

ПРОТОТИП ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ИЗ ВОЛЬФРАМАТА СВИНЦА

Г.Г. МКРТЧЯН, Г.О. МАРУКЯН*, А.Г. МКРТЧЯН, А.А. ШАГИНЯН,
В.О. ТАДЕВОСЯН, А.В. ВОСКАНЯН, А.Г. МОВСИСЯН, А.Х. ОГМРЦЯН

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

*e-mail: maruk@yerphi.am

(Поступила в редакцию 5 февраля 2024 г.)

В работе представлены результаты исследований характеристик кристаллов вольфрамата свинца (PbWO_4). Проведены измерения пропускания света и световыход от прохождения космических мюонов. Средние значения пропускания света кристаллов в поперечном направлении составляют 62.82, 68.38 и 75.68% при длинах волн $\lambda = 360, 420$ и 620 нм, а световыход ~ 16 фэ/МэВ. Спроектирован и построен прототип электромагнитного калориметра из кристаллов, уложенных в матрицу 4×4 , который протестирован космическими мюонами. Полученные результаты подтверждают выводы других групп коллаборации Электрон-Ионного Коллайдера о том, что качество кристаллов производства CRYTUR удовлетворяет требованиям, предъявляемым к электромагнитному калориметру, и что они могут быть базой для его создания.

1. Введение

Физическая программа Электрон-Ионного Коллайдера (EIC [1]), строительство которого запланировано в Брукхейвенской Национальной Лаборатории, включает наиболее важные и ключевые вопросы, в ответах на которые нуждаются экспериментальные сообщества мира: происхождение спина нуклона, глюонная структура ядер, происхождение адронной массы, и т.д. Чтобы выполнить такую физическую программу, EIC предоставит интенсивный пучок электронов с энергией 18 ГэВ, сталкивающихся с протонами (41–275 ГэВ) и ядрами (до 166 ГэВ/нуклон) при светимостях порядка $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Система детекторов EIC должна обеспечить (e/π) и (K/π) разделение вплоть до значения импульса 60 ГэВ.

Подробное описание систем идентификации частиц (PID), восстановления траекторий, электромагнитной и адронной калориметрии главного детектора EIC, названный электрон-Протон/Ионный Коллайдер (ePIC), представлено в [2–5]. Выбор варианта, оптимизация и проектирование Электромагнитного Калориметра (EmCal) для ePIC еще находятся в фазе разработок и требуют дополнительных исследований. С этой целью многие группы ePIC коллаборации создают прототипы и проводят независимые тесты и сравнивают результаты.

Особенно важно исследовать характеристики кристаллов и прототипов EmCal, что и является основной целью работ, проведенных в Национальной

Научной Лаборатории им. А. И. Алиханяна (ННЛА). Типичный электромагнитный калориметр – это прозрачный, однородный радиатор из кристаллов, с толщиной достаточно большими для полного содержания ливня вторичных частиц. В экспериментах последних десяти лет предпочтительным материалом для калориметра является неорганический скинтиллятор вольфрамат свинца (PbWO_4), которому свойственны малый радиус Мольера ($R_M = 2.0$ см), высокая плотность ($\rho \approx 8.3$ г/см³), быстрый отклик (< 2 нс) и радиационная стойкость.

Полная конструкция EmCal для ePIC основана на ряде из приблизительно 3000 кристаллов PbWO_4 , размером в $2.0 \times 2.0 \times 20$ см³.

Группа ННЛА имеет большой опыт в области калориметрии. Она возглавляла проектирование и строительство электромагнитных калориметров для HMS и SHMS спектрометров экспериментального зала С лаборатории Джефферсона [5–7].

2. Отбор кристаллов PbWO_4 для прототипа EmCal

В настоящее время единственными в мире двумя предприятиями с возможностями массового производства кристаллов PbWO_4 являются SICCAS в Китае и CRYTUR в Чешской Республике. CRYTUR и SICCAS произвели по 1000 кристаллов каждый для лаборатории Джефферсона. Характеристики этих кристаллов приведены в [6]. Небольшая партия из 20 кристаллов производства CRYTUR была приобретена ННЛА для исследования их качества и для постройки и тестирования прототипа электромагнитного калориметра.

2.1. Общая проверка кристаллов

Образцы кристаллов были прямоугольной формы, $20.5 \times 20.5 \times 200$ мм³ номинальных размеров. Продольная (Z) и поперечные (X , Y) размеры кристаллов были измерены высокоточным штангенциркулем (точность лучше, чем 50 мкм) и датчиком Mituto Electric Digital Height Gage (точность 3–5 мкм). Средние размеры кристаллов составляют $20.47 \times 20.48 \times 200.13$ мм³, что соответствует номинальным требованиям, и расхождений не превышают ± 50 мкм. После первой, визуальной проверки все кристаллы были проверены цифровым микроскопом DeltaPix. Он обеспечивает сверхвысокое разрешение и все необходимые для точных измерений функции. Исследования показали, что несмотря на некоторые недостатки в виде царапин, все кристаллы были пригодны для дальнейших исследований и тестирования.

2.2. Оптическое пропускание

Эффективность пропускания света кристаллов в поперечном направлении (толщина 20 мм) была измерена оптическим фотоспектрометром FLAME-S-XR1 фирмы Ocean Insight. В измерениях применили программное приложение OceanART, которое позволяет одновременно получать данные по поглощению, пропусканию и отражению. Систематические погрешности и воспроизводимость наших результатов были определены многократными измерениями пропускания одного и того же кристалла, в одном и том же положении. Данные показывают, что точность наших измерений лучше, чем 10%.

Светопропускание лучшего и худшего кристаллов PbWO_4 в поперечном направлении, измеренное в ННЛА, в сравнении с данными от производителя показано на рис.1.

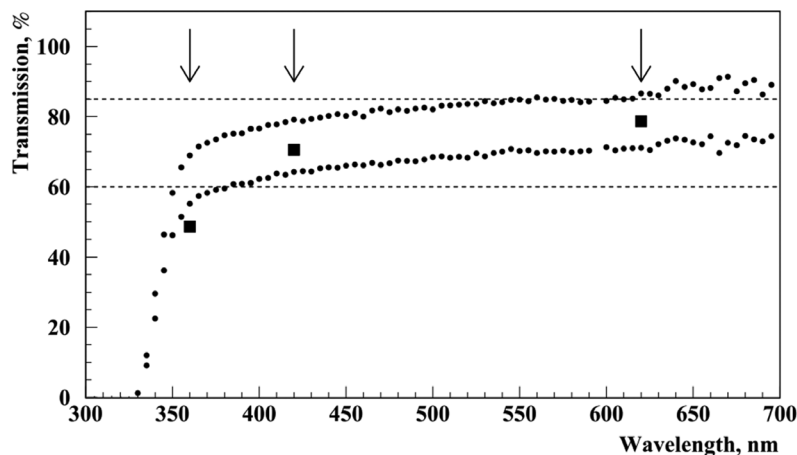


Рис.1. Светопропускание в поперечном направлении для лучшего и худшего из кристаллов CRYTUR (показаны точками). Стрелками и квадратами показаны длины волн и значения пропускания, представленные фирмой CRYTUR. Пунктирные линии указывают приемлемый для EIC диапазон значений пропускания.

Для исследования оптической однородности кристалла пропускание было измерено в поперечном направлении, при нескольких расстояниях от конца кристалла, от 5 до 195 мм. Средние значения поперечного пропускания кристаллов, измеренных в ННЛА, составляют 62.82, 68.38 и 75.68% при длинах волн $\lambda = 360$, 420 и 620 нм, соответственно, и проходят технические требования для калориметра EIC.

2.3. Световыход

Световыход (LY) измеряется в количестве фотоэлектронов (фэ), испускаемых на единицу энергетических потерь в кристалле (фэ/МэВ). Световыход был измерен с помощью космических мюонов при их прохождении через кристалл PbWO_4 с толщиной 20.5 мм. Одна из торцевых поверхностей кристалла была соединена с окном фотоумножителя (ФЭУ) оптической смазкой Vicon BC-630. Остальные поверхности были покрыты пленками оптического отражателя ESR и черного Tedlar-a. Измерения световыхода кристалла выполнены с помощью двух разных ФЭУ: Hamamatsu R4125 и Hamamatsu H6533. Измерение LY с помощью R4125 является приоритетным, поскольку мы используем эти ФЭУ в нашем прототипе EmCal. Измерения со вторым умножителем (H6533) выполнены для перекрестной проверки.

Для формирования триггера от космических мюонов использовались два одинаковых сцинтилляционных счетчика, размещенных с двух сторон кристалла на небольшом расстоянии. Активные размеры сцинтиллятора составляли $10.0 \times 10.0 \times 50.0 \text{ мм}^3$. Сигналы этих счетчиков, проходя через модуль дискриминатор-формирователь с порогом ~ 30 мВ, формируют импульсы по стандарту NIM с

длительностью 40 нс. Далее они поступают в логический модуль совпадения (LU N455) и генерируют сигнал «Ворота» (Gate) шириной 150 нс для зарядо-цифрового преобразователя QDC. Анодные сигналы ФЭУ оцифрованы напрямую с помощью зарядо-чувствительного 12-битного интегрирующего аналого-цифрового преобразователя типа CAEN V792N. Более подробную информацию об электронике и системе сбора данных можно найти в разделе 3.

В качестве примера на рис.2 показано распределение зарегистрированных QDC сигналов ФЭУ, соответствующее энергиям, выделяемым космическими мюонами в кристалле PbWO_4 .

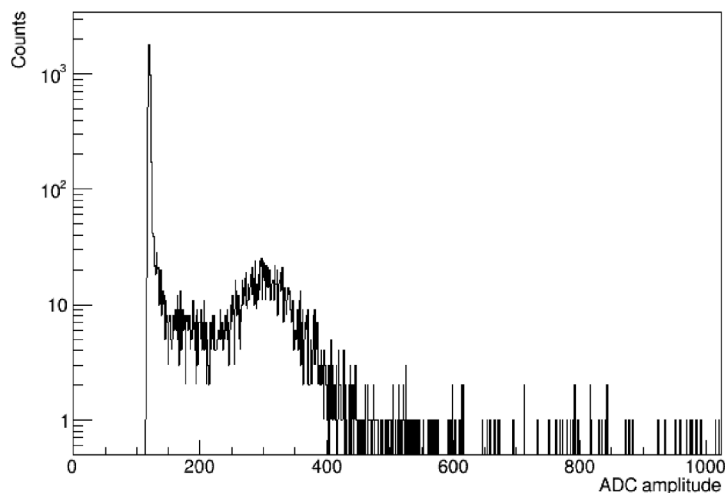


Рис.2. Распределение сигналов ФЭУ в каналах QDC, соответствующее энергосодержаниям космических мюонов, проходящих через кристалл PbWO_4 толщиной 20.5 мм.

Для определения световыхода кристалла это распределение аппроксимируется функцией Гаусса, находится наиболее вероятное значение $\bar{A}$, и из него вычитается компонент пьедестала (PED), соответствующий нулевому сигналу ФЭУ и электроники. Если при данном напряжении ФЭУ в шкале QDC положение одноэлектронного пика (SEP) известно, тогда световыход (LY) можно найти как $LY = (\bar{A} - PED)/SEP$. Световыход на единицу энергии, потерянной частицей в кристалле, определяется как LY/E_{dep} , где выделенная энергия $E_{\text{dep}} = dE/dx \times \rho \times d$. Для кристалла PbWO_4 толщиной 2.0 см это будет $\sim 25 \text{ МэВ}$.

Если известен коэффициент усиления ФЭУ для данного значения высокого напряжения, то положение SEP в QDC спектре можно рассчитать по соотношению $SEP = (q_e \times G)/q_0$, где $q_e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$ – заряд электрона, а $q_0 = 100 \text{ фКл} = 10^{-13} \text{ Кл}$ – значение шага шкалы QDC. Например, для ФЭУ H6533 при высоковольтном напряжении 2000 В коэффициент $G = 2 \times 10^6$, что даст $SEP \approx 3$ единицы шкалы QDC.

Если коэффициент усиления ФЭУ неизвестен, значение SEP можно определить посредством измерения светоизлучающего диода (LED). В этом случае амплитудное распределение сигналов ФЭУ измеряется при интенсивности света порядка нескольких сотен фотоэлектронов, а максимум распределения и его ширина σ определяются из аппроксимации функцией Гаусса. Пренебрегая вкладами

шумов электроники и других возможных источников, количество зарегистрированных фотоэлектронов N_{pe} при заданной интенсивности светодиода можно оценить просто как обратное квадрату нормированной ширины распределения, $N_{pe} = 1/\sigma_{norm}^2$, где $\sigma_{norm} = \sigma/N_{ADC}$, σ – ширина гауссовой аппроксимации, а N_{ADC} – положение максимума амплитудного распределения с вычетом пьедестала.

В наших измерениях SEP определялся вышеупомянутыми двумя методами. Разница в полученных результатах находилась в диапазоне до $\sim 20\%$, а для световых выходов кристаллов CRYTUR получено среднее значение ~ 16 фэ/МэВ.

3. Прототип EmCal

Несколько прототипов электромагнитного калориметра для EIC были сконструированы и протестированы коллаборацией ePIC. Мы спроектировали и построили собственный прототип для проведения наших независимых исследований ключевых аспектов калориметрии EIC. На основе результатов визуальной и микроскопической проверки и измерений пропускания мы выбрали 16 лучших кристаллов $PbWO_4$ для постройки прототипа EmCal.

Прототип калориметра состоит из 16 кристаллов $PbWO_4$ размерами $2.05 \times 2.05 \times 20$ см³, уложенных в матрицу 4×4 . Модули держатся в опорных рамках, отпечатанных с использованием 3D-принт технологии. Таким образом, получился компактный, небольшой калориметр, с минимальными зазорами между кристаллами (<250 мкм).

Для обеспечения световой изоляции все кристаллы индивидуально обернуты в рефлектор ESR толщиной 65 мкм и фольгу Tedlar толщиной 30 мкм. Каждый кристалл соединен с ФЭУ Hamamatsu R4125-01 оптическим вазелином. Матрица кристаллов с фотоумножителями и высоковольтными делителями помещена в темный светоизолированный металлический ящик. На задней торцевой стенке ящика размещены разъемы высоковольтного питания и выходных сигналов ФЭУ. При тестировании прототипа космическими мюонами мы использовали те же триггерные счетчики, ту же электронику и систему сбора данных, что и в измерениях светового выхода кристаллов.

Диаграмма схемы электроники и системы сбора данных, использованных в исследованиях с космическими лучами, показана на рис.3.

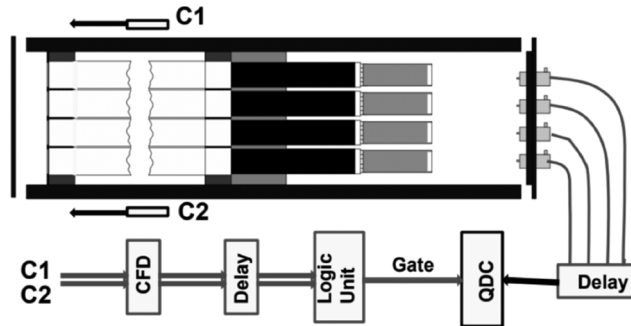


Рис.3. Диаграмма схемы электроники и системы сбора данных, использованных в исследованиях с космическими лучами. C1 и C2 – сцинтилляционные счетчики, CFD – дискриминатор, Logic Unit – модуль совпадения, Gate – сигнал Воргата, QDC – зарядо-цифровой преобразователь, Delay – линия задержки.

В данном случае необходимо было обеспечить питание высокого напряжения для всех 16-и ФЭУ и анализировать все 16 сигналов от QDC.

Для получения полного числа фотоэлектронов, произведенных мюонами во всех четырех слоях калориметра, необходимо знать значение одноэлектронного сигнала (SEP) каждого ФЭУ. Для определения положения сигнала SEP всех ФЭУ в собранном прототипе мы использовали метод калибровки с помощью светодиодов (LED). Распределения полного числа фотоэлектронов, произведенных мюонами в прототипе, выведенного посредством такой калибровки, показаны на рис.4.

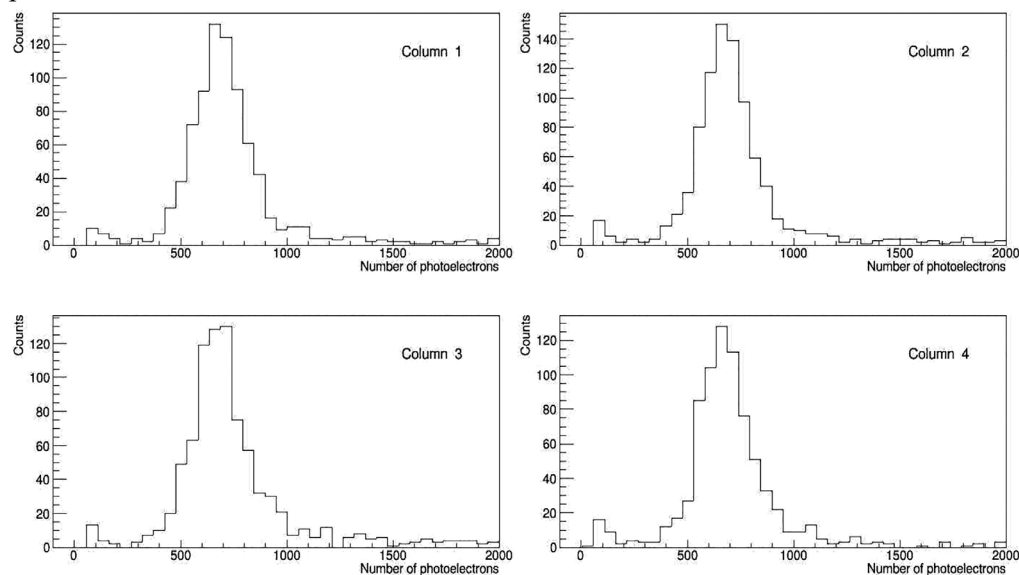


Рис.4. Распределения полного числа фотоэлектронов, произведенных космическими мюонами в 4-х колонках прототипа.

С учетом того, что мюоны, проходящие через все четыре кристалла, теряют в сумме энергию приблизительно в 100 МэВ (~25 МэВ в каждом блоке), для световыхода в кристалле PbWO_4 получим ~16 фэ/МэВ (с учетом частичного покрытия торца кристалла фотокатодом ФЭУ), что подтверждает данные, полученные по измерениям световыхода кристаллов.

4. Заключение

В ННЛА нами исследовано качество кристаллов PbWO_4 производства CRYTUR. Кристаллы визуально проверены, измерены их размеры, и измерен световыход от прохождения космических мюонов через кристалл. Измерения показали, что средние значения поперечного светопропускания кристаллов составляют 62.82, 68.38 и 75.68% при длинах волн $\lambda = 360, 420$ и 620 нм. Кристаллы имеют средний световыход ~16 фэ/МэВ со стандартным отклонением 0.9 фэ/МэВ, что находится в пределах погрешности измерений. Световыход кристалла в двух разных точках, находящихся на расстоянии ~14 см друг от друга, практически одинаков (в пределах 3–5%), что свидетельствует о хорошей оптической однородности.

Был создан прототип EmCal, состоящий из 16 кристаллов PbWO_4 , уложенных в матрицу 4×4 . Прототип был протестирован космическими мюонами. Мюоны, проходя все четыре слоя калориметра, теряют в сумме энергию ~ 100 МэВ (~ 25 МэВ в каждом блоке). В результате они генерируют $\sim 700\text{--}800$ фотоэлектронов, что составляет $\sim 7\text{--}8$ фэ/МэВ. Это значение почти в два раза меньше измеренной величины световыхода PbWO_4 из-за частичного покрытия фотокатодом ФЭУ R4125 торцевой поверхности кристалла [5].

Для окончательного выбора конструкции калориметра EIC важным является сопоставление и совместное рассмотрение результатов исследований различных групп EmCal коллаборации EIC и выработка общих требований к характеристикам кристаллов и конструкции калориметра. С этой точки зрения, данные, полученные ННЛА являются неотъемлемой частью базовых данных и представляют общий интерес.

Полученные нами результаты подтверждают выводы других групп EIC коллаборации, что качество кристаллов производства CRYTUR удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к электромагнитному калориметру, и могут быть базой для создания EmCal [5].

Мы благодарим сотрудников экспериментального зала С Лаборатории Джефферсона и группу из Католического Университета Америки (CUA) за помощь и техническую поддержку на различных этапах работы.

В особенности мы благодарны Р. Лусинянцу и американскому благотворительному фонду PIERIS за помощь, оказанную ННЛА. Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке РА, в рамках научного проекта No 21AG-1C028.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.A. Khalek, A. Accardi, J. Adam, D. Adamiak, W. Akers, et al., Nucl. Phys. A, **1026**, 122447 (2022).
2. J. Adam, L. Adamczyk, N. Agrawal, C. Aidala, W. Akers, et al., JINST, **17** (10), P10019 (2022).
3. J.K. Adkins, Y. Akiba, A. Albataineh, M. Amaryan, I.C. Arsene et al., e-Print: 2209.02580 [physics.ins-det].
4. R. Alarcon, M. Baker, V. Baturin, P. Brindza, S. Bueltmann et al., e-Print: 2209.00496 [physics.ins-det].
5. F. Bock, N. Schmidt, P.K. Wang, N. Santiesteban, T. Horn et al., Nucl. Instr. and Meth. A, **1013**, 165683 (2021).
6. T. Horn, V.V. Berdnikov, S. Ali, A. Asaturyan, M. Carmignotto et al., Nucl. Instr. and Meth. A, **956**, 163375 (2020).
7. H. Mkrtchyan, R. Carlini, V. Tadevosyan, J. Arrington, A. Asaturyan et al., Nucl. Instr. and Meth. A, **719**, 85 (2013).
8. R.Y. Zhu, D.A. Ma, H.B. Newman, C.L. Woody, J.A. Kierstead et al., Nucl. Instr. Meth. A, **376**, 319 (1996).

ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԿԱԼՈՐԻՄԵՏՐԻ ՆԱԽԱՏԻՊ՝
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾ ԿԱՊԱՐԻ ՎՈԼՖՐԱՄԱՏԻՑ

Հ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Հ. ՄԱՐՈՒՔՅԱՆ, Ա. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Ա. ՇԱՀԻՆՅԱՆ,
Վ. ԹԱԴԵՎՈՍՅԱՆ, Հ. ՈՍԿԱՆՅԱՆ, Ա. ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ, Ա. ՀՈՂՄՐՑՅԱՆ

Հոդվածում ներկայացված են կապարի վոլֆրամատի (PbWO_4) բյուրեղների բնութագրերի ուսումնասիրության արդյունքները: Կատարվել են լույսի թափանցելիության չափումներ և տիեզերական մյուոնների անցումից առաջացած լույսի ելքի չափումներ: Բյուրեղներում լույսի թափանցելիության միջին արժեքները լայնակի ուղղությամբ կազմում են 62.82, 68.38 և 75.68% $\lambda = 360, 420$ և 620 նմ ալիքի երկարություններում, իսկ լույսի ելքը ~ 16 ֆե/ՄԷՎ է: Նախագծվել և կառուցվել է բյուրեղների 4×4 մատրիցով դասավորված կալորիմետրի նախատիպ, որը փորձարկվել է տիեզերական մյուոնների օգնությամբ: Ստացված արդյունքները հաստատում են էլեկտրոն-իոնային Կոլայդերի համագործակցության այլ խմբերի եզրակացությունները առ այն, որ CRYTUR-ի կողմից արտադրված բյուրեղների որակը համապատասխանում է էլեկտրամագնիսական կալորիմետրի պահանջներին, և որ դրանք կարող են հիմք հանդիսանալ այն ստեղծելու համար:

A PROTOTYPE OF ELECTROMAGNETIC CALORIMETER
CONSTRUCTED OF LEAD TUNGSTATE

H. MKRTCHYAN, H. MARUKYAN, A. MKRTCHYAN, A. SHAHINYAN,
V. TADEVOSYAN, H. VOSKANYAN, A. MOVSISYAN, A. HOGHMRTSYAN

The article presents the results of studies of the characteristics of lead tungstate crystals (PbWO_4). Measurements of light transmission and light output from the passage of cosmic muons were carried out. The average light transmittance of crystals in the transverse direction is 62.82, 68.38 and 75.68% at wavelengths $\lambda = 360, 420$ and 620 nm, and the light output is ~ 16 pe/MeV. A prototype of electromagnetic calorimeter was designed and built from crystals arranged in 4×4 matrix which has been tested by cosmic muons. The results obtained confirm conclusions of other groups in the Electron-Ion Collider collaboration that quality of the crystals produced by CRYTUR meets requirements for the electromagnetic calorimeter, and that they can serve as basis for its construction.