. показана на рис. 3. Для достижения максимально высокого временного разрешения ф.э.у. фокусирующий электрод Ф соединен с диодом

Д₃. Для достижения максимального сбора фотоэлектронов на диод Д₁ разность потенциалов между фотокатодом и Д₁ выбрана равной ~600 В. Длительность анодных импульсов при этом составляет ~5.5 нс (полная ширина на половине высоты импульса) при полном коэффициенте усиления ф.э.у. ~10⁴, который достигается при рабочем напряжении питания ~1300 В.

Для передачи выходных аналоговых сигналов детекторов на значительные расстояния без существенного ослабления и искажения сигнала и для защиты от электромагнитных помех использован метод передачи аналогового светового импульса по оптоволоконному кабелю, предложен-

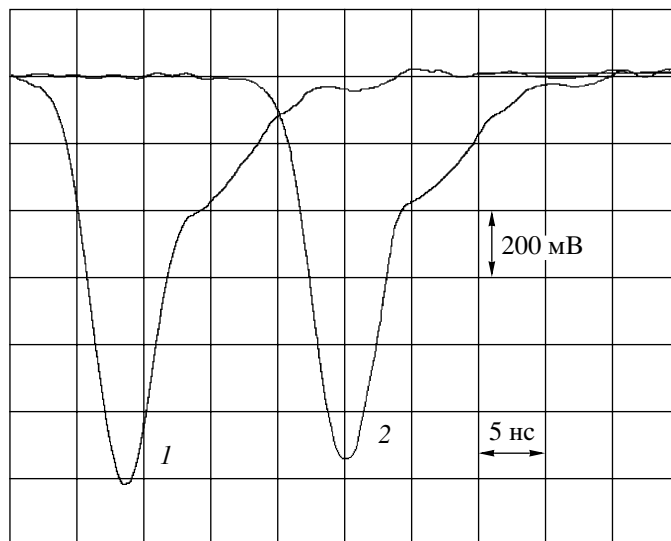


Рис. 5. Форма импульса оптического модуля установки на основе ф.э.у. THORN-EMI D668KB/5 до (1) и после (2) прохождения оптоволоконного кабеля длиной 400 м.

ный в работах [13–17]. На рис. 4 показана функциональная схема электронных узлов системы передачи и приема выходных сигналов оптического модуля по оптоволоконному кабелю. Для передачи анодного сигнала фотодетектора из оптического модуля в центральный электронный пункт электрический анодный сигнал преобразуется в оптический в преобразователе T , расположенном в непосредственной близости от анода ф.э.у. Для преобразования в оптический сигнал анодный сигнал усиливается сначала предусилителем M_1 , а затем усилителем мощности M_2 и подается на модуль M_3 , включающий в себя светодиод $СД$ с максимумом излучения на длине волны 1300 нм. С помощью переменного сопротивления R^* устанавливается ток смещения светодиода, необходимый для достижения максимально возможного линейного динамического диапазона выходных импульсов. Получающийся аналоговый оптический сигнал по одномодовому оптоволоконному кабелю $ОК$ длиной 400 м передается в центральный электронный пункт установки. Для обратного преобразования оптического сигнала в электрический в центральном электронном пункте установки используется приемник-преобразователь R , включающий в себя быстродействующий $p-i-n$ -фотодиод $ФД$ на основе соединений $InGaAs$ и интегрированный с ним быстродействующий трансимпедансный предусилитель $TУ$.

На рис. 5 показаны выходные импульсы ф.э.у. THORN-EMI D668KB/5 до и после прохождения оптоволоконного кабеля длиной 400 м, зарегистрированные с помощью быстродействующего цифрового осциллографа. Как видно на рисунке, формы анодных импульсов ф.э.у. практически не пре-

терпевают каких-либо существенных изменений при прохождении по оптоволоконному кабелю.

На рис. 6 представлена функциональная схема центрального электронного пункта. Аналоговые световые сигналы, поступающие из оптических модулей, преобразуются обратно в электрические импульсы в приемнике-преобразователе, разветвляются и подаются на входы блока интегральных программируемых дискриминаторов $Д_1-Д_4$ (на рис. 6 показан только $Д_1$) и через линию задержки $ЛЗ_1$ на входы быстродействующего 4-канального 8-разрядного АЦП с частотой дискретизации 250 МГц – блока DL515 [18] производства фирмы STRUCK, выполненного в стандарте VME. Последовательное, с определенной временной задержкой, включение всех четырех каналов АЦП позволяет достичь максимальной частоты дискретизации 1 ГГц. В описываемом эксперименте импульсы с каждого оптического пункта подавались на два канала со сдвигом по времени в 2 нс по коаксиальному кабелю РК-50-2-11 длиной ~ 10 см ($ЛЗ_3$) для того, чтобы дискретность регистрации формы импульса составила 2 нс.

Блоки дискриминаторов включают в себя, помимо интегральных дискриминаторов на основе быстродействующих компараторов КР597СА1, еще 10-разрядные цифроаналоговые преобразователи для программного управления уровнями дискриминации сигналов и 16-разрядные двоичные счетчики числа срабатывания дискриминаторов. Система выработки управляющих сигналов быстродействующего АЦП представляет собой логический блок 1, вырабатывающий управляющие сигналы АЦП при срабатывании любого из четырех дискриминаторов. Оцифровка АЦП запускается при появлении управляющего сигнала

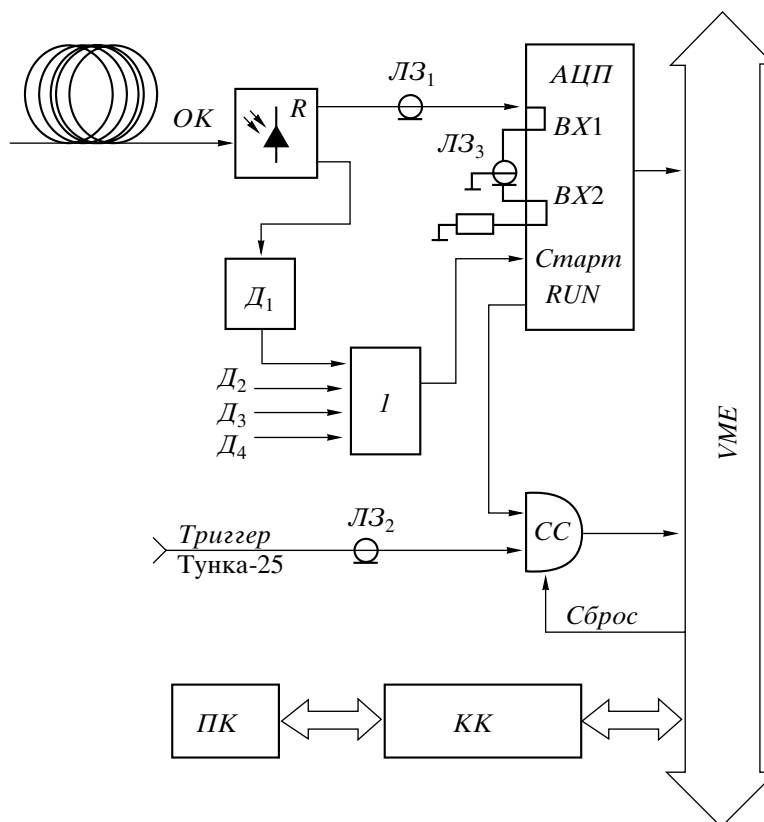


Рис. 6. Функциональная схема центрального электронного пункта. ОК – оптоволоконный кабель; R – приемник-преобразователь оптических сигналов в электрические; ЛЗ₁–ЛЗ₃ – кабельные линии задержки; Д₁–Д₄ – дискриминаторы импульсов; АЦП – быстродействующий аналого-цифровой преобразователь DL515; СС – логический модуль синхронизации электронной системы детектора формы импульса ш.а.л. с триггерным сигналом базового детектора ТУНКА-25; КК – крейт-контроллер; ПК – персональный компьютер.

на его входе “Старт”. Если в течение 1 мкс не появляется триггерный сигнал базового детектора ТУНКА-25, оцифровка прекращается, и АЦП возвращается в исходное состояние.

Синхронизация во времени работы базового детектора ТУНКА-25 и детектора формы импульса ливней осуществляется при помощи логического блока СС. При появлении триггерного сигнала детектора ТУНКА-25 в заданном временном интервале информация, накопленная в циклическом FIFO-буфере АЦП, переписывается через крейт-контроллер на жесткий диск компьютера. Все электронные блоки центрального пункта выполнены в стандарте VME и связаны с помощью крейт-контроллера КК с персональным компьютером ПК (IBM-PC/Pentium-II 300 МГц). Программа управления всей системой разработана на языке Си++ в среде операционной системы LINUX.

Для восстановления истинной формы черенковского импульса ш.а.л. необходимо учитывать флуктуации формы импульса, связанные с фоновой засветкой от ночного неба и шумами регистрирующей электронной системы. Для этого экспериментально зарегистрированная с помо-

щью быстродействующих АЦП форма черенковского импульса ш.а.л. аппроксимируется следующим выражением [19, 20]:

$$F(t) = b \exp(-(x/c)^2) \exp(-x/d), \quad \text{если } x \leq 0;$$

$$F(t) = b \exp(-x/d), \quad \text{если } x > 0; \quad (2)$$

$$x = t - a.$$

Параметры аппроксимирующей функции *a*, *b*, *c* и *d* определяются методом наименьших квадратов. Аппроксимация формы импульса единой функцией позволяет уменьшить ошибки измерения параметров импульса (амплитуды и длительности на половине высоты импульса), связанные со случайными флуктуациями экспериментальных данных.

На рис. 7 показан импульс черенковского излучения ш.а.л., экспериментально зарегистрированный описываемой системой на расстоянии ~300 м от оси ливня. Точками представлены данные от быстродействующего АЦП, а сплошная кривая получена аппроксимацией по формуле (2). Видно, что экспериментальные данные достаточно хорошо описываются аппроксимированной кривой. Зависимость глубины максимума разви-

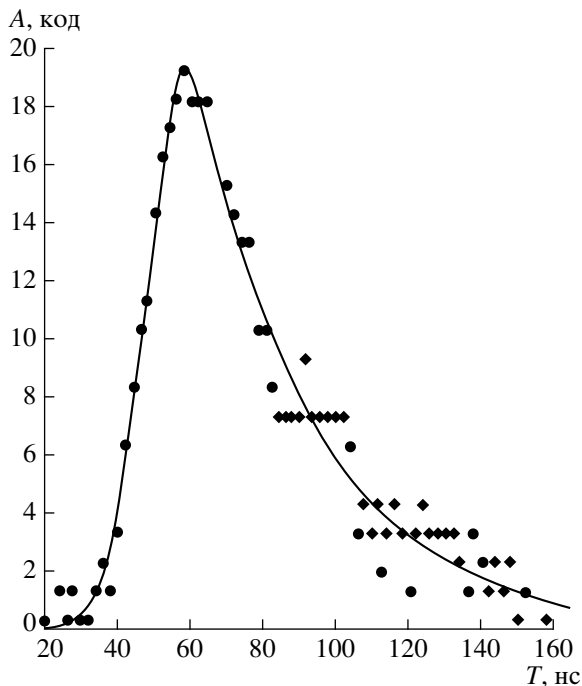


Рис. 7. Импульс черенковского излучения ш.а.л., экспериментально зарегистрированный описываемой системой на расстоянии ~300 м от оси ливня. Сплошная кривая – аппроксимация по формуле (1); точки – экспериментальные данные быстродействующего АЦП DL515.

тия ш.а.л. от энергии первичной частицы, полученная из измерений длительности импульса ш.а.л. согласно формуле (1), представлена на рис. 8 (точки 2). Кривые на рисунке – это расчетные кривые, полученные компьютерным моделированием с использованием программного пакета CORSIKA [21, 22] и модели взаимодействия первичных космических лучей с ядрами атомов воздуха QGSJET-01 [22, 23]. Пунктирная кривая получена для протонов первичных космических лучей, а сплошная – для ядер железа. Точки 1 – данные измерений функции пространственного распределения плотности фотонов черенковского излучения ливней, зарегистрированные базовой установкой ТУНКА-25. Как следует из рис. 8, между данными наблюдается довольно хорошее согласие. При этом надо отметить, что энергетический порог детектирования ливней в установке регистрации формы черенковского импульса ш.а.л. заметно выше энергетического порога базового детектора ТУНКА-25. Это объясняется, в основном, малой чувствительной площадью ф.э.у. детектора формы импульса черенковского импульса ливней по сравнению с фотодетекторами КВАЗАР-370G, которые используются в базовом детекторе ТУНКА-25.

Опыт эксплуатации описанной системы в течение нескольких лет в установке ТУНКА пока-

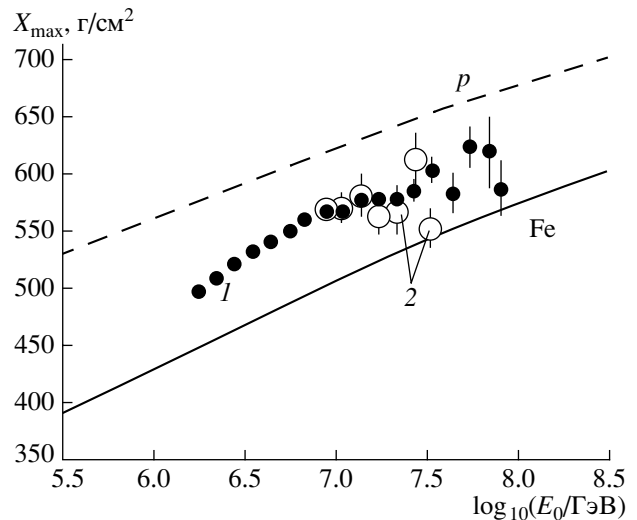


Рис. 8. Зависимость глубины развития ш.а.л. X_{\max} от энергии ливня. 1 – экспериментальные данные базового детектора ТУНКА-25; 2 – данные детектора формы импульса черенковского излучения ш.а.л. Кривые – расчет с помощью программного пакета CORSIKA с использованием модели взаимодействия первичных космических лучей (пунктирная кривая получена для протона, сплошная – для ядра железа) с ядрами атомов воздуха QGSJET-01.

зывает ее надежность и высокие характеристики. Было бы желательно увеличить чувствительную площадь индивидуальных детекторов для эффективного понижения энергетического порога регистрации ш.а.л. Применение лазерных диодов, например лазерных диодов VCSEL, вместо светодиодов в преобразователях анодных импульсов ф.э.у. в аналоговые световые импульсы позволило бы также улучшить характеристики всей системы.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность А. Lindner из Университета Гамбурга и Е. Lorenz из института Макса Планка (Мюнхен) за предоставление блоков FADC DL515 и фотоумножителей THORN-EMI 668KB/5, а также В.Ч. Лубсандоржиевой за внимательное прочтение рукописи статьи и многочисленные ценные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Г.В., Христиансен Г.Б. // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. С. 635.
2. Антонов Р.А., Галкин В.И., Иваненко И.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физическая. 1993. Т. 57. № 4. С. 181.
3. Antonov R.A., Bezrukov L.B., Borisovets V.A. et al. // Proc. XXIII Intern. Cosmic Ray Conf. Calgary Canada. 1993. V. 2. P. 430.
4. Безруков Л.Б., Глуховской Б.М., Кузьмичев Л.А. и др. // ПТЭ. 2000. № 1. С. 164.

5. Gress O.A., Gress T.I., Korosteleva E.E. et al. // Nucl. Phys. B. 1995. V. 75A. P. 299.
6. Bryanski S.V., Vasil'chenko Y.V., Gress O.A. et al. // Proc XXIV Intern. Cosmic Ray Conf. Roma Italy 1995. V. 2. P. 724.
7. Лубсандоржиев Б.К., Похил П.Г., Путилов О.А., Степаненко З.И. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 155.
8. Фомин Ю.А., Христиансен Г.Б. // ЯФ. 1971. Т. 14. Вып. 3. С. 6426.
9. Ильина Н.П., Калмыков Н.Н., Просин В.В. // ЯФ. 1992. Т. 55. Вып. 10. С. 2756.
10. Chernov D., Korosteleva E., Kuzmichev L. et al. // Int. J. Mod. Phys. 2006. V. A20. P. 6799.
11. Karle A., Merck M., Plaga R. et al. // Astroparticle Phys. 1995. V. 3. P. 321.
12. Васильев Р.В., Грэсс О.А., Коростелева Е.Е. и др. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 51.
13. Dinkerspiler B. An analogue optical link at liquid argon temperature // ATLAS Internal Note. LARGE-NO-08. 1994.
14. Dinkerspiler B. // Proc. of the First Workshop on Electronics for LHC Experiments. Lisbon, 1995. CERN/LHCC/95-96.
15. Karle A., Mikolajski T., Cochoss S. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1997. V. A387. P. 274.
16. Rose J., Bond I., Karle A. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. V. A442. P. 113.
17. Lorenz E., Maier R., Tran T.S., Weissbach P. // Nucl. Instrum. and Methods. 2001. V. A461. P. 517.
18. DL515 Flash ADC. Technical Manual. STRUCK Hamburg. 1995.
19. Васильев Р.В., Грэсс О.А., Коростелева Е.Е. и др. // Изв. РАН. Сер. физическая. 2001. Т. 65. № 11. С. 1640.
20. Коростелева Е.Е. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: НИИЯФ МГУ, 2006. 115 с.
21. The Karlsruhe Extensive Air Shower Simulation Code CORSIKA // KfK Report 4998. Kernforschungszentrum. Karlsruhe, 1992.
22. Knapp J., Heck D. // KfK Report 4998. Kernforschungszentrum. Karlsruhe, 1998.
23. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1997. V. 52B. P. 17.