

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 3, Number 307 (2016), 110 – 116

UDC 539.1.52

INVESTIGATION OF EAS PARTICLES INTERACTION AT EXTREMELY HIGH ENERGIES AT ALTITUDE OF 3340 M. A.S.L.

E.G. Boos¹, A.M. Almenova¹, V.V. Zhukov², T.Kh. Sadykov¹,
A. Stepanov², Y.M. Tautayev¹

¹Institute of Physics & Technology, Almaty,

²P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow
aidana_alm@mail.ru

Keywords: Collider, air shower, hadron, cosmic rays, oscillogram, scintillation detectors.

Abstract. The purpose of this paper is to consider a new approach of estimating a primary energy of the giant air shower based on the radio-frequency radiation of electrons and positrons in the Earth's magnetic field. The advantages of the registration of the cosmic radio-frequency radiation in comparison with other methods are relative cheapness, simplicity of exploitation of the radio aeriels and independence of the radio registration of the giant air shower from the time of day and weather conditions.

УДК 539.1.52

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫСОТЕ 3340 МЕТРОВ НАД УРОВНЕМ МОРЯ

Э.Г. Боос¹, А.М. Альменова¹, В.В. Жуков², Т.Х. Садыков¹,
А. Степанов², Е.М. Таутаев¹

¹Физико-технический институт, Алматы,

²Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: коллайдер, широкий атмосферный ливень, Адрон, космические лучи, осциллограмма, сцинтилляционные детекторы.

Аннотация. В работе рассматривается новая методика оценки первичной энергии широких атмосферных ливней на основе радиоизлучения электронов и позитронов в магнитном поле земли. К числу преимуществ регистрации радиоизлучения космических лучей в сравнении с другими методами можно отнести относительную дешевизну и простоту эксплуатации радиоантенн, а также независимость радиорегистрации ШАЛ от времени суток и погодных условий.

Введение. Вся современная физика элементарных частиц выросла из физики космических лучей. Интерес к исследованиям космических лучей сверхвысоких энергий продиктован и тем обстоятельством, что в области энергий больше 10^{15} эВ обнаружен ряд эффектов, которые не объясняются в рамках Стандартной модели. С открытием гравитационных волн резко возросла роль астрофизики космических лучей, что связано с возможностью уточнить происхождение

космических частиц сверхвысоких энергий. Обнаруженные в космических лучах в последние годы необычные феномены можно объяснить появлением новых частиц либо новых механизмов взаимодействия. Перечислим основные эффекты, которые не укладываются в рамки Стандартной модели и появляются в области энергий больше 10^{15} эВ: проблема излома энергетического спектра в области энергий $3 \cdot 10^{15}$ эВ; обрезание спектра первичного космического излучения при $E_0 \cdot 10^{19}$ эВ; события типа бинокляр – двухструйные события с аномально большим поперечным импульсом; события с “галло”, которое обеспечивается плотностью потока энергии ~ 20 ТэВ/мм²; выстроенность вторичных частиц проявляющееся, как следы наиболее энергичных гамма-квантов или адронов вдоль прямой линии; длиннопробежные частицы проявляются как проникающие частицы, поглощение которых, заметно отличается от экспоненциальной зависимости.

Необходимо отметить, что обнаруженные аномальные события: выстроенность гамма-семейств, эксперимент на Памире [1] и двухструйные события, эксперимент на Тянь-Шане [2] подтвердили через 40 лет в экспериментах на Большом Адронном Колайдере (LHC) в ЦЕРНе [3,4].

Таким образом, в настоящее время в космических лучах при энергиях выше 10^{15} эВ наблюдается определенное число явлений в основном в области ствола (центра) широких атмосферных ливней (ШАЛ), не укладывающихся в рамках Стандартной модели при расчете ядерно-каскадного процесса в атмосфере. Возможно, что в потоке космических лучей при энергии выше 10^{15} эВ могут присутствовать необычные частицы, которые являются первопричиной наблюдаемых аномальных явлений в экспериментах с космическим излучением и которые из-за своих свойств не наблюдаются в экспериментах на ускорителях.

Поиск "новой физики" за пределами Стандартной модели, которая, как предполагают теоретики должна существовать при очень высоких энергиях, является одним из основных направлений исследований на самых мощных из существующих ускорителях-коллайдерах (RHIC и LHC), где изучаются взаимодействия частиц в составе встречных пучков, летящих внутри вакуумной трубы. Многие из экспериментов, проводимых и планируемых на этих коллайдерах (CASTOR/CMS, LHCf, ALICE ZDCs и др.), нацелены на проверку и детальное изучение обнаруженных в космических лучах новых явлений и процессов. Эксперименты с космическими лучами позволяют изучать частицы, рождающиеся преимущественно высоких энергиях. Таким образом, данные экспериментов с космическими лучами являются дополнительными по отношению к коллайдерным экспериментам и имеют огромное значение для построения всеобъемлющей картины о возможном изменении характера взаимодействий при сверхвысоких энергиях. В связи с этим возрастает значение экспериментов с космическими лучами. Успешно развивается эксперимент на Тибете на высоте 4000 метров над ур. моря [5], продолжается создание установки в Аргентине площадью более 5000 квадратных километров [6], где детекторы установлены в шахматном порядке. Увеличение площади установок диктуется исследованием частиц космического излучения со сверхвысокими энергиями 10^{18} эВ и выше.

В последнее время широко развивается новая методика оценки первичной энергии ШАЛ на основе радиоизлучения электронов и позитронов в магнитном поле земли. В настоящее время в мире работают две установки, нацеленные на изучение ШАЛ: CODALEMA во Франции в диапазоне частот 30–65 МГц [7] и LOPES в Германии в диапазоне 40–80 МГц [8]. По данным обоих экспериментов нижний порог регистрации радиоимпульсов от ШАЛ в диапазоне 10–100 МГц составляет $\sim 5 \cdot 10^{16}$ эВ.

К числу преимуществ регистрации радиоизлучения КЛ в сравнении с другими методами можно отнести относительную дешевизну и простоту эксплуатации радиоантенн, а также независимость радиорегистрации ШАЛ от времени суток и погодных условий, существенных для оптических излучений (ясные безлунные ночи составляют всего 10% астрономического времени). Известно также, что при регистрации оптического излучения Вавилова–Черенкова ШАЛ одним из источников неопределенности восстановления параметров ливня являются флуктуации величины коэффициента преломления земной атмосферы. В случае радиоизлучения на частотах < 100 МГц этими флуктуациями можно пренебречь, поскольку соответствующие ошибки значительно меньше ошибок измерения поля радиоизлучения [7]. Возобновление экспериментальных работ [7, 8] стимулировали также и теоретические исследования радиоизлучения атмосферных ливней, что позволило выбрать наиболее эффективные радиочастоты регистрации ШАЛ [9].

Описание установки по регистрации широких атмосферных ливней

На экспериментальной площадке Евразийского высокогорного научного центра космических лучей (ЕВНЦКЛ), расположенном вблизи Алматы на высоте 3340 метров над уровнем моря, создана установка для исследования ШАЛ. Установка предназначена для исследования энергетического спектра, ядерного состава и направлений прихода первичного космического излучения при энергиях $E_0 > 10^{16}$ эВ, а также взаимодействий первичного космического излучения с ядрами атомов воздуха при энергиях $E_0 > 10^{17}$ эВ, посредством регистрации с наносекундными точностями временной структуры ШАЛ на различных расстояниях от оси ливня.

Установка состоит из семи пунктов регистрации, координаты которых приведены в таблице.

№ пункта	X, м	Y, м	Z, м	R, м
1	0	0	0	–
2	– 445.9	–85.6	2.8	454.0
3	384.9	79.5	36.1	393.0
4	– 55.0	– 94.0	31.1	113.3
5	– 142.4	36.9	–12.6	147.6
6	151.2	– 17.9	31.3	155.4
7	88.6	178.4	–39.0	194.2

За центр установки принят геодезический репер, расположенный в пункте 1 на высоте 3346 м над уровнем моря и имеющий географические координаты $43^{\circ}15'$ северной широты, $76^{\circ}57'$ восточной долготы. Начало системы координат установки находится в центре установки, ось X направлена на север, ось Z – вертикально вверх.

Сцинтилляционные детекторы установки. В каждом пункте регистрации размещено по три СЦ-детектора под углом 90° друг к другу. Это обеспечивает угловую изотропию регистрации заряженных частиц в диапазоне зенитных углов от 0 до 90° и азимутальных углов от 0 до 360° .

В каждом СЦ-детекторе используется пластический сцинтиллятор из полистирола площадью 1 м^2 , толщиной 5 см. Вспышки света в сцинтилляторе регистрируются фотоэлектронным множителем ФЭУ-65. Положение фронта импульса регистрируется с точностью не хуже 5 нс, ширина импульса на полувысоте амплитуды регистрируется с точностью не хуже 10 нс.

Оптическая система установки. В центре установки расположена оптическая установка для регистрации излучения Вавилова-Черенкова при прохождении ШАЛ. Оптическая часть установки содержит три параболических зеркала диаметром 150 см и фокусным расстоянием 65 см. В центре зеркал имеется заводская метка в виде креста, которая используется при юстировке. Зеркала смонтированы на поворотном устройстве. Поворотное устройство обеспечивает возможность направлять оси зеркал в пределах зенитных углов от 0е до 85е и азимутальных углов от 0 до 360° . В результате проведенной юстировки было определено положение поворотного устройства, которое соответствует нулю шкалы зенитных углов. В этом положении поворотного устройства оси зеркал направлены вертикально. Оси зеркал параллельны друг другу с точностью $\pm 0.2\text{е}$. Юстировка каждого зеркала состояла в нахождении местоположения точки фокуса и размещении в этой точке центра входного окна фотоэлектронного умножителя ФЭУ-49Б. Диаметр фотоэлектронного умножителя ФЭУ-49Б равен 15 см. При фокусном расстоянии зеркала равном 65 см это угол видения зеркала 13° . Параметры ШАЛ определяются посредством измерения временных характеристик заряженных частиц и излучения Вавилова-Черенкова в каждом ливне с наносекундными точностями на различных расстояниях от оси ливня.

Радиоантенна для регистрации ШАЛ. Радиоизлучение ШАЛ имеет достаточно широкий частотный диапазон: от нескольких герц до сотен мегагерц, что позволяет выбрать наиболее приемлемую область частоты, сведя к минимуму влияние техногенных помех. Как наиболее удачный был выбран диапазон 40 - 80 МГц [9]. Была создана кросс-поляризованная аперийодическая рамочная антенна диаметром 60 см., типа SALLA. Эта антенна имеет по

сравнению с дипольными и другими стандартными антеннами самые низкие погрешности калибровки, вес, затраты материала и время изготовления, наименьший размер, и высокую надежность. Она имеет хороший охват неба по величине зенитных углов до 70° .

Обрезание шумового спектра производится полосовым фильтром с усилителем с коэффициентом усиления 37 дБ. В качестве регистратора аналоговых импульсов, приходящих на антенну, используется двухканальный цифровой осциллограф с 8-битным аналого-цифровым преобразователем. Данная конструкция была выбрана как наиболее простая в изготовлении, эффективная в изучаемой области и позволяющая быстро построить на ее базе недорогую станцию регистрации космических лучей с энергией выше $5 \cdot 10^{17}$ эВ см. рис.1. Диаграмма направленности антенны для вертикальной плоскости и частоты 50 МГц показана на рис.3. Антенна расположена параллельно указанной плоскости.

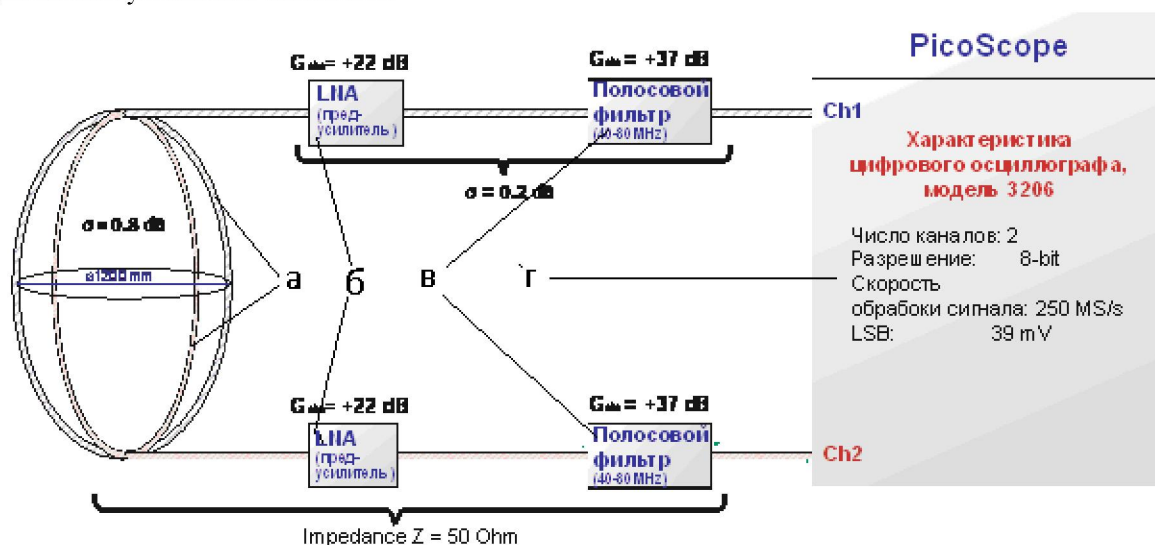


Рисунок 1 – Схема электроники для регистрации радиоизлучения ШАЛ.

а) две дипольные антенны диаметром 1200 мм, б) предусилители, в) полосовой фильтр-усилитель, г) двухканальный цифровой PCI осциллограф PicoScope 3206.

Система управления и регистрации установки. Сцинтилляционные детекторы, расположенные в пунктах регистрации 1–7, представляют собой пластиковые сцинтилляторы размером $100 \times 100 \times 5$ см с фотоэлектронными умножителями ФЭУ-49, заключенными в светонепроницаемый корпус. Расстояние между центром установки (пункт 1) и периферийными пунктами составляет от 110 до 460 м, что позволяет регистрировать ШАЛ с энергиями первичных частиц от 10^{14} до $5 \cdot 10^{17}$ эВ. В перспективе предполагается включить в состав установки три дополнительных пункта 8–10, расположенных на расстояниях от 450 до 800 м; это расширит диапазон регистрации по энергиям ШАЛ до $5 \cdot 10^{18}$ эВ.

Сигнал с анода ФЭУ каждого из детекторов СЦ1–СЦ8 подается на вход АЦП CAEN DT5730, см. рис.3. Частота оцифровки 500 МГц позволяет восстанавливать ось ливня с точностью не хуже 0.5° . Одновременно с этим сигнал подается на вход усилителя-формирователя со следящим порогом, формирующего по переднему фронту сигнала ФЭУ прямоугольный импульс малой длительности.

С формирователя со следящим порогом (ФСП) импульсы подаются на вход формирователя триггерного сигнала (мастер-блок). Первый импульс, пришедший в мастер-блок, открывает временные ворота длительностью 800 нс. Триггер формируется при условии, что за время, когда временные ворота открыты, в мастер-блок придет заранее заданное число импульсов. Число это, от 1 до 7, определяется нижним порогом регистрируемой энергии ливня. Упрощенно это можно представить как схему совпадения (от двукратных до восьмикратных), но совпадений не

одновременных, а растянутых на длительность временных ворот. Временная диаграмма работы мастер-блока для четырехкратного совпадения приведена на рис. 3.

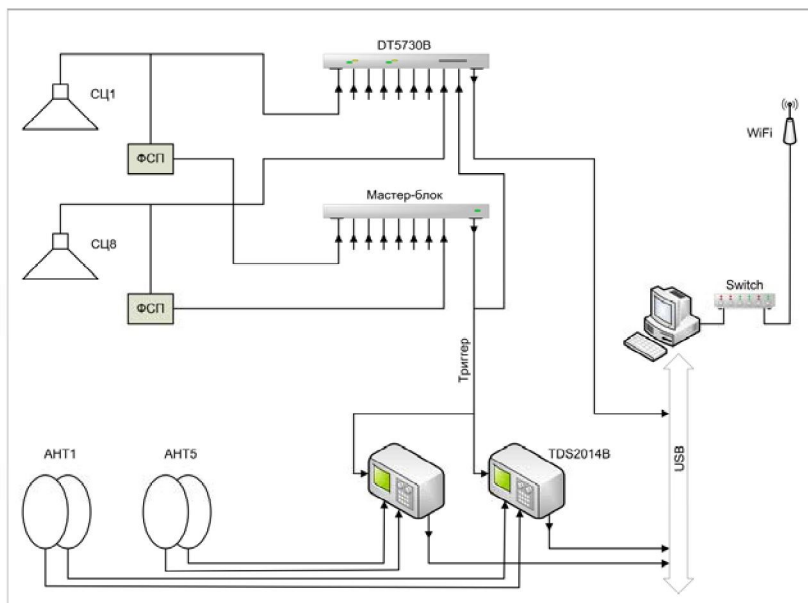


Рисунок 2 – Система регистрации установки «Горизонт-Т»

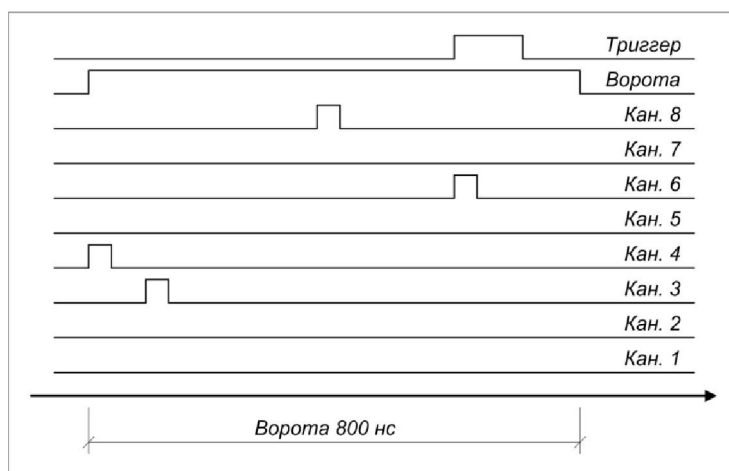


Рисунок 3 – Временная диаграмма работы мастер-блока для четырехкратного совпадения.

Временные ворота открываются здесь импульсом в 4-м канале. Сформированный мастер-блоком триггер используется для запуска процесса регистрации. До окончания процесса регистрации события мастер-блок остается невосприимчивым к каким-либо внешним событиям. Антенны для регистрации радиоизлучения ШАЛ установлены в пунктах 1–5; каждая из них соединена с центром регистрации парой кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом. В настоящее время работает радиоантенна установленная в пункте 1. Кабели подключены ко входам четырехканальных цифровых запоминающих осциллографов Tektronix TDS 2014B; используются 3 прибора.

АЦП и осциллографы через USB-интерфейс подключены к управляющему компьютеру, в число функций которого входят начальная инициализация приборов, считывание с них информации сохранение ее на жестких дисках – локальном и диске сервера.

Регистрация события происходит следующим образом. Триггер, сгенерированный мастер-блоком, подается на входы внешнего запуска АЦП DT5730 и осциллографов TDS 2014B; запись оцифрованных сигналов в память приборов останавливается. Программа регистрации считывает данные из памяти приборов в оперативную память управляющего компьютера и формирует кадр, формат которого включает в себя дату и время события, номера сеанса и кадра, данные с СЦ детекторов, служебную информацию. Далее кадр записывается в файлы сеанса и последнего кадра, расположенные на локальном диске, а на экран дисплея выдается краткая информация о последнем событии. Одновременно с этим на файловый сервер ТШВНС через локальную сеть передается файл последнего кадра, после обработки которого на web-сервере формируется страница, содержащая краткую информацию о событии и графики, соответствующие зарегистрированным сигналам.

К настоящему времени на установке «Горизонт-Т» зарегистрировано 48 событий с радиоизлучением в области энергий $5 \cdot 10^{16} - 10^{17}$ эВ. На рис.4 показана осциллограмма радиосигнала от ШАЛ. на выходе аналогового сигнала.

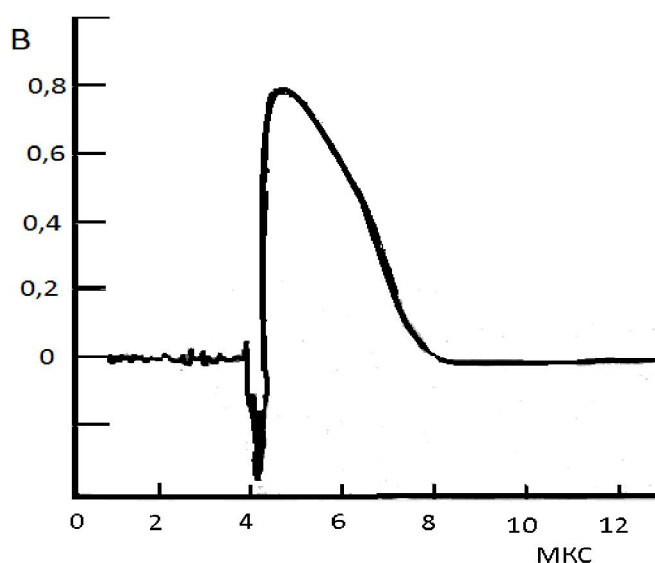


Рисунок 4 – Осциллограмма радиосигнала от ШАЛ. на выходе аналогового сигнала

Заключение. Проект направлен на получение новых экспериментальных и данных по регистрации радиоизлучения от широких атмосферных ливней с энергией 10^{17} эВ для последующего использования метода в качестве альтернативного или дополнительного метода регистрации ШАЛ. Тянь-Шаньская установка обладает определенными преимуществами по сравнению с аналогичными устройствами, поскольку детекторы станции регистрируют все три основные компоненты ШАЛ: электронно-фотонную и мюонную компоненты, а также черенковское излучение. Это позволяет получать экспериментальные данные, имеющие большую информативность и надежность. Возможность регистрации ШАЛ несколькими методами позволит надежно определить форму импульса ШАЛ при различных энергиях, регистрировать угла прихода и наклона диска ШАЛ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. T. Baradzei et al. [Pamir Collaboration], Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 50N11, 46 (1986) [Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz. 50, 2125 (1986)]; MGU-89-67-144 (1989).
- [2] Ж.С. Такибаев, Т.Х. Садыков Парное образование пионных кластеров в области энергий 25 ТэВ. Изв АН КазССР. Серия Физико-математическая. N4, Стр.15-19.
- [3] PHOBOS Collaboration, “System Size Dependence of Cluster Properties from Two-Particle Angular Correlations in Cu+Cu and Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV”, Phys.Rev. C81. (2010) 024904, arXiv:0812.1172. doi:10.1103/PhysRevC.81.024904

- [4] The CMS Collaboration CERN-PH-EP/2010-031 /Observation of Long-Range, Near-Side Angular Correlations in Proton-Proton Collisions at the LHC / arXiv:1009.4122v1 [hep-ex] 21 Sep 2010
- [5] B. Bartoli et al., ARGO-YBJ Collaboration, Phys. Rev. D91, 112017 (2015)
- [6] Pierre Auger Collaboration, A. Aab et al., Astrophys. J. 760 (2012) 148.
- [7] D.A. ARDOUIN, A. BELLETOILE, D. CHARRIER et al. «Radio-detection signature of high-energy cosmic rays by the CODALEMA experiment» / Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2005. 555. P. 148–163.
- [8] A. NIGL, W.D. APEL, J.C. ARTEAGA et al. «Frequency spectra of cosmic ray air shower radio emission measured with LOPES» / Astropart. Phys. 2008. 26. P. 807–817.
- [9] Huege, T. Simulations and theory of radio emission from cosmic ray air showers. In Proceedings of the ARENA 2008 conference, Rome, Italy, Nuclear Methods in Physics Research A, volume 604, S57–S63.

REFERENCES

- [1] L. T. Baradzei et al. [Pamir Collaboration], Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 50N11, 46 (1986) [Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz. 50, 2125 (1986)]; MGU-89-67-144 (1989).
- [2] Zh.S. Takibaev, T.H. Sadykov Parnoe obrazovanie pionnykh klasterov v oblasti jenergij 25 TjeV. Izv AN KazSSR. Serija Fiziko-matematicheskaja. N4, Str.15-19.
- [3] PHOBOS Collaboration, “System Size Dependence of Cluster Properties from Two-Particle Angular Correlations in Cu+Cu and Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV”, Phys.Rev. C81. (2010) 024904, arXiv:0812.1172. doi:10.1103/PhysRevC.81.024904
- [4] The CMS Collaboration CERN-PH-EP/2010-031 /Observation of Long-Range, Near-Side Angular Correlations in Proton-Proton Collisions at the LHC / arXiv:1009.4122v1 [hep-ex]. 21 Sep 2010
- [5] B. Bartoli et al., ARGO-YBJ Collaboration, Phys. Rev. D91, 112017 (2015)
- [6] Pierre Auger Collaboration, A. Aab et al., Astrophys. J. 760 (2012) 148.
- [7] D.A. ARDOUIN, A. BELLETOILE, D. CHARRIER et al. «Radio-detection signature of high-energy cosmic rays by the CODALEMA experiment» / Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2005. 555. P. 148–163.
- [8] A. NIGL, W.D. APEL, J.C. ARTEAGA et al. «Frequency spectra of cosmic ray air shower radio emission measured with LOPES» / Astropart. Phys. 2008. 26. P. 807–817.
- [9] Huege, T. Simulations and theory of radio emission from cosmic ray air showers. In Proceedings of the ARENA 2008 conference, Rome, Italy, Nuclear Methods in Physics Research A, volume 604, S57–S63.

ТЕҢІЗ ДЕНГЕЙІНЕН 3340 МЕТР БИҚТІКТЕ РАДИОСӘУЛЕЛЕНУ ӘДІСІМЕН ҒАРЫШ СӘУЛЕСІНІҢ БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ӘРЕКЕТТЕСТІГІН ЗЕРТТЕУ

Э.Г. Боос¹, А.М. Әлменова¹, В.В. Жуков², Т.Х. Садыков¹, А. Степанов², Е.М. Таутаев¹

¹Физика-техникалық институты, Алматы,

² П.Н. Лебедев атындағы физикалық институты РФА, Мәскеу, Ресей

Түйін сөздер: коллайдер, кең атмосфералық нөсер, адрон, ғарыштық сәулелер, осциллограмма, сцинтилляциялық детекторлар.

Аннотация. Жұмыста жердің магниттік өрісінде электрондар және позитрондардың радиосәулелену негізінде кең атмосфералық нөсерлердің бастапқы энергиясын бағалаудың жаңа әдісі қарастырылады. Басқа әдістермен салыстырғанда ғарыш сәулелерінің радиосәулеленуін тіркеу артықшылығына радиоантеннаның біршама арзан және пайдалануға оңай болатынын, сондай-ақ КАН-ның радиотіркеуінің тәулік уақытына және ауа райы жағдайына тәуелсіз екенін жатқызуға болады.

Поступила 17.06.2016 г.