

# МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ ПОЛУСЕКТОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА MPD/NICA НА МЮОНАХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

*М. Бхаттачарджи*<sup>1,2</sup>, *В. М. Барышников*<sup>1</sup>, *П. А. Бахтин*<sup>3</sup>,  
*С. А. Булычёв*<sup>4</sup>, *Б. Дабровска*<sup>5</sup>, *Г. Е. Фоменко*<sup>3</sup>,  
*Ю. Ф. Кречетов*<sup>1</sup>, *В. В. Куликов*<sup>4,\*</sup>, *М. А. Мартемьянов*<sup>4</sup>,  
*М. А. Мацюк*<sup>4</sup>, *А. Ю. Семенов*<sup>1</sup>, *И. А. Тяпкин*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Gauhati University, Guwahati, Assam, India

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

<sup>4</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

<sup>5</sup> Plovdiv University “Paisii Hilendarski”, Plovdiv, Bulgaria

Строящийся 60-т цилиндрический электромагнитный калориметр установки MPD проекта NICA диаметром 3,45 м и длиной 6 м собирается из 50 полусекторов, каждый из которых содержит 768 башен типа «шашлык» разных типоразмеров и разной пространственной ориентации. Предлагаются методы калибровки башен полусекторов с использованием космических мюонов, проходящих как вдоль, так и поперек осей башен. Представлены результаты опробования этих методов на первом изготовленном полусекторе.

The 60-t cylindrical electromagnetic calorimeter of the MPD detector of the NICA project with a diameter of 3.45 m and a length of 6 m under construction is assembled from 50 half-sectors, each of which contains 768 “shashlyk”-type towers of different sizes and different spatial orientations. We propose methods for calibrating half-sector towers using cosmic muons passing both along and across the tower axes. The results of testing these methods on the first half-sector are presented.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

## ВВЕДЕНИЕ

В рамках международного проекта NICA [1, 2] в ОИЯИ создается многоцелевой детектор MPD для работы на тяжёлоионном коллайдере в диапазоне энергий  $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11$  ГэВ. Целью проекта является изучение горячей и плотной ядерной материи и процесса перехода адронной материи в кварк-глюонную плазму. Одними из основных пробников образования кварк-глюонной плазмы являются электрон-позитронные пары

---

\* E-mail: kulikov@itep.ru

и прямые фотоны, которые будут регистрироваться электромагнитным калориметром (ЭК) [3, 4]. Этот сегментированный калориметр занимает цилиндрическую область MPD с внутренним (внешним) диаметром 3,45 (4,6) м и длиной 6 м. ЭК содержит 38 400 башен типа «шашлык» [5]. Башни представляют собой 210 чередующихся пластин сцинтиллятора на основе полистирола толщиной 1,5 и 0,3 мм свинца, покрытого светоотражающей краской. Башни имеют форму, близкую к усеченной пирамиде с основаниями  $4 \times 4$  и  $3,3 \times 3,3$  см и высотой 41,5 см. Сбор света на кремниевый ФЭУ (МРРС Hamamatsu S13360-6025PE) площадью  $6 \times 6$  мм осуществляется с помощью 16 спектросмещающих волокон Kugaгау Y-11(200) диаметром 1,2 мм, проходящих через отверстия в пластинках. Оси всех башен направлены в точку пересечения пучков коллайдера. Для реализации такой проективной геометрии [6, 7] потребовалось изготовление башен 64 типоразмеров. Два ряда по 8 башен склеиваются в модули 8 типов. 6 рядов по 8 модулей в каждом вклеиваются в стеклопластиковую корзину, образуя полусектор длиной 3 м, содержащий 768 башен. По 25 полусекторов вдвигаются в цилиндрическую опорную конструкцию ЭК с противоположных сторон. Модули изготавливались в России и Китае и проходили тестирование в ОИЯИ [8–11]. Статья посвящена разработке методики калибровки башен полусектора и ее опробованию на первом собранном полусекторе.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ КАЛОРИМЕТРОВ**

Калибровка башен калориметра необходима для установления связи их отклика, часто выражаемого в единицах ADC, с энергосвободением в сцинтилляторах, часто представляемым в мегаэлектронвольтах. Для этих целей в физике высоких энергий широко используются релятивистские мюоны космических лучей. Трудности возникают, когда поперечные размеры башен малы и калибровка башен в вертикальном положении мюонами, проходящими вдоль осей башен, становится чрезвычайно времязатратной. Традиционным путем преодоления этих трудностей является калибровка башен в горизонтальном расположении с использованием в качестве характерного размера поперечного размера башни. Этот путь удобен и многократно использовался [12, 13] для башен прямоугольной формы. Для ЭК/MPD ситуация более сложная, так как необходимо откалибровать полусектор, собранный из башен непрямоугольной формы, имеющих 64 разных типоразмера, и, кроме того, ориентация осей башен относительно вертикали меняется от 0 до  $57^\circ$ .

Но есть и два преимущества. Первое — это электроника считывания, разработанная специально для ЭК в ОИЯИ. Каждые 4 модуля в формате  $2 \times 2$  оснащены платой ADC64ECAL, которая записывает сигналы с 64 башен либо по внешнему триггеру, либо по самотриггеру на превышение сигналом заданного порога хотя бы от одной башни.

Самотриггер позволяет регистрировать проходящие через башни заряженные частицы, что позволяет работать с мюонами космических лучей без использования внешних детекторов. И второе — большое число башен в полусекторе, которые калибруются одновременно. Это открывает возможность калибровки на продольных мюонах, проходящих вдоль оси башни, что дает наиболее точную и фиксированную величину энерговыделения в сцинтилляторах башен. Тем не менее этот метод не лишен недостатков. Это длительное время набора данных, повышенный фон для крайних башен, невозможность использования этого метода в полностью собранном калориметре для горизонтально расположенных башен. Поэтому целесообразно рассмотреть и другой подход, опирающийся на прохождение мюонов через несколько башен. Этот метод новый. Он опирается на ожидаемый пик энерговыделения в сцинтилляторах башен, близкий к определяемому их поперечным размером, с максимумом при 5–7 МэВ. Определение параметров энерговыделения может быть осуществлено точным моделированием. С этой целью геометрическое описание полусектора было точно скопировано из геометрического описания ЭК [4, 7], а прохождение космических мюонов моделировалось Geant4 в среде mpdroot с использованием генератора космических мюонов в параметризации [14].

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ

Рассмотрим сначала регистрацию «поперечных» мюонов с использованием отбора по множественности ( $M$ ) сработавших башен. Для определенности будем использовать  $M \geq 4$  и обозначать как  $M4$ . Распределения событий по энерговыделению  $E$  в сцинтилляторах башен при таком отборе приведены на рис. 1 для крайних башен в области их вертикального расположения ( $a$ ) и для башен с большим углом к вертикали ( $b$ ). Распределения хорошо описываются функцией  $F(E)$ , являющейся сверткой функции  $f(E)$  и функции Гаусса с параметром  $\sigma$ , где  $f(E) = A + B \times E$  при  $E < d$  и  $f(E) = C \exp(-D(E - d))$  при  $E > d$ . Свободными параметрами аппроксимации являются  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $d$  и  $\sigma$ . Положение максимума  $F(E)$  принимается за характерное энерговыделение для данной башни и обозначается  $E_{\max}$ . Эта величина равна 6,8 МэВ для башни рис. 1,  $a$  и уменьшается до 5,8 МэВ для башни рис. 1,  $b$ . Разница в этих величинах связана с различным угловым захватом космических мюонов относительно осей башен. На рис. 2 для башен, аналогичных представленным на рис. 1, приведены распределения событий по энерговыделению при отборе «продольных» мюонов, проходящих вдоль осей башен и отбираемых по множественности сработавших башен  $M = 1$ , обозначаемой в дальнейшем  $M1$ . Распределения аппроксимируются суммой экспоненты и функции Гаусса. Средние величины гауссианов  $E_{\max}$  для обоих распределений, как и ожидалось, одинаковы

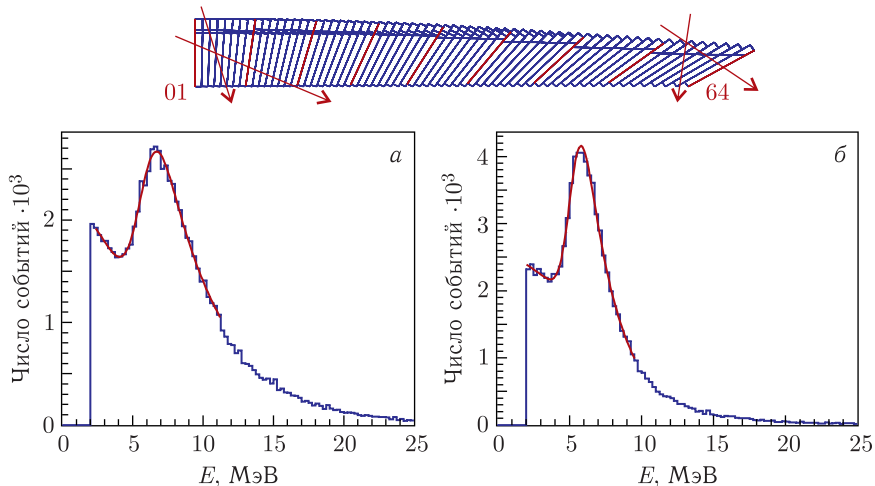


Рис. 1. Моделирование. Распределения по выделенной энергии ( $E$ ) в сцинтилляторах башен космическими мюонами при отборе по множественности сработавших башен  $M4$ : *a*) для области башен с почти вертикальной ориентацией; *б*) с большим углом к вертикали. Вверху — примеры треков мюонов в этих областях показаны стрелками на проекции полусектора

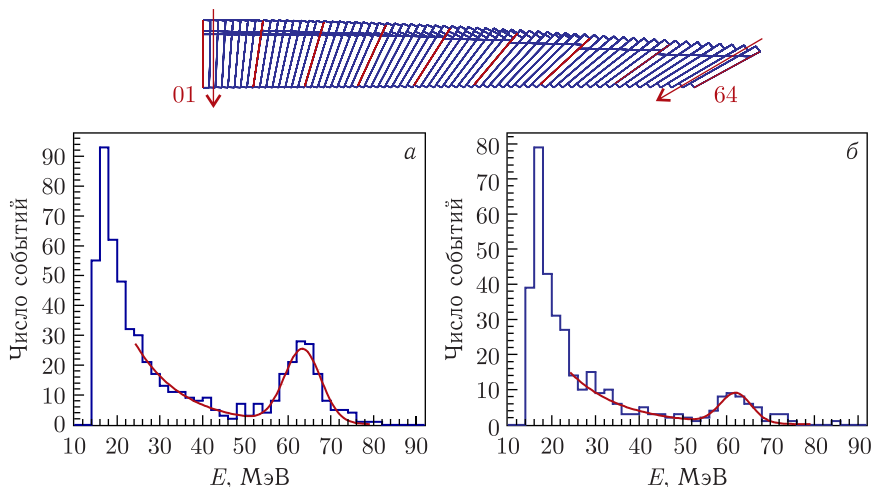


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для отбора  $M1$

в пределах ошибок. Число событий в гауссиане на рис. 2, *a* примерно в 3 раза больше, чем на рис. 2, *б*, что хорошо согласуется с угловым распределением космических мюонов  $\sim \cos^2 \theta$ , где  $\theta$  — зенитный угол. На рис. 3 приведены зависимости  $E_{\max}$  от номера башни в ряду полусек-

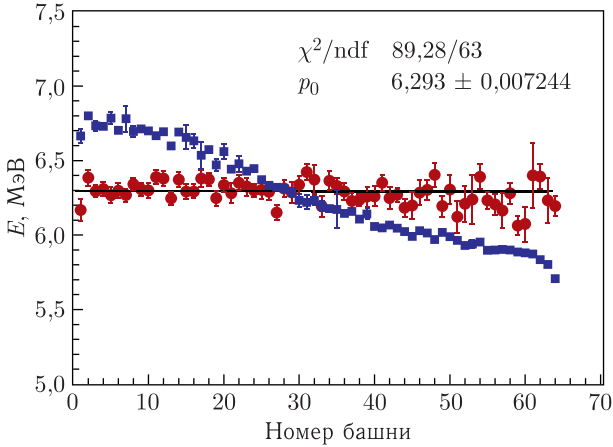


Рис. 3. Моделирование. Зависимость  $E = E_{\max}$  от номера башни в полусекторе для отбора  $M4$  (квадраты) и  $E = E_{\max}/10$  для  $M1$  (кружки)

тора, номер 1 для крайней башни с вертикальным расположением, номер 64 для башни с максимальным углом наклона к вертикали. Значения  $E_{\max}$  для  $M1$  поделены на 10. Среднее значение  $E_{\max} = 62,93(7)$  МэВ, что ожидаемо несколько больше, чем минимальные ионизационные потери энергии мюона в 315 мм сцинтиллятора с плотностью  $1,023 \text{ г/см}^3$ , равные 62,38 МэВ [15]. Для  $M4$   $E_{\max}$  равномерно уменьшается при увеличении номера башни, но надежно вычисляется при моделировании, что позволяет использовать эти энерговыделения для калибровки башен.

## ОПРОБИРОВАНИЕ МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ НА ИЗМЕРЕНИЯХ С ПОЛУСЕКТОРОМ

На рис. 4 приведены результаты измерений с первым полусектором, аналогичные приведенным выше результатам моделирования. Аппроксимация производилась теми же функциями, но по оси ординат откладывалась величина отклика башни в единицах ADC, которая случайно близка к используемой при моделировании. Рис. 4, а для «продольных» мюонов с отбором  $M1$  аналогичен рис. 2, а для моделирования. Время набора данных составляло 44 ч. Фон здесь значительно больше, что связано с вкладом шумовых импульсов с большой амплитудой. Тем не менее гауссовский вклад «продольных» мюонов выделяется надежно, и точность определения  $E_{\max}$ , даваемая фитом, находится на уровне 1% при зарегистрированных примерно 100 продольных мюонах. Для получения такой же точности для башен, расположенных под большим углом к вертикали, требуется в 3 раза более длительный набор данных масштаба 5 сут. Рис. 4, б для «поперечных» мюонов с отбором  $M4$  аналогичен

рис. 1, *а* для моделирования. Время набора данных здесь составляло 12 ч и точность в  $E_{\max}$ , даваемая фитом, находится на уровне 1%. На рис. 4, *б* дополнительно приведены распределения для нескольких отборов по множественности от  $M2$  до  $M8$ . Видно, что увеличение множественности практически не меняет формы распределений, а только уменьшает число событий. Это характеризует использованный отбор  $M4$  как достаточно оптимальный.

Сравнение методов  $M1$  и  $M4$  приведено на рис. 5 для башен, подключенных к ADC1. Нумерация башен в ADC1 отличается от их нумерации в полусекторе. В ADC1 64 башни сгруппированы в 4 ряда по 16 в каждом и нумерация идет последовательно ряд за рядом. В рамках моделирова-

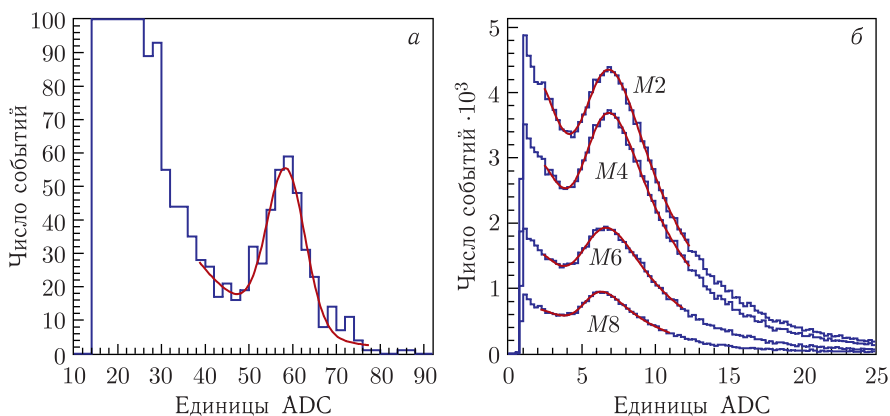


Рис. 4. Результаты измерений. *а*) Аналог рис. 2, *а*; *б*) аналог рис. 1, *а*

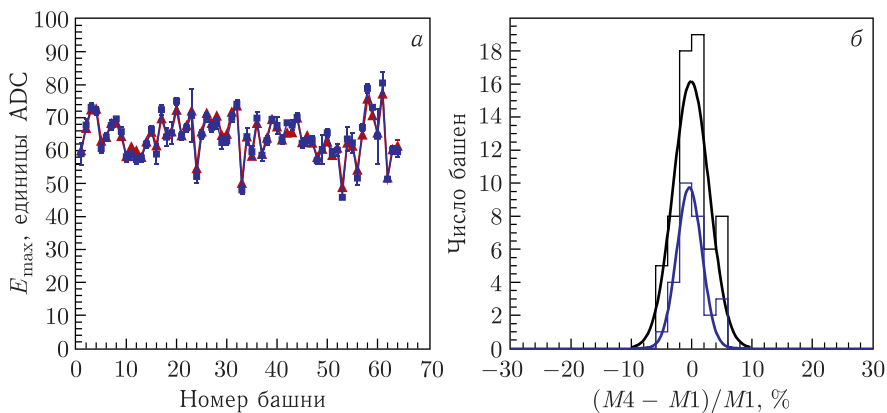


Рис. 5. Сравнение измерений методами  $M1$  и  $M4$  на примере 64 башен одного ADC1. *а*) Зависимость  $E_{\max}$  от номера башни в ADC1 для  $M1$  (треугольники), для  $M4$  (квадраты). *б*) Относительная разность методов, см. текст

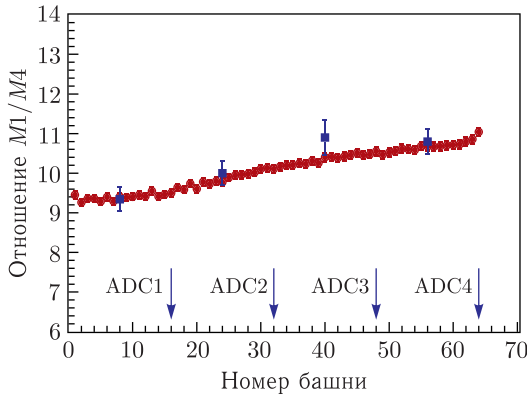


Рис. 6. Сравнение отношений величин  $E_{\max}$  для методов  $M1$  и  $M4$  для башен полусектора. Кружки — моделирование; квадраты — измерения

ния башни в рядах полностью идентичны и соответствуют 16 башням в нумерации полусектора. Четыре ADC регистрируют сигналы от башен в 4 рядах по 64 башни в полусекторе. На рис. 5, а приведены величины  $E_{\max}$  для методов  $M1$  и  $M4$ .  $E_{\max}$  для  $M4$  умножены на постоянный коэффициент 9,34, зануляющий среднюю разность между методами. Видно хорошее согласие между этими методами. На рис. 5, б приведена относительная разность этих методов для каждой башни в процентах. Описание этой разницы гауссианом дает параметр  $\sigma = 2,8\%$  для всех 64 башен ADC1. Для башен, окруженных со всех сторон несработавшими башнями в рамках ADC1, эта величина уменьшается до 2,0%. Это хороший результат для ЭК, так как его энергетическое разрешение для фотонов с энергией 1 ГэВ составляет 4,5%. На рис. 6 приводится сравнение отношений величин  $E_{\max}$  для башен полусектора, полученных этими двумя методами, в результате моделирования и по экспериментальным данным. Данные моделирования приведены для каждой башни, экспериментальные данные усреднены по башням, связанным с каждым из четырех ADC. Видно хорошее согласие результатов моделирования с экспериментальными данными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для электромагнитного калориметра установки МРD проекта NICA предложено и опробовано на моделировании и предварительных измерениях два метода калибровки башен на космических мюонах. Первый метод  $M1$  является традиционным, он основан на регистрации мюонов, проходящих параллельно оси башни ЭК. Этот метод чрезвычайно затратен, но одновременная калибровка сразу всех 768 башен полусектора делает этот метод реалистичным. Второй метод  $M4$  — новый,

он на порядок быстрее и основан на регистрации мюонов, проходящих под большим углом к оси башни, отбираемых по множественности сработавших башен. Хотя отклики башен зависят как от их различных поперечных размеров, так и от их ориентации, тем не менее показано, что использование точного моделирования позволяет учесть эти эффекты и использовать этот метод для калибровки башен полусектора. Более того, этот метод применим для любой ориентации башен и может быть использован для контроля временной стабильности калибровок полностью собранного ЭК.

Работы, проведенные сотрудниками НИЦ КИ, выполнялись в рамках госзадания НИЦ «Курчатовский институт». П. А. Бахтин, В. В. Куликов, М. А. Мартемьянов., М. А. Мацюк и Г. Е. Фоменко благодарны за поддержку в рамках «Программы ОИЯИ целевого финансирования научно-исследовательских работ научных групп, сотрудничающих в рамках мегапроекта «Комплекс NICA», за период 15.04.2023–15.10.2023».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V. D.* Heavy Ion Collisions: Baryon Density Frontier // *Phys. Part. Nucl.* 2018. V. 49. P. 457–472.
2. *Abgaryan V. et al. (MPD Collab.)*. Status and Initial Physics Performance Studies of the MPD Experiment at NICA // *Eur. Phys. J. A.* 2022. V. 58. P. 140–208; arXiv:2202.08970 [physics.ins-det].
3. *Semenov A. Yu. et al.* Electromagnetic Calorimeter for MPD Spectrometer at NICA Collider // *J. Instrum.* 2020. V. 15. P. C05017; arXiv:2002.07709 [physics.ins-det].
4. *Kulikov V. V. et al.* ECAL MPD: Geometry and Simulation // *J. Instrum.* 2020. V. 15. P. C09017.
5. *Li Y. et al.* A Shashlyk Electromagnetic Calorimeter System for NICA-MPD // *Ibid.* No. 11. P. C11007.
6. *Basylev S. et al.* Projective Geometry for the NICA/MPD Electromagnetic Calorimeter // *J. Instrum.* 2018. V. 13. P. C02030.
7. *Dabrowska B. et al.* MC Simulation Results for Projective Geometry Version of MPD ECAL at NICA Collider // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2019. V. 204. P. 07015.
8. *Yulei Li et al.* Beam Test Results of Two Shashlyk ECal Modules for NICA-MPD // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2020. V. 958. P. 162833.
9. *Bhattacharjee M. et al.* Calibration of NICA-MPD Electromagnetic Calorimeter Modules with Cosmic Muons // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1690. P. 012052.
10. *Baskov V. A. et al.* Electron Beam Test of the MPD Electromagnetic Calorimeter on the Pakhra Synchrotron // *Phys. Part. Nucl.* 2021. V. 52. P. 663–668.
11. *Li Y. et al.* Production and Quality Control of NICA-MPD Shashlyk Electromagnetic Calorimeter in Tsinghua University // *J. Instrum.* 2022. V. 17. P. T04005.
12. *Bakken J. A. et al.* High-Energy Cosmic Muons and the Calibration of the L3 Electromagnetic Calorimeter // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1989. V. 275. P. 81–88.



13. *Panova A. D. et al.* Measuring the Deposited Energy by the Scintillation Calorimeter in the ATIC Experiment // *Instrum. Exp. Tech.* 2008. V. 51. P. 665–681.
14. *Shukla P., Sankrith S.* Energy and Angular Distributions of Atmospheric Muons at the Earth // *Intern. J. Mod. Phys. A.* 2018. V. 30. P. 1850175; arXiv:1606.06907 [hep-ph].
15. *Groom D. E., Mikhova N. V., Striganov S. I.* Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV – 100 TeV // *Atom. Data Nucl. Data Tabl.* 2001. V. 78. P. 183–356.