

ТЕСТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ДАННЫХ С ECal/MPD

*М. А. Мартемьянов^{1,2,*}, В. М. Барышников³,
С. А. Булычёв¹, М. Бхаттачарджи^{3,4}, Ю. Ф. Кречетов³,
В. В. Куликов^{1,2}, А. А. Куликовская^{1,2}, М. А. Мацюк^{1,2},
А. Ю. Семенов³, И. А. Тяпкин³*

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴ Университет Гаухати, Гаухати, Ассам, Индия

Одной из важных подсистем эксперимента MPD является цилиндрический электромагнитный калориметр ECal, состоящий из 50 полусекторов, каждый из которых имеет 768 ячеек (башен) различных типов, и пространственной ориентации. Для калибровки башен полусекторов на мюонах космических лучей была разработана методика, применимая для его горизонтального расположения. Однако в полностью собранном калориметре полусектора располагаются на поверхности горизонтального цилиндра в разных положениях относительно вертикали. В данной работе представлено влияние вращения полусектора на калибровочные коэффициенты как для экспериментальных данных, так и для моделирования. Показано, что моделирование, базирующееся на современных параметризациях потока мюонов космических лучей, хорошо соответствует экспериментальным данным. Обсуждается влияние углового распределения потока мюонов на точность калибровки.

One of the significant part of MPD experiment is the electromagnetic calorimeter ECal consisting of 50 half-sectors, each of them has 768 cells (towers) of different types and spatial orientations. During the calibration process on cosmic muons, a technique was developed that is applicable to its horizontal arrangement. However, in a fully assembled calorimeter the half-sectors are located on the surface of horizontal cylinder in different positions relative to the vertical. This work presents the effect of half-sector rotation on the calibration coefficients for both experimental data and simulation. It is shown that simulations based on modern parameterizations of the cosmic-ray muon flux agree well with experimental data. The influence of angular distribution of the muon flux on the calibration accuracy is discussed.

PACS: 07.20.Fw; 96.50.sb

* E-mail: mmartemi@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

В рамках международного проекта NICA [1] в ОИЯИ создается многоцелевой детектор MPD [2] для работы на тяжелоионном коллайдере. Одной из подсистем детектора является цилиндрический электромагнитный калориметр (ECal). Он занимает цилиндрическую область в MPD и содержит 38 400 башен типа «шашлык», набранных из чередующихся 210 слоев пластикового сцинтиллятора и свинца, покрытого светоотражающей краской. WLS-волокна пронизывают пластины для передачи света на кремниевый фотоумножитель. Форма башен спроектирована таким образом, что их оси направлены к точке пересечения пучков и образуют так называемую проекционную геометрию [3, 4]. 16 башен сгруппированы в один модуль.

Работоспособность модулей была протестирована путем регистрации сигналов от космических мюонов. После тестирования модули собираются в полусектора и оснащаются постоянной электроникой и системой охлаждения двух типов. Каждый сектор имеет 48 модулей (768 башен), причем 12 башен расположено в поперечном сечении полусектора, 64 — в продольном. Собранные полусектора, которые в дальнейшем должны быть размещены в силовой конструкции детектора MPD, также тестируются на космических мюонах в вертикальном положении. Родительская электроника полусекторов позволяет регистрировать одновременно сигналы со всех ячеек, если хотя бы один из них превышает заданный порог. Это позволяет выделять треки мюонов, которые обеспечивают высокую эффективность измерений, что будет использовано для периодической калибровки во время сбора данных в реальном эксперименте для полностью собранного калориметра, где ориентация башен существенно изменяется [5, 6].

1. МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА

Традиционно для калибровки калориметров на космических лучах отбираются мюоны, проходящие вдоль оси башни. Это обеспечивает высокое энерговыделение и его независимость от ориентации ячейки. Однако в нашем случае малые поперечные размеры башен делают этот метод крайне затратным по времени даже для вертикально расположенных башен и практически неприменимым для горизонтально расположенных. Решение данной проблемы возможно при отборе мюонов, проходящих под углом к оси башни, когда срабатывает сразу несколько соседних ячеек. Такой метод работает при любой ориентации башен [7]. Однако он обладает двумя недостатками: малым энерговыделением в ячейке, составляющим примерно 5–7 МэВ, а также зависимостью этого энерговыделения, а значит, и калибровочного коэффициента от положения башни. Энерговыделение в каждой ячейке полусектора для данного

метода может быть определено из моделирования, использующего надежные данные по энергетической и угловой зависимости потока мюонов космических лучей [8]. Зависимость калибровочного коэффициента от положения полусектора может быть определена по экспериментальным данным. Также такие экспериментальные данные могут протестировать текущее моделирование, которое в нашем случае базируется на различных генераторах космических мюонов, определяющих их энергетический спектр и угловую зависимость.

Для исследования влияния положения на калибровочный коэффициент были произведены измерения при повороте одного из полусекторов вокруг центральной оси на угол 60° , 30° и при горизонтальном положении. Схематическое изображение эксперимента представлено на рис. 1. Положение каждой башни при такой ориентации можно определить двумя параметрами: N_{xy} — описывает положение башни с торца, который

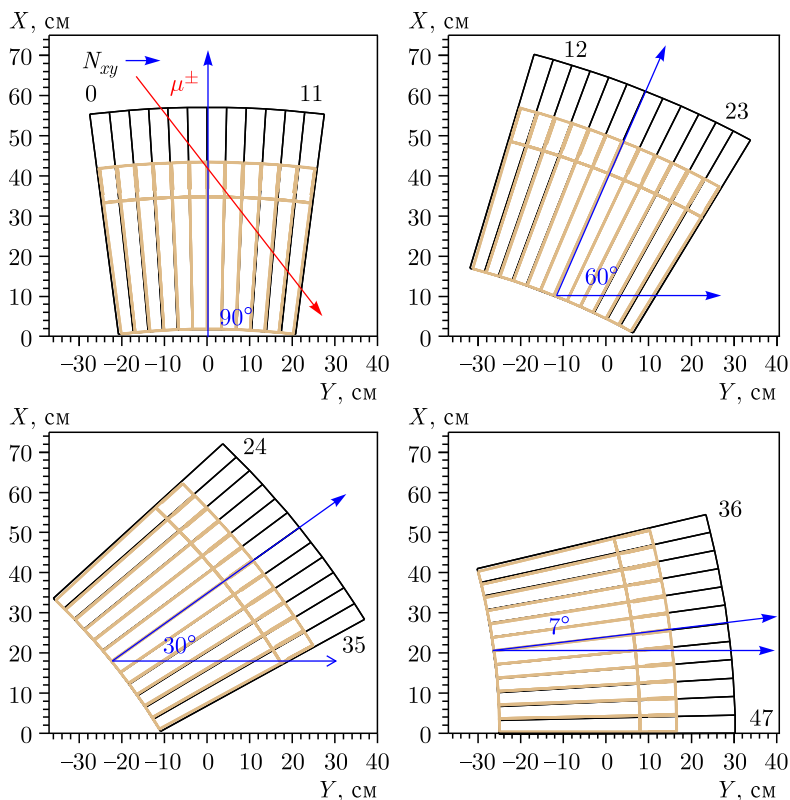


Рис. 1. Схематическое изображение четырех расположений полусектора, использовавшихся при тестировании методики калибровки башен ECal

изменяется от 0 до 47, и N_z , который определяет поперечное положение и изменяется от 0 до 63. Отбираются сигналы с каждой башни в том случае, когда срабатывает 5 или более соседних ячеек как в поперечном, так и продольном направлениях. Такой отбор обеспечивал примерно равное количество событий для всех башен при любой ориентации полусекторов.

2. ГЕНЕРАТОРЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В настоящей работе рассматриваются два генератора космических мюонов. В первом случае, генератор основан на параметризации потока космических мюонов [9], базирующейся на анализе соответствующих экспериментальных данных и охватывающей широкий диапазон энергий. Дифференциальный поток частиц определяется по следующей формуле: $J = F(E) \cos^n \theta$, где $F(E)$ — функция энергии мюона, а θ — его зенитный угол. В предположении $n = 2$ формула дает широко используемую угловую зависимость $\cos^2 \theta$ потока атмосферных мюонов на уровне моря. В дальнейшем будем называть его как «генератор 1». Энергетический спектр в данном случае не зависит от угла мюона θ . В нашем случае, когда рассматривается полусектор, начальные параметры мюонов разыгрываются по поверхности цилиндра радиусом 170 см и высотой 1 м. Параметры цилиндра выбраны таким образом, чтобы полусектор находился внутри него с небольшим запасом.

Во втором случае рассматривается генератор космических мюонов, где импульс и зенитный угол частицы не являются независимыми. Генератор EcoMug (Efficient COsmic MUon Generator) [10] базируется на экспериментальных данных, полученных при измерениях потока космических мюонов на магнитном спектрометре ADAMO [11]. Он описывает экспериментальные данные при различных углах от 0 до 80° в широком диапазоне импульсов до 100 ГэВ/с. При розыгрыше частиц генератор различает горизонтальную и вертикальную плоскости, которые образуют цилиндр, для определения начальных условий частицы. Угловая зависимость дифференциального потока определяется как $\cos^n \theta$, причем параметр $n = 2,856 - 0,655 \ln(p/p_0)$, где p — импульс частицы, $p_0 = 1$ ГэВ/с при $p > 0,04$ ГэВ/с и n не меньше 0,1. При этом значение параметра n при промежуточных энергиях далеко от его номинального значения и равно 2,9 при $p = 1,0$ ГэВ/с и 1,4 при $p = 10$ ГэВ/с. Вероятность прохождения мюона через верхнюю или вертикальную поверхность разыгрывается в соответствии с интегралами соответствующих потоков частиц.

На рис. 2, а приведены распределения по импульсу мюонов генератора EcoMug для разных зенитных углов. Видно, что различия по форме спектра не столь существенны, в то время как поток частиц существенно изменяется с углом. Импульсные распределения для обоих генераторов приведены на рис. 2, б. Видно, что разница в спектрах невелика и присутствует заметное различие лишь при импульсах, меньших 1 ГэВ/с.

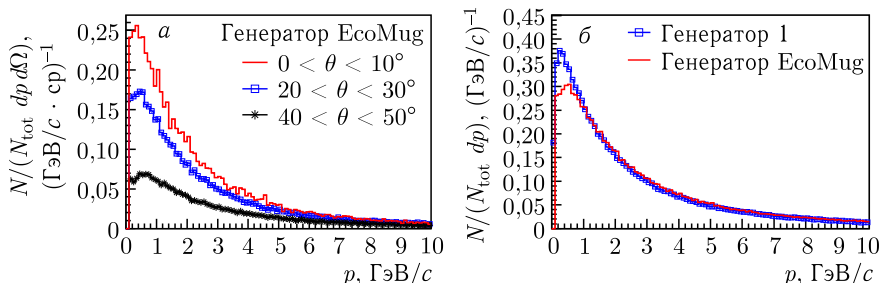


Рис. 2. Импульсные распределения космических мюонов, полученные с помощью генератора EcoMug, в различных областях по зенитному углу (а), а также для двух генераторов космических лучей (б)

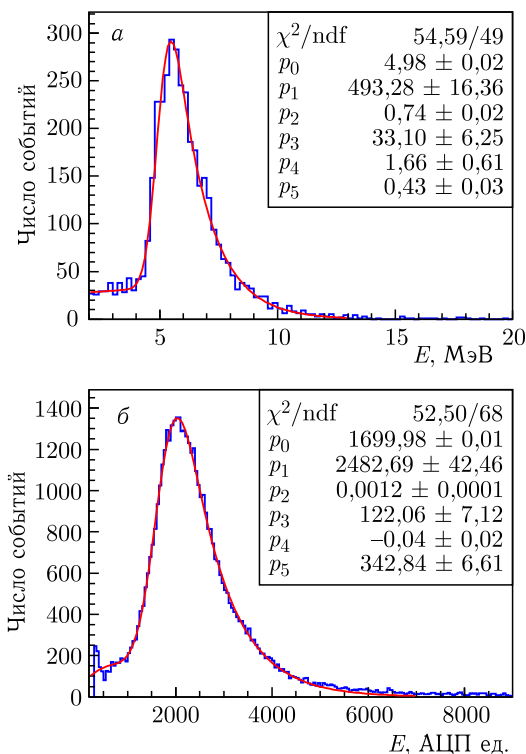


Рис. 3. Распределения по энергосодержанию для одной из башен полусектора, полученные в моделировании (а) и в эксперименте (в единицах АЦП) (б). Фитирующая функция отображена линией

Типичные распределения для отдельной башни калориметра приведены на рис.3 для моделирования (генератор 1) и экспериментальных данных. В моделировании характеристический пик имеет максимум, который

позволяет определить калибровочный коэффициент для данной башни, обеспечивающий перевод положения максимума пика в экспериментальных данных из единиц АЦП в энерговыделение в МэВ. В области низких энергий можно наблюдать подложку, которая связана с треками мюонов, проходящими через крайнюю часть объема башни. При анализе данных по всем башням полусектора можно отметить, что разнообразия форм пиков не было обнаружено. Характеристический пик четко прослеживается для всех распределений, изменяется только положение максимума.

3. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Стандартная процедура калибровки полусекторов проводится в вертикальном положении. Это положение будем использовать в качестве нормировки для других положений. На рис.4 приведены отношения расположения максимумов по энерговыделению для четырех ориентаций полусектора к выбранному для нормировки. Выбраны три башни, причем

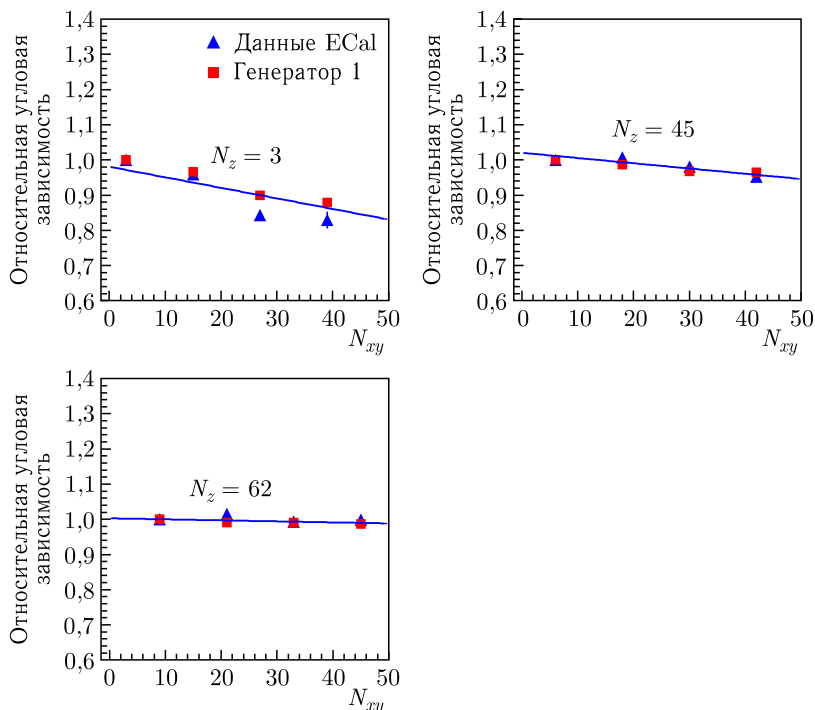


Рис. 4. Изменение относительного энерговыделения в максимуме пика при вращении полусектора для трех разных башен. Выбраны положения для различных областей полусектора, определяемых параметром N_z

первая расположена ближе к началу полусектора, где ее положение близко к вертикальному, последняя — ближе к концу, расположенная под большим углом наклона. В первом случае угловая зависимость, определенная через параметр поворота N_{xy} , наиболее ярко выражена и отклонение составляет около 15% для последней точки, что соответствует почти горизонтальному положению полусектора. Для последней башни отклонение от единицы незначительно, что соответствует почти горизонтальному расположению этой башни при всех углах поворота полусектора. Моделирование, представленное на графиках, соответствует первому генератору. Видно хорошее согласие между измерениями и моделированием за исключением двух точек при больших значениях N_{xy} на первом графике.

Для определения точности описания экспериментальных данных с помощью моделирования введем параметр $R\mu = (fM_{\text{exp}} - fM_{\text{MC}})/fM_{\text{MC}}$, где fM_{exp} и fM_{MC} — положение максимума пика по энергосодержанию для экспериментальных и модельных данных относительно вертикального положения полусектора. На рис. 5, а приведены величины отношения $R\mu$ для горизонтального положения полусекторов по всем 768 башням, где разница между моделированием и экспериментом становится наиболее существенной. Модельные данные представлены для двух генерато-

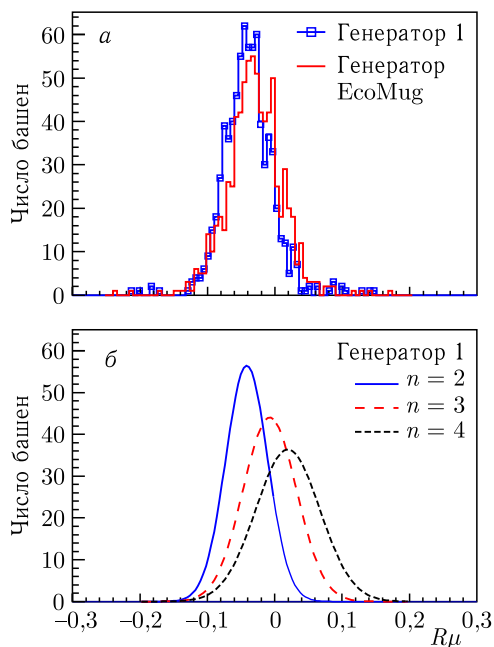


Рис. 5. Распределения величины $R\mu$, полученные с помощью двух генераторов (а) и для генератора 1 с различными значениями параметра n (б)

ров космических мюонов. Несмотря на сильное различие в параметризации потока атмосферных мюонов космических лучей в этих генераторах, усреднение по энергетическому диапазону регистрируемых мюонов приводит к идентичным результатам моделирования энерговыделения в башнях. Разница между измерениями и моделированием находится на уровне 3–4 %.

В условиях реального эксперимента в помещении энергетические и угловые спектры космических мюонов могут отличаться от параметризаций в свободном пространстве. Очевидно, что количество частиц с меньшими энергиями, особенно при больших зенитных углах, должно быть отличным от атмосферных условий. Угловую зависимость легко модифицировать в первом генераторе с помощью параметра n , который определяет зависимость потока атмосферных мюонов от зенитного угла. На рис. 5, б приведены результаты фитирования модельных расчетов величины $R\mu$ при различных значениях параметра n . Видно, что при $n = 3$ измерения и моделирование находятся в хорошем согласии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривался один из методов быстрой калибровки полусекторов электромагнитного калориметра ECal, основанный на использовании наклонных треков мюонов. Данный метод применим ко всем башням калориметра, вне зависимости от их пространственной ориентации, и не требует больших временных затрат. Недостатком данного метода является зависимость энерговыделения в башне, которое находится на уровне 5–7 МэВ, от ее пространственной ориентации в калориметре. В проведенном эксперименте с калибровкой полусектора в разных пространственных ориентациях показано, что моделирование, основанное на достоверном описании потока космических мюонов, обеспечивает коррекцию этой зависимости. Также показано, что генераторы, использующие различную параметризацию потока космических мюонов, приводят к идентичным результатам при калибровке калориметра. Наблюдаемые небольшие эффекты неполной коррекции скорее всего связаны с изменением угловой зависимости потока атмосферных мюонов в условиях экспериментального зала, которое, в принципе, может быть измерено и учтено.

Финансирование. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA (ОИЯИ)» № FSWU-2025-0014.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G., Butenko A., Golovatyuk V., Guskov A., Kapishin M., Keke-lidze V., Lednický R., Meshkov I., Sorin A.* NICA Heavy-Ion Collider at JINR (Dubna). Status of Accelerator Complex and First Physics at NICA // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2023. V. 2586. P. 012013.
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, No. 7. P. 140; arXiv:2202.08970 [physics.ins-det].
3. *Dabrowska B., Krechetov Yu., Kulikov V., Martemianov M., Tyapkin I., Zinchenko A.* Studies of the Electromagnetic Calorimeter with Projective Geometry for the MPD/NICA // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1390, No. 1. P. 012112.
4. *Kulikov V. V., Bulychov S. A., Martemianov M. A., Matsyuk M. A., Skoblyakov A. V., Tyapkin I. A.* ECal MPD: Geometry and Simulation // *J. Instrum.* 2020. V. 15, No. 09. P. C09017.
5. *Baskov V. A., Bulychov S. A., Krechetov Yu. F., Kulikov V. V., Martemianov M. A., Mamonov I. A., Semenov A. Yu., Semenova I. A., Tyapkin I. A.* Electron Beam Test of the MPD Electromagnetic Calorimeter on the Pakhra Synchrotron // *Phys. Part. Nucl.* 2021. V. 52, Iss. 1. P. 663–668.
6. *Bhattacharjee M., Baryshnikov V. M., Bakhtin P. A., Bulychov S. A., Dabrowska B., Fomenko G. E., Krechetov Yu. F., Kulikov V. V., Martemianov M. A., Matsyuk M. A., Semenov A. Yu., Tyapkin I. A.* Methods for Calibrating Half-Sectors of the MPD/NICA Electromagnetic Calorimeter Using Cosmic Ray Muons // *Phys. Part. Nucl.* 2024. V. 55, Iss. 4. P. 803–807.
7. *Martemianov M. A., Bakhtin P. A., Baryshnikov V. M., Bulychov S. A., Kulikov V. V., Kulikovskaya A. A., Matsyuk M. A., Tyapkin I. A., Fomenko G. E.* Simulation of the MPD/ECal Setup for Cosmic Ray Calibration // *Phys. At. Nucl.* 2025. V. 88, No. 1. P. 96–100.
8. *Baryshnikov V. M., Adhikary R., Bhattacharjee M., Golovatyuk V. M., Dubrovín A. Y., Kostylev A. I., Krechetov Yu. F., Kulikov V. V., Martemyanov M. A., Matsyuk M. A., Lobastov S. P., Tyapkin I. A.* Reconstruction of Cosmic Muon Tracks Inside the Half-Sector of the ECal MPD/NICA Electromagnetic Calorimeter to Align the Tower Responses // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2025. V. 22, No. 5. P. 1164–1168.
9. *Shukla P., Sankrith S.* Energy and Angular Distributions of Atmospheric Muons at the Earth // *Intern. J. Mod. Phys. A.* 2018. V. 33, No. 30. P. 1850175; arXiv:1606.06907 [hep-ph].
10. *Pagano D., Bonomi G., Donzella A., Zenoni A., Zumerle G. et al.* Monte Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2021. V. 1014. P. 165732.
11. *Bonechi L., Bongì M., Fedele D., Grandi M., Ricciarini S., Vannuccini E.* Development of the ADAMO Detector: Test with Cosmic Rays at Different Zenith Angles // *Intern. Cosm. Ray Conf.* 2005. V. 9. P. 283.