

К вопросу о калибровке черенковского детектора галактических и солнечных космических протонов с энергией от 600 МэВ

В статье рассмотрен возможный подход к созданию методики калибровки черенковского детектора галактических и солнечных космических протонов. В основе методики – моделирование методом Монте-Карло переноса протонов и электронов и генерации ими черенковских фотонов в радиаторе из полиметилметакрилата. Показано, что при определенных условиях калибровка прибора с помощью электронов с энергией 9,38 МэВ эквивалентна калибровке при боковом падении на детектор пучка протонов с энергией 600 МэВ.

Ключевые слова:

черенковский детектор, черенковские фотоны, галактические протоны, солнечные протоны, метод Монте-Карло, калибровка.

Г.А.Фоков, В.А.Кожемякин

(Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь)

Энергетические спектры протонов галактических и солнечных космических лучей (ГКЛ и СКЛ) являются важными исходными данными для решения различных геофизических задач, связанных с параметрами земной атмосферы, а также задач защиты электронных компонентов космических аппаратов (КА). Для измерения этих спектров применяются различные методы. Так, например, дифференциальные энергетические спектры протонов ГКЛ и СКЛ (рис.1) были получены во время события *GLE No 61* методом восстановления спектра потока первичных солнечных космических лучей по данным наземной сети нейтронных мониторов. На рисунке, взятом из работы [1], РС означает быструю компоненту протонного спектра, DC – медленную.

На рис.2 показан протонный спектр только для ГКЛ [2].

Это пример косвенного метода, основанного на решении обратной задачи. Альтернативой являются прямые методы измерения плот-

ности потока протонов бортовыми черенковскими детекторами КА, в частности, детекторами галактических космических лучей типа «ГАЛС» [3].

Явление черенковского излучения в радиаторе при прохождении протонов, скорость которых превышает фазовую скорость света в веществе, позволяет создать прибор, детектирующий протоны соответствующих энергий.

Для радиатора из полиметилметакрилата (ПММА) кинетическая энергия протонов, начиная с которой возникает генерация черенковских фотонов, равна ~ 320 МэВ.

Черенковское излучение в видимой части спектра (400–700 нм) смещено к синему и фиолетовому краям. Но поскольку количество генерируемых черенковских фотонов растет с уменьшением длины волны, то черенковское излучение еще с большей интенсивностью генерируется в области ближнего ультрафиолета. Поэтому для радиатора выбирают такие образцы ПММА, плато спектральной кривой коэффициента пропускания которых не обрывается на длине волны $\lambda = 400$ нм, а простирается до 300 и менее нм. Поэтому в детекторах черенковского излучения используются специализированные ФЭУ с расширенной областью спектральной чувствительности.

Необходимым этапом при создании и дальнейшей эксплуатации измерительных приборов является разработка методики их калибровки. Идеальным способом калибровки черенковского детектора протонов явилась бы калибровка с использованием протонных ускорителей. Но это сложно организационно и затратно финансово.

Электроны, дающие сопоставимый с протонами выход черенковских фотонов, имеют на 2 порядка меньшую энергию. Это связано с тем, что интенсивность генерации черенковского излучения на единице пути зависит не от кинетической энергии частицы, а от отношения ее скорости к скорости света.

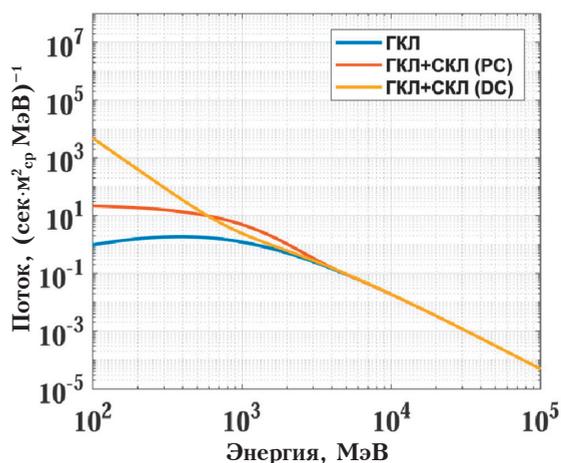


Рис.1. Дифференциальные энергетические спектры протонов ГКЛ и СКЛ, полученные по данным сети наземных станций нейтронного мониторинга.

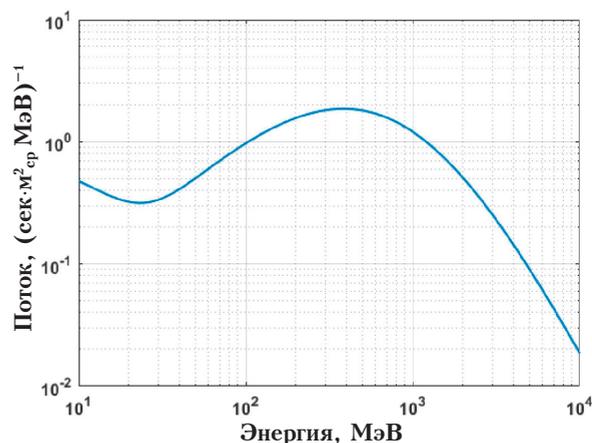


Рис.2. Дифференциальный энергетический спектр протонов ГКЛ [2].

На основе изложенного предлагаются следующие этапы решения этой проблемы.

1. Компьютерное статистическое моделирование переноса протонов и генерации черенковских фотонов в радиаторе черенковского детектора.
2. Компьютерное статистическое моделирование переноса электронов и генерации черенковских фотонов в радиаторе этого же детектора.
3. Установление соответствия между рассчитанными данными для протонов и электронов (протоны какой энергии могут дать такой же выходной сигнал ФЭУ, как электроны заданных энергий).

4. Проведение реального воздействия моноэнергетических электронов на черенковский детектор с последующей калибровкой энергетической шкалы по значениям энергии электронов.

5. Калибровка черенковского детектора протонов на основе результатов выполнения пунктов 3 и 4.

В данной статье рассмотрены три первых пункта.

Моделирование переноса протонов и генерации черенковских фотонов в радиаторе детектора

Назначение рассматриваемого детектора – измерение потоков протонов галактических и солнечных космических лучей. Принятая при моделировании геометрическая модель детектора показана на рис.3. Она соответствует черенковским детекторам типа «ГАЛС», используемым в составе измерительной аппаратуры КА гелиогеофизического назначения. Материал радиатора – полиметилметакрилат (ПММА), толщина фторопластового отра-

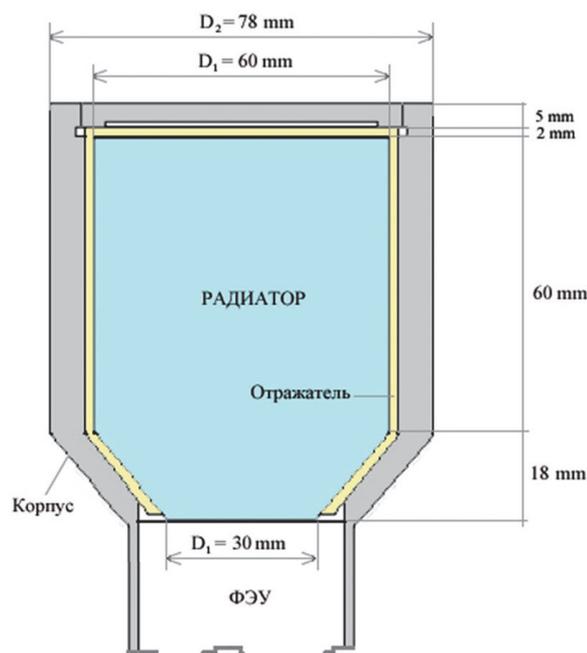


Рис.3. Геометрическая модель черенковского детектора.

жателя – 2 мм по всему периметру, корпус и торцевая крышка – из алюминиевого сплава.

Интенсивность N черенковского излучения на отрезке L пути заряженной частицы в радиаторе в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 рассчитывается по формуле [4,5]:

$$N = 2\pi \cdot \alpha Z^2 L \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right), \quad (1)$$

где Z – заряд частицы (в единицах заряда электрона), n – показатель преломления вещества радиатора, β – отношение скорости частицы к скорости света в вакууме, α – постоянная тонкой структуры ($\alpha = 1/137$).

Ожидаемое среднее количество черенковских фотонов, которые генерирует на 1 см пробега заряженная частица с единичным зарядом $Z = 1$ (т. е. протона, электрона или мюона), следует из формулы (1):

$$\frac{dN}{dL} = 2\pi \cdot \alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right). \quad (2)$$

При равенстве $\beta = 1/n$, где $1/n$ – это фазовая скорость света в рассматриваемой среде, величина $dN/dL = 0$.

В детекторе ГАЛС используется ФЭУ-148 Г. Его чувствительный интервал длин волн равен 0,3–0,65 мкм. Согласно источнику [6], величина показателя преломления ПММА с уменьшением длины волны фотона от 0,65 до 0,4 мкм возрастает от 1,488 до 1,503 соответственно (рис.4).

Поскольку прослеживается тенденция дальнейшего возрастания n , то с учетом используемого значения $\lambda_1 = 0,3$ мкм, примем в качестве среднего значения $n = 1,5$. Для этого значения фазовая скорость света в ПММА будет равна 0,667. Движение частиц в полиметилметакрилате со скоростью $\beta > 0,667$ будет сопровождаться излучением черенковских фотонов. Для протонов такому значению β соответствует энергия ~320 МэВ. Но нижним пределом рассматриваемого в статье диапазона энергий протонов выберем не 320 МэВ,

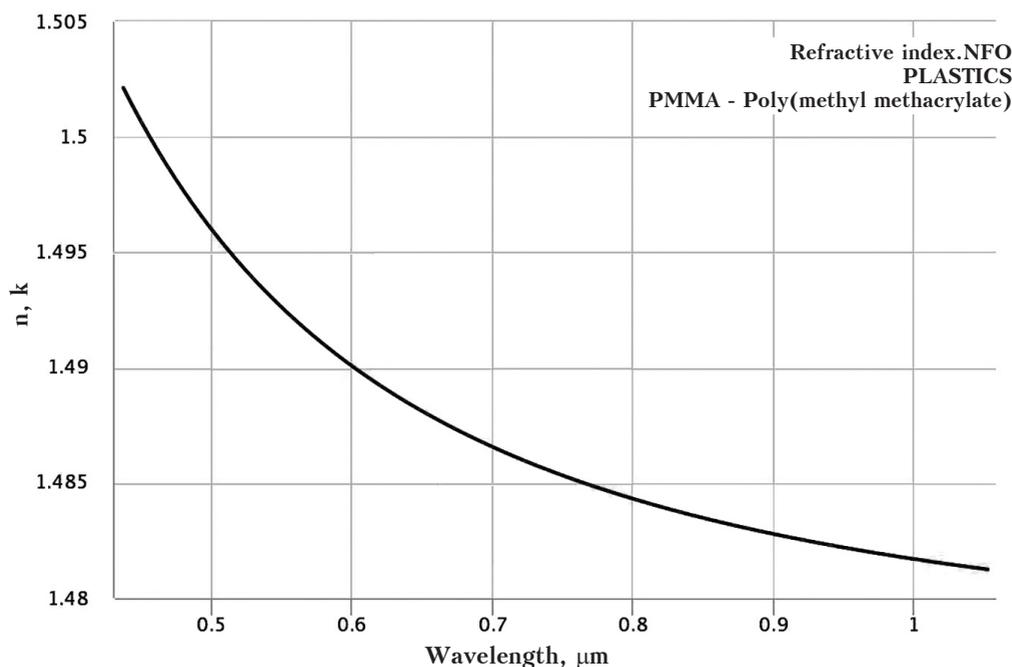


Рис.4. Показатель преломления оптических фотонов в ПММА в зависимости от длины волны.

а 600 МэВ. Это связано с тем, что только начиная с этой энергии протонов входного окна ФЭУ достигают не менее 100 черенковских фотонов. Выходной сигнал от меньшего количества проблематично выделить на фоне шума, вызванного темновым током ФЭУ.

Моделирование переноса протонов в радиаторе и генерация протонами черенковских фотонов проводилось методом Монте-Карло с помощью программного комплекса *SnegMont* [7], дополненного функциями моделирования взаимодействия протонов с веществом.

Моделирование переноса протонов и сопутствующей генерации черенковского излучения осуществлялось в следующем порядке. Разыгрывался пробег протона в ПММА между двумя такими столкновениями, которые вызывали отклонение на угол, больший так называемого угла отсечки, измеряемого несколькими градусами. При этом потеря протонной энергии на этом отрезке не должна была превышать 5%. На каждом отрезке траектории вычислялось ожидаемое количество генерированных черенковских фотонов по данным, заранее рассчитанным по формуле (2).

Это количество являлось параметром пуассоновского распределения. Разыгрывая случайное число от 0 до 1, находили по соответствующей полной интегральной функции вероятности реальное количество образованных черенковских фотонов.

Вопросы, касающиеся направления движения образованных черенковских фотонов (а они излучаются под углом, зависящим от показателя преломления и скорости частицы) и их переноса от места генерации до входного окна ФЭУ, обсуждаются ниже. А пока ограничимся задачей расчета их общего количества, генерированного одной заряженной частицей вдоль ее траектории и, в случае электрона, вдоль траекторий вторичных частиц (электронов и позитронов).

Пусть протоны с энергией 600 МэВ падают на торец детектора строго вертикально по оси симметрии радиатора. Результат компьютерного моделирования для этого случая показан на рис.5.

Максимуму кривой распределения соответствует 1820 фотон/протон. Поскольку протоны данной энергии, проходя весь радиатор от

торца до входного окна ФЭУ, теряют малую долю первоначальной энергии и практически не отклоняются, то не составляет труда аналитически оценить среднее количество генерированных фотонов по формуле (2), в которой $L = 7,8$ см (рис.3). Рассчитанное и смоделированное значения отличаются не более, чем на 2–3%.

При данном направлении падения протонов они пересекают весь радиатор вплоть до окна ФЭУ. Генерированные при этом черенковские фотоны равномерно распределены вдоль всей траектории протона. Это не соответствует случаю образования этих фотонов электронами. Поскольку область генерированных электро-

нами черенковских фотонов локализована в верхней части цилиндрического радиатора, то на пути до входного окна ФЭУ потоки черенковских фотонов ослабляются гораздо сильнее, чем в описанном выше случае с протонами. Поэтому рассматривался случай для протонов, падающих на боковую поверхность детектора. Локализацию области черенковских фотонов, образованных протонами, можно согласовать с таковой для электронов. Это достигается путем перемещения детектора относительно уровня пучка протонов.

Моделирование генерации черенковских фотонов боковым пучком протонов дало результат, отличающийся от предыдущего,

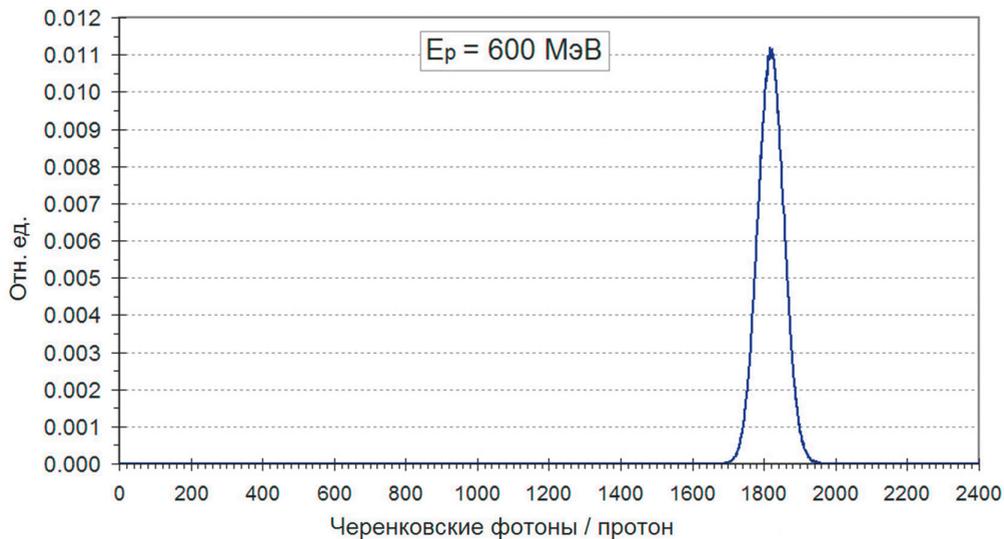


Рис. 5. Распределение черенковских фотонов, генерированных протонами с энергией 600 МэВ, направленных по нормали к торцу радиатора вдоль оси симметрии.

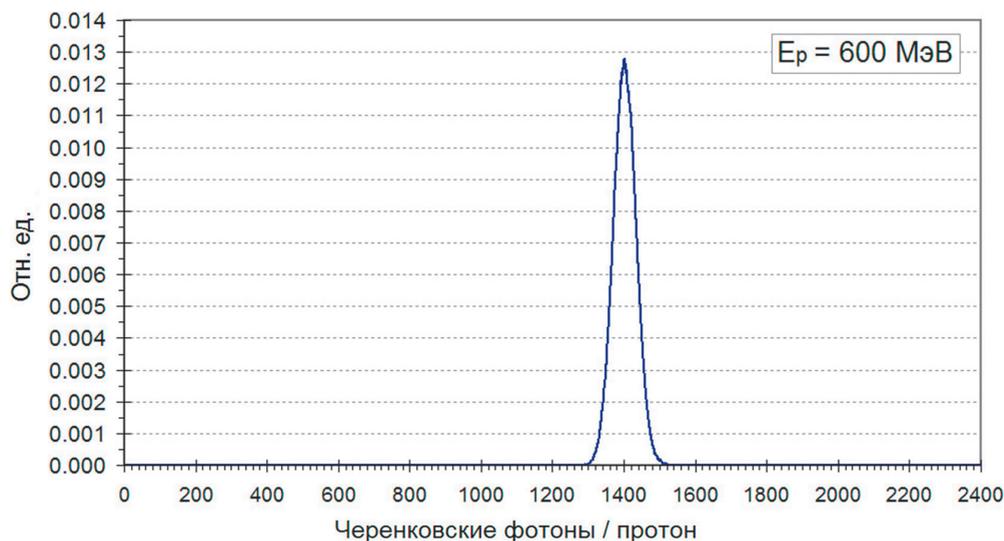


Рис. 6. Распределение черенковских фотонов, генерированных протонами с энергией 600 МэВ, направленных сбоку нормально к оси.

поскольку путь протона в радиаторе короче, а именно $L = 6$ см (диаметр цилиндрической части радиатора). Результат показан на рис.6. Максимуму кривой распределения соответствует 1405 фотон/протон.

Моделирование переноса электронов и генерации черенковских фотонов в радиаторе детектора

Далее задача состоит в том, чтобы путем моделирования переноса электронов и сопутствующей генерации черенковского излучения найти такое значение начальной энергии электронов, при котором общее количество гене-

рированных черенковских фотонов на один электрон имело бы ту же величину, которая определена для протонов с энергией 600 МэВ.

Геометрическая и материальная модель для моделирования методом Монте-Карло в этом случае отличается от модели для протонов тем, что отсутствует крышка и фторопластовый отражатель снят с торца и заменен пленкой алюминизированного майлара диаметром 6 см и толщиной 12 мкм (по 6 мкм майлара и алюминия). Моноэнергетические электроны направлялись по нормали к торцу вдоль оси радиатора.

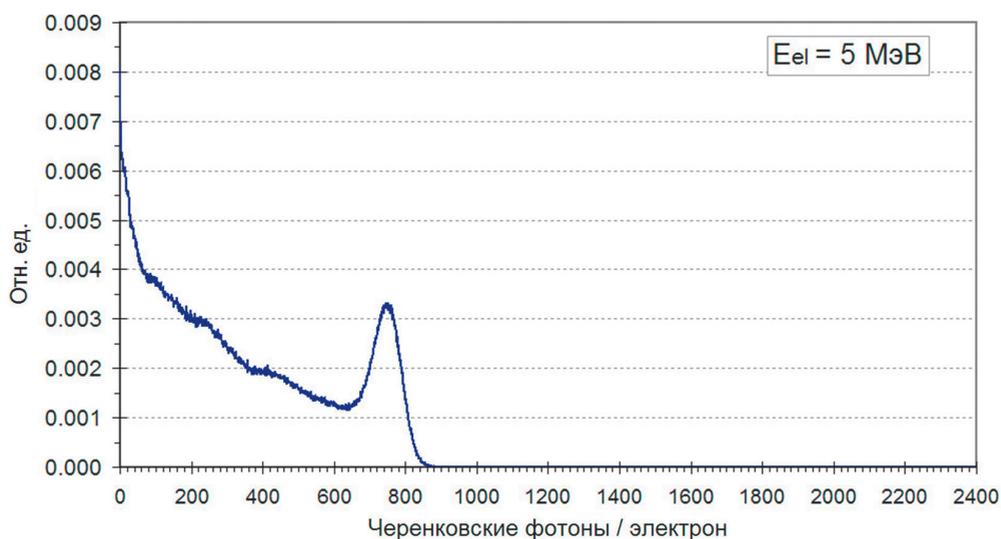


Рис.7. Распределение черенковских фотонов, генерированных электронами с энергией 5 МэВ, направленных по нормали к торцу радиатора вдоль оси симметрии.

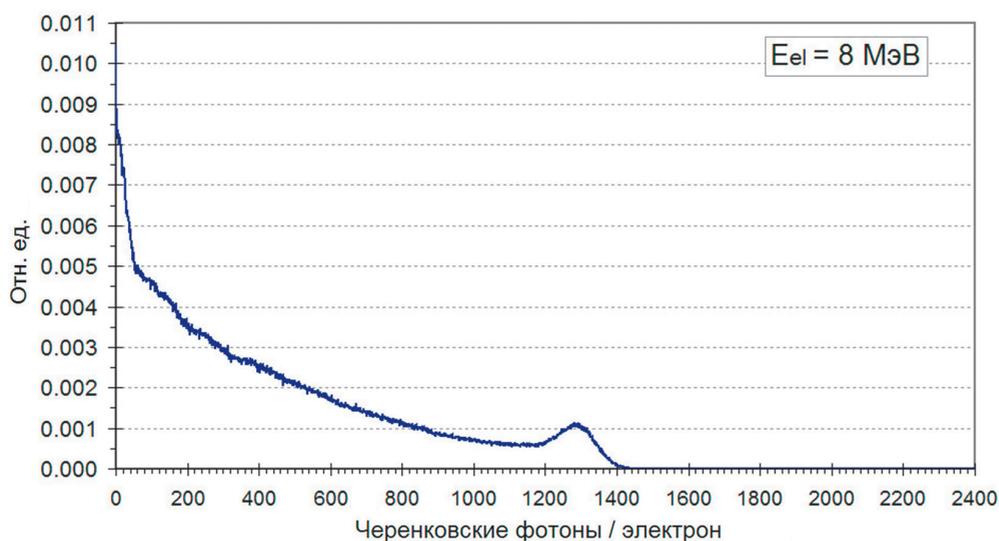


Рис.8. Распределение черенковских фотонов, генерированных электронами с энергией 8 МэВ, направленных по нормали к торцу радиатора вдоль оси симметрии.

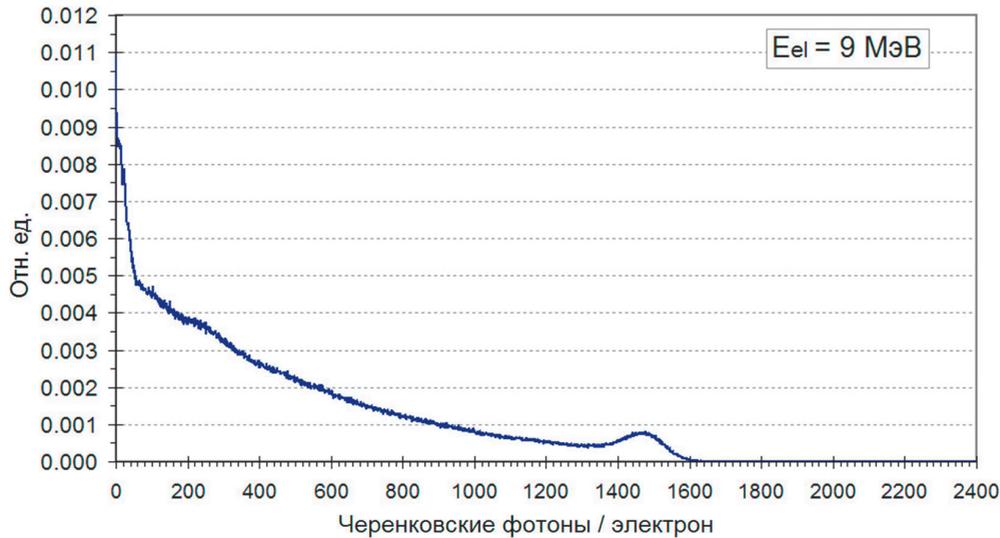


Рис.9. Распределение черенковских фотонов, генерированных электронами с энергией 9 МэВ, направленных по нормали к торцу радиатора вдоль оси симметрии.

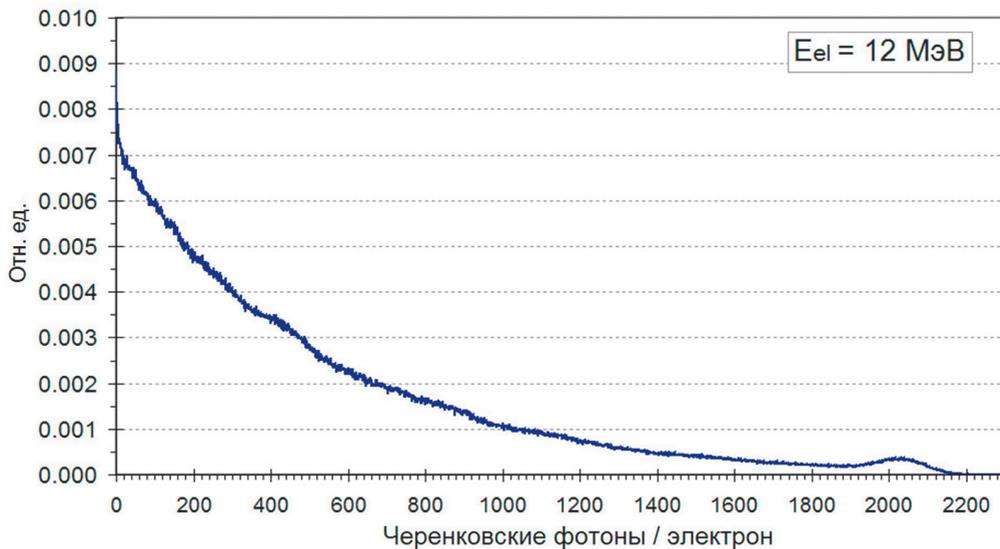


Рис.10. Распределение черенковских фотонов, генерированных электронами с энергией 12 МэВ, направленных по нормали к торцу радиатора вдоль оси симметрии.

Моделирование проводилось с помощью того же программного комплекса *SnegMont*, что и в случае протонов. Код *SnegMont* многократно успешно использовался при решении различных практических задач (например, [8]).

В ПММА движение электронов с энергией, меньшей 0,175 МэВ, не вызывает излучение черенковских фотонов. С достижением этой энергии электроны при моделировании переставали отслеживаться.

На рис.7-10 представлены распределения черенковских фотонов от электронов с энергиями 5; 8; 9 и 12 МэВ, направленных по нор-

мали к торцу радиатора вдоль его оси симметрии.

Общее число генерированных фотонов на один электрон для электронов с энергиями 5; 8; 9 и 12 МэВ оказалось равным 689,6; 1156; 1309 и 1879 соответственно. С точностью до 3% общее число N_{el} генерированных фотонов на один электрон описывается линейной зависимостью:

$$N_{el}(E_{el}) = 168,32 \cdot E_{el} - 174,54 \text{ [фотон/электрон]}, \quad (3)$$

где E_{el} – энергия электрона в МэВ. Это не универсальная формула, она верна только для рассматриваемого детектора.

Установление соответствия между данными для протонов и электронов

Обозначим через $N_p(E_p)$ среднее общее число черенковских фотонов, генерированных протонами с энергией E_p .

Условие $N_{el}(E_{el}) = N_p(E_p)$ выполняется для электронов с энергией

$$E_{el} = (N_p(E_p) + 174,54)/168,32, \quad (4) \quad E_{el} = 9,38 \text{ МэВ.}$$

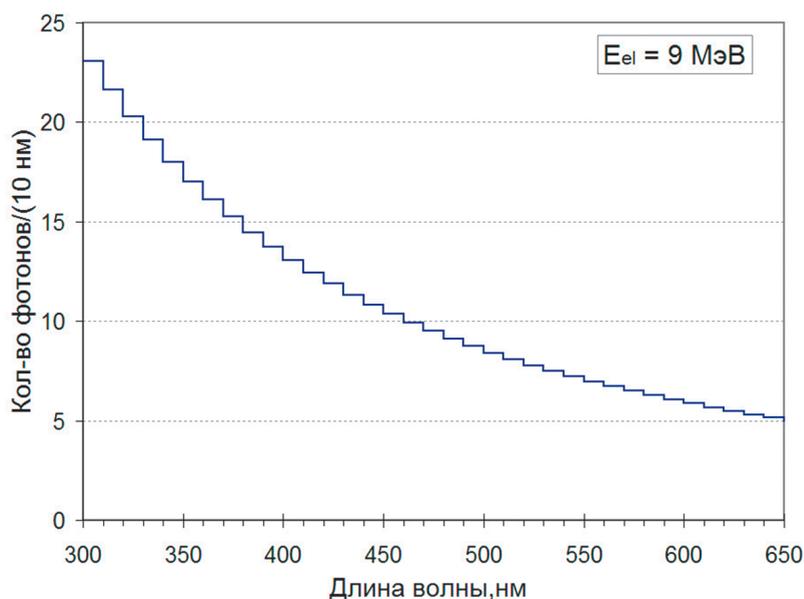


Рис.11. Количество созданных черенковских фотонов в интервалах длин волн 10 нм на 1 см пути в ПММА электрона с энергией 9 МэВ.

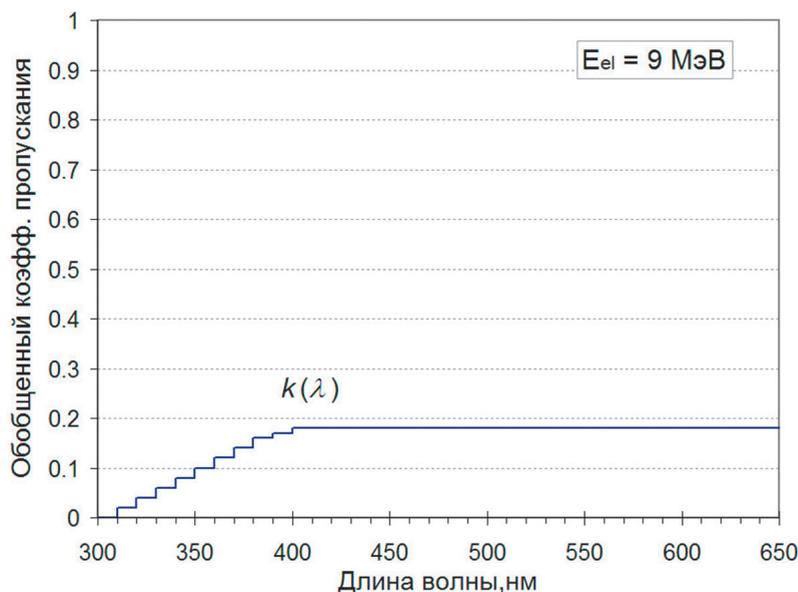


Рис.12. Возможный вид спектральной кривой обобщенного коэффициента пропускания $k(\lambda)$.

что следует из формулы (3). Ранее было определено, что при $E_p = 600$ МэВ для случая, когда направление падения протонов на детектор пересекает ось симметрии цилиндрической части радиатора под прямым углом, $N_p(E_p) = 1405$ фотон/протон. Из (4) следует, что соответствующая энергия электрона $E_{el} = 9,38$ МэВ.

Таким образом, определена энергия электронов, которые дают то же среднее общее число генерированных черенковских фотонов, что и протоны с энергией 600 МэВ, падающих сбоку на детектор в плоскости, включающей ось симметрии цилиндрической части радиатора.

Что касается углового направления черенковских фотонов в момент их образования (конус Черенкова), то при дальнейшем моделировании их переноса от точки генерации до входного окна ФЭУ эти начальные направления можно разыгрывать как изотропные. Для электронов это очевидно, поскольку их пробеги малы, и электроны сами по себе многократно меняют направление. Фотоны, генерированные падающими сбоку протонами, хотя и движутся первоначально под углом Черенкова, попадают на фторопластовый отражатель раньше, чем на входное окно ФЭУ, а от фторопласта они отражаются изотропно.

На пути к окну ФЭУ потоки черенковских фотонов ослабляются. Конечный сигнал на

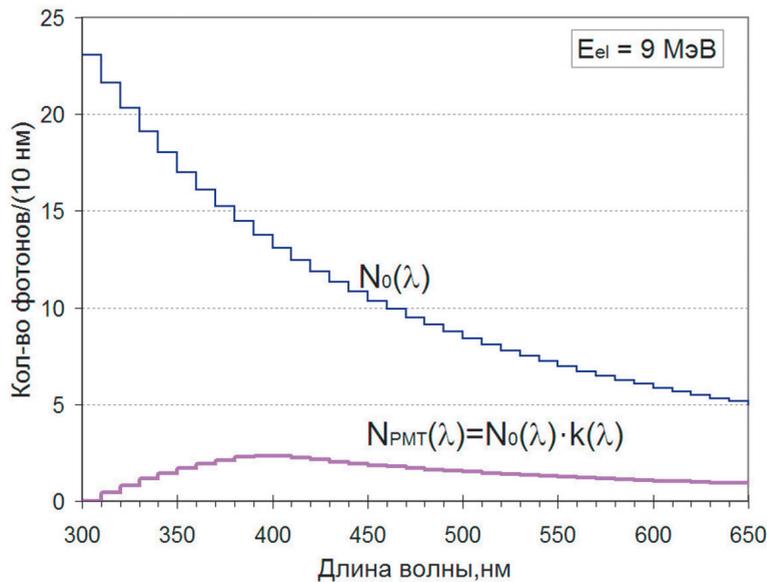


Рис.13. Количество созданных черенковских фотонов в интервалах длин волн 10 нм на 1 см пути в ПММА электрона с энергией 9 МэВ в месте генерации (верхняя кривая) и на входе в окно ФЭУ.

выходе ФЭУ является прямой функцией спектра тех фотонов, которые попадают на входное окно. Указанный спектр, в свою очередь, зависит от общего усредненного количества черенковских фотонов, генерированного одной исходной заряженной частицей. Эта зависимость проиллюстрирована на рис.11-13. Расчеты были проведены на основе формулы (2).

Важной характеристикой детектора является спектральная кривая обобщенного коэффициента пропускания $k(\lambda)$. Строго говоря, она различна для разных локализаций области генерации черенковских фотонов, но если эти области близки, то и $k(\lambda)$ можно считать со-

падающими. Это совпадение будет более точным, если эксперимент с воздействием пучка протонов на черенковский детектор проводить с той его конфигурацией, которая была при проведении эксперимента с электронами, т. е. со снятой крышкой, поскольку в этом случае обеспечится равная площадь фторопластового отражателя.

Заключение

В представленной работе предложены подходы к созданию методики калибровки черенковского детектора га-

лактических и солнечных космических лучей на основе компьютерного моделирования методом Монте-Карло, а также натуральных экспериментов по воздействию на детектор пучков как протонов, так и электронов. В частности, показано, что калибровка прибора с помощью электронов с энергией 9,38 МэВ, воздействующих на радиатор детектора при снятой крышке, эквивалентна калибровке при боковом падении на детектор пучка протонов с энергией 600 МэВ.

Авторы выражают благодарность Гузову В.Д. и Верхуше Ю.А. за помощь в подготовке материалов статьи.

Литература

1. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Оценка влияния протонов солнечных космических лучей на скорость ионизации нижней атмосферы Земли во время события GLE N 61 // Труды Кольского научного центра РАН. Гелиогеофизика, 2018. Т. 9, N 5. С. 82-86.
2. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А., Гвоздевский Б.Б. Влияние протонов космических лучей на образование вторичных частиц и ионизацию в атмосфере Земли // Труды Кольского научного центра РАН. Гелиогеофизика, 2019. Т. 10, N 8(5). С. 240-249.
3. Минлигарев В.Т., Качановский Ю.М., Паньшин Е.А., Алексеев И.В., Оборин А.В., Трофимчук С.Г., Цветков И.И., Рубинштейн И.А., Оседло В.И. Создание распределенной эталонной базы для радиометрической аппаратуры гелиогеофизических комплексов космических аппаратов гидрометеорологического назначения // Мир измерений, 2016, N 1.

4. Джелли Дж. Черенковское излучение и его применения. М.: Иностранная литература, 1960.
5. Зрелов В.П. Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1968. Т. 1, 2.
6. URL: <https://refractiveindex.info> (дата обращения: 19.01.2001).
7. Фоков Г.А., Шульгович Г.И. Расчет аппаратурных функций отклика стандартного NaI детектора гамма-излучения с помощью универсального программного кода SNEGMONT // Сборник материалов Четырнадцатого ежегодного семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ», 19–23 ноября 2007 г., в 2-х ч. Обнинск: ГОУ «ГЦИПК», 2008. Часть 1. С. 145-158.
8. Лукашевич Р.В., Фоков Г.А. Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования // Приборы и методы измерений, 2017. Т. 8, N 3. С. 246-253.

On the Calibration of the Cherenkov Detector of Galactic and Solar Cosmic Protons with Energies of 600 MeV and More

Fokov Gennady, Kozhemyakin Valery
(Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX», Minsk, Belarus)

Abstract. This article discusses a possible approach to creating a calibration technique for the Galactic and Solar Cosmic Proton Cherenkov Detector. The method is based on the Monte Carlo simulation of proton and electron transfer and their generation of Cherenkov photons in the polymethylmethacrylate radiator. It is shown that, under certain conditions, the device calibration with electrons of 9,38 MeV energy is equivalent to the calibration with a 600 MeV proton beam incident laterally on the detector.

Key words: Cherenkov detector, galactic protons, solar protons, Monte Carlo method, Cherenkov photons, calibration.

Г.А.Фоков (гл. спец.), В.А.Кожемякин (к.т.н., с.н.с., дирек.) – Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ» Открытого акционерного общества «МНИПИ», г. Минск, Республика Беларусь.

Контакты: тел. +375 (17) 270-40-16; e-mail: director@atomtex.com, info@atomtex.com.