

УДК 523.4 -854

РЕГИСТРАЦИЯ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИБОРОМ СТЭП-Ф В ОБЛАСТИ БРАЗИЛЬСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

В.Н. Дубина

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
 61022, Украина, Харьков, пл. Свободы, 4
 E-mail dubina@phf.univer.kharkov.ua
 Received 31 October 2011*

Представлены результаты компьютерного моделирования с использованием пакета Geant4 8.2 а также экспериментальные данные, полученные в рамках проекта КОРОНАС-ФОТОН. Исследуются возможности прибора регистрировать спектральное распределение тормозного излучения первичного потока электронов, попадающего на прибор. Анализируются возможные зависимости спектрального распределения от первичной энергии электрона. Рассматриваются механизмы и условия регистрации, гамма-квантов прибором. Программы моделирующие работу прибора СТЭП-Ф разработаны на языке C++ и работают под управлением ОС Red Hat LINUX 6.2 FEDORA [1].

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тормозное излучение, фотодиод, кремниевая матрица, предстоящий детектор, сцинтиллятор, канал типа частиц, открытие канала, метод совпадений, временное/пространственное распределение.

BREMSSTRAHLUNG RECORDING BY STEP-F DEVICE IN BRASILIAN MAGNETIC ANOMALY REGION

V.N. Dubina

*Kharkiv National University by V.N. Karazin
 61022, Ukraine, Kharkiv, sq. Svobody, 4*

The results of the computer simulation by means Geant4 8.2 package, CORONAS-PHOTON experimental data are presented. Device ability to register primary electron's bremsstrahlung spectrum was investigated. The possible gamma-spectrum dependence on primary electron's energy and device response on these changes was analyzed. Mechanisms and conditions of the device gamma-quantum registration are discussed. The simulation STEP-F device program was made by C++ program language under OS Red Hat LINUX 6.2 FEDORA operation [1].

KEY WORDS: bremsstrahlung, photodiode, silicon matrix, ahead detector, scintillator, kind of particle channel, channel opening, coincidence method, time/space distribution.

РЕЄСТРАЦІЯ ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИЛАДОМ СТЕП-Ф В ОБЛАСТІ БРАЗИЛЬСЬКОЇ МАГНІТНОЇ АНОМАЛІЇ

В.М. Дубина

*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна
 61022, Україна, Харків, пл. Свободи, 4*

Представлені комп'ютерні результати, які були отримані за допомогою пакету Geant4 8.2, а також експериментальні дані, отримані зі супутника КОРОНАС-ФОТОН. Досліджуються можливості приладу реагувати на гальмівне випромінювання від первинного потоку електронів, які мають можливість потрапити до приладу. Аналізується можливість наявності залежності спектрального розподілу від первинної енергії електрону. Розглядаються можливі механізми та умови реєстрації гама-квантів приладом. Програми моделювання роботи приладу СТЕП-Ф розроблені на мові C++ та працюють на платформі ОС Red Hat LINUX 6.2 FEDORA[1].

КЛЮЧОВІ СЛОВА: гальмівне випромінювання, фотодіод, кремнієва матриця, попередній детектор, сцинтилятор, канал типа частинки, відкриття каналу, метод збігів, часовий/просторовий розподіл

Научный эксперимент с использованием спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф проводился в составе комплекса научной аппаратуры «ФОТОН» на основе договора о научном сотрудничестве между Харьковским национальным университетом им. В.Н. Каразина и Национальным исследовательским ядерным университетом «МИФИ».

Целью эксперимента было исследование динамики энергетических спектров иpitch-угловых распределений высокоэнергетичных электронов, протонов и альфа-частиц радиационных поясов Земли во время магнитосферных бурь и суббурь, а также при воздействии высокоскоростных потоков солнечного ветра на магнитосферу Земли.

Прибор состоит из блока детекторов СТЭП-ФД, установленного вне герметичного отсека космического аппарата и блока обработки цифровой информации СТЭП-ФЭ, находящегося внутри гермотсека.

Телескопическая система детекторной головки блока детекторов СТЭП-ФД, представленная на рис.1а, содержит два идентичных, последовательно расположенных кремниевых позиционно-чувствительных матричных детектора Д1 и Д2 (размером 45x45 мм и толщиной 380 мкм каждый) и два сцинтилляционных детектора на базе монокристаллов CsI(Tl) с эффективными площадями 36 см²(Д3) и 49 см²(Д4), «просматриваемых» четырьмя фотодиодами большой площади (Д3, см. рис.1б) и фотоэлектронным множителем (Д4)[1]. Детектор Д3 позволяет регистрировать частицы по десяти каналам в диапазонах

энергий электронов 1,2-16 МэВ (далее – ДЗе_1 – ДЗе_10), протонов 7.4-60 МэВ (далее – ДЗр_1-ДЗр_10) и альфа-частиц 29,8-160 МэВ (далее – ДЗа_1-ДЗа_10) [2].

СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПРИБОРА СТЭП-Ф С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ

За время работы на орбите прибор давал надежные данные по электронной компоненте потоков частиц в диапазоне энергий 0,18-0,95 МэВ. Это позволило получить новые данные по динамике электронов во внутренней магнитосфере Земли, по питч-угловому перераспределению потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли, определить время жизни электронов внутреннего радиационного пояса и многое другое [2]. Однако при больших потоках электронов в области Бразильской магнитной аномалии (БМА) наблюдалось завышение значений в показаниях детекторов ДЗ, Д4 относительно потоков в предстоящих детекторах – Д1, Д2 как по каналу электронов, так и по каналам регистрации ионной компоненты потоков частиц.

В области БМА прибор регистрировал существенное увеличение интенсивности потока электронов в диапазоне до 0,95 МэВ (детектор Д2), однако темп роста регистрируемых потоков в диапазоне 1,2-15 МэВ (детектор ДЗ) был значительно больше. На основании этого было сделано предположение, что интенсивный, а главное – протяженный поток электронов, попадающий на весь прибор (рис.1), может создавать поток вторичных гамма-квантов, достаточный для формирования соответствующих сигналов в сцинтилляционных детекторах. В случае попадания интенсивного потока электронов на всю поверхность прибора, вторичное тормозное излучение будет изотропно облучать все детекторы прибора.

Возможности регистрации вторичных гамма-квантов как при попадании в сцинтиллятор, так и в случае непосредственного облучения фотодиодов (рис.1б) были проанализированы.

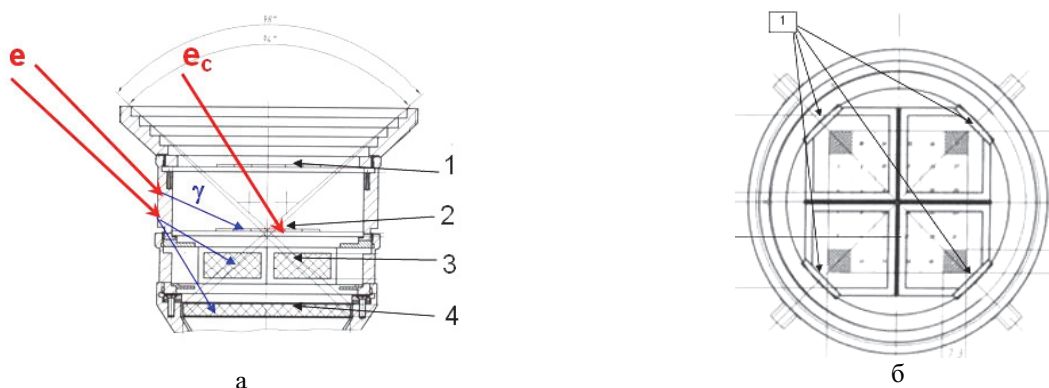


Рис.1. Генерация вторичных гамма квантов при попадании электронов на конструктивы приборов.

а - Расположение матриц: 1- Д1, 2 -Д2 и сцинтилляторов: 3- ДЗ и 4 - Д4 в приборе СТЭП-Ф, е – электроны, γ – вторичное гамма излучение, е_с - триггерная частица; б - вид сверху, 1 - расположение фотодиодов.

Предварительно была проанализирована принципиальная возможность регистрации спектра электронов до 15 МэВ, соответствующего показаниям многоканального сцинтилляционного детектора ДЗ по каналу электронов. На рис.2а представлено полученное энергетическое распределение по каналу электронов, в области максимума интенсивности электронных потоков (область БМА), первичные данные получены за 30 сек., 04:52:00, 11.03.09.

Было проведено моделирование отклика детектора ДЗ на равно распределенный поток электронов в диапазоне регистрации канала ДЗе 1,2-16 МэВ (рис.2б). Моделирование показало, что даже в случае наличия в спектре электронов энергий от 10 МэВ и выше, отношение потока во всем диапазоне энергий ДЗе к потокам в каналах ДЗе_8 - ДЗе_10, должно быть существенно больше. Уменьшение эффективности регистрации электронов с энергией более 10 МэВ связано с ростом радиационных потерь в этом диапазоне энергий электронов. Отсутствие интенсивной высокоэнергетичной компоненты в спектральном распределении электронов, подтверждают и другие исследования электронных потоков в области радиационных поясов [5,6,7].

С другой стороны, моделирование воздействия на прибор прямоугольного спектра электронов до 16 МэВ, показало эффект увеличения потока регистрируемого в первом канале сцинтилляционного детектора - ДЗ_1 (рис.2) за счёт наиболее вероятного значения потерь в этом диапазоне энергий электронов $\Delta E = 1-2$ МэВ. Однако относительно большой сигнал в ДЗ_1 (см. рис.2), также может быть связан с регистрацией гамма-квантов, которые непосредственно попадают в сцинтиллятор, чувствительный объем которого (24 см^3) и эффективность регистрации гамма-квантов существенно превышает такие же параметры у фотодиодов ($1,2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3$).

Минимальные значения, регистрируемые во втором канале (рис.2а), соответствующие диапазону энергий

электронов 2,6- 3,4 МэВ, можно объяснить и как электронной компонентой с соответствующей максимальной энергией в распределении электронов и одновременно отсутствием регистрации тормозного излучения в диапазоне малых энергий (см. далее и рис.3,4,5).

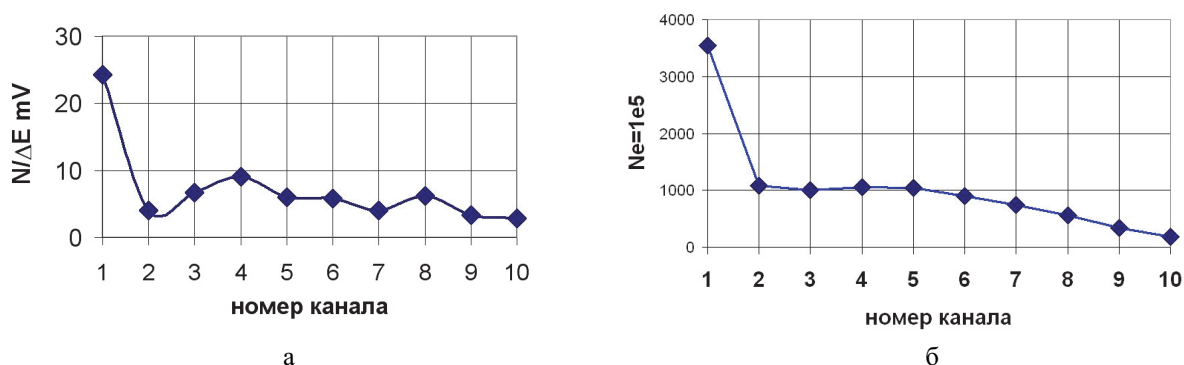


Рис.2. Характерное распределение сигнала в многоканальном детекторе ДЗ при регистрации электронов.

а -распределение за 30 сек, 4:33:00 110309; б - моделирование зарегистрированного спектра в диапазоне энергий 1,5 - 16 МэВ при условии равномерного распределения потока по энергиям.

Поглощение гамма-кванта непосредственно в сцинтилляторе ДЗ, может приводить исключительно к записи в канал ДЗе_1 (первый пороговый уровень многоканального детектора ДЗ диапазон энергий 1,2-2,3 МэВ [2]) из-за относительно низких энергий вторичных гамма квантов(10-1000 кэВ).

Регистрация гамма-кванта в сцинтилляторе детектора ДЗ возможна только при одновременном поглощении электрона в кремниевой матрице Д2 или «непопадании» этого электрона в последующий детектор ДЗ (рис.1). Это связано с тем, что согласно проведенному моделированию, двойное комптоновское рассеяние на предстоящих детекторах Д1 и Д2, с последующим взаимодействием со сцинтилляционным детектором Д3 имеет практически нулевую вероятность.

Попадание гамма-кванта непосредственно в фотодиод (рис.1б) может привести к генерации вторичных электронов с суммарной энергией, соизмеримой с энергией первичного гамма-квантов. Прямое преобразование энергии частицы в оптические фотоны в сцинтилляторе идёт с существенными энергетическими потерями - так называемый конверсионный эффект или конверсионная эффективность. Так, например, для кристалла CsI(Tl), 1МэВ поглощенной энергии в сцинтилляторе соответствует до 10 кэВ энергии поглощенной в фотодиоде [4]. При непосредственном попадании вторичного гамма-кванта в фотодиод возможно, как полное его поглощение, так и частичная потеря энергии за счёт комптоновского рассеяния. Таким образом, гамма-квант с энергией до 100 кэВ может оставить в фотодиоде энергию соответствующую 10 МэВ энергии по каналу регистрации электронов и т.п. Возможность поглощения вторичного гамма-кванта непосредственно в фотодиоде, в момент срабатывания электронного канала, позволяет объяснить заполнение всех каналов детектора ДЗ, работающего в режиме регистрации электронов (рис.2а).

Если минимум числа счётов в канале ДЗе_2 связан с минимумом распределения тормозного излучения, регистрируемого непосредственно фотодиодами, то распределения, регистрируемые по каналам, соответствующим большей энергии, должны были бы иметь монотонный характер (рис.3). Отсутствие монотонности показаний детектора дало основание предположить возможность суперпозиции тормозных спектров от разных энергий первичных электронов.

Вариация возможных толщин генерирующих экранов и энергий электронов показала близость спектральных распределений гамма-квантов в диапазоне энергий до 100кэВ (рис.3а). Учёт чувствительности прямой регистрации гамма-квантов фотодиодами продемонстрировал эффект выравнивания максимума распределения тормозного излучения в области 40 кэВ за счёт не поглощения гамма-квантов большей энергии (рис.3а).

Воздействие гамма-излучения на детектирующую систему прибора, должно приводить к регистрации примерно одинакового спектра по всем каналам типа частиц. Отличия определяются условиями определения типа частиц и интегрирующим шагом диапазонов энергий, который был разный у разных каналов типа частиц.

В предположении наличия максимума распределения, численное значение которого определялось моделированием отклика фотодиода на прямое попадание гамма-квантов, были проанализированы распределения, полученные с помощью детектора ДЗ, работающего в режиме регистрации протонов и альфа-частиц. На рис.4 представлены распределения, полученные интегрированием потоков частиц в области БМА (04:52:00-05:00:00, 11.03.09). Целью интегрирования было определение предельных значений энергий, регистрируемых по обоим каналам. Совпадение максимумов в распределении обоих каналов – порядка 600 мВ, дало основание предположить регистрацию прибором суперпозиции тормозного спектра от электронов в широком диапазоне энергий всеми каналами (в том числе и электронным) в детекторе ДЗ .

Совпадение максимумов распределения по каналам протонов и альфа частиц позволило оценить соответствие между расчётной энергией в максимуме распределения гамма-квантов: 30-40 кэВ и диапазоном регистрации максимума протонного и альфа - каналов 500-600 мВ.

Если справедливо такое соответствие, то канал регистрации электронов детектором ДЗ, имея энергетические диапазоны регистрации частиц порядка 30 мВ (каналы ДЗе_1 – ДЗе_8), должен бы был разрешать энергии частиц с точностью 1 -2 кэВ. Ожидаемый максимум спектра тормозного излучения – 500 - 600 мВ возможно разделяется в таком случае по каналам ДЗе_9(382- 592 мВ) и ДЗе_10(592-1000 мВ) и интегрирован, в данном случае – наоборот, слишком широким диапазоном регистрации.

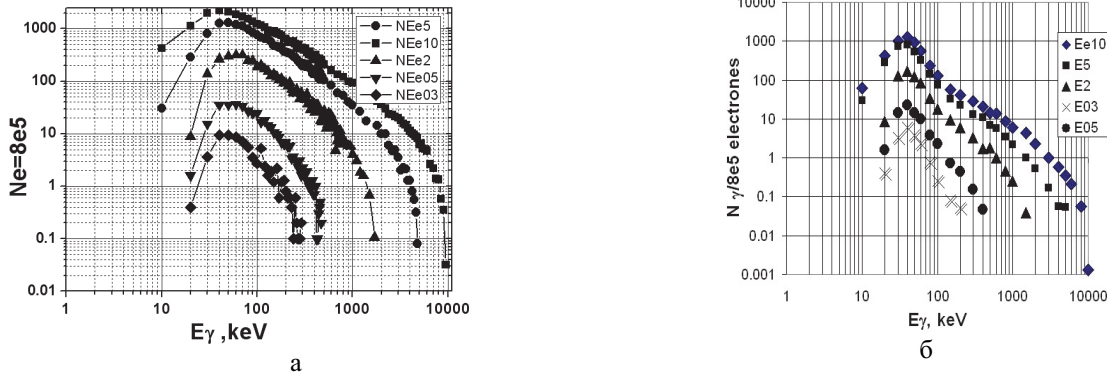


Рис.3. Спектральное распределение тормозного излучения электронов в диапазоне энергий $E_e=300$ кэВ-10МэВ. а - после прохождения электронами 3 мм Al; б- при поглощении гамма-квантов в фотодиоде прибора СТЭП-Ф.

Таким образом, электронный канал ДЗе, при отсутствии электронного потока, соответствующего диапазона энергий, в интенсивных, протяженных электронных потоках, в области БМА может регистрировать низкоэнергетичную часть распределения тормозного излучения, максимум которого возможно распределен между двумя последними каналами. Показания первого канала могут соответствовать как электронам в диапазоне энергий до 2 МэВ, так и гамма-квантам, регистрируемым непосредственно сцинтиллятором. Отсутствие монотонности распределений может быть связано с аппаратным разрешением энергии порядка нескольких кэВ.

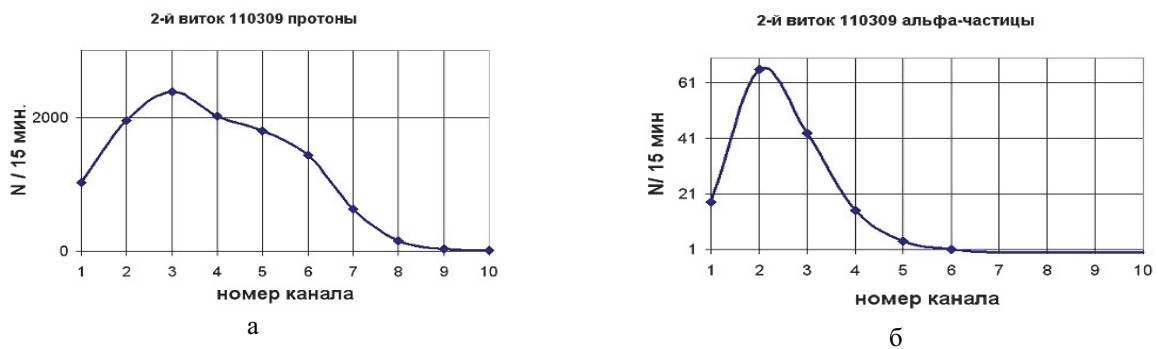


Рис.4. Распределения, зарегистрированных потоков в детекторе ДЗ в области БМА при наличии интенсивных электронных и протонных потоков(возможно и альфа-частиц). а - протонный канал; б- канал альфа-частиц.

Большая, по сравнению с электронным каналом, интеграция потоков энергетическими диапазонами детектора ДЗ по каналам протонов и альфа-частиц, формирует монотонное распределение, с выраженным максимумом и характерным для тормозного излучения затуханием с ростом энергии. Диапазоны энергетического интегрирования потоков 200 мВ – по каналу протонов и 500 мВ по каналу альфа частиц, в случае регистрации гамма-квантов должны соответствовать $\Delta E=13-40$ кэВ. Тогда весь возможный диапазон регистрации гамма-квантов составит порядка 200 кэВ.

Отсутствие сигнала в каналах ДЗа_7 - ДЗа_10 (рис.4б) подтверждает соответствие диапазонов регистрации вторичного тормозного излучения одинакового спектра по всем каналам. При одинаковых внешних потоках, в протонном канале регистрируется сигнал с максимальной энергией не менее 2250 мВ, отсутствие же сигнала в канале ДЗа_7 говорит об отсутствии сигнала более 3200 мВ. В то же время предыдущий канал ДЗа_6 – диапазон 2650 – 3200 мВ, коррелирует с диапазоном последнего протонного канала ДЗ_10р– 2250- 5000В. Другая возможная причина отсутствия сигнала в последних каналах ДЗа может быть связана с соотношением амплитуд в распределении тормозного излучения в области максимума распределения и максимальной регистрируемой энергией - 200 кэВ. Согласно проведенным расчётам (рис.3), в зависимости от первичной

энергии электрона это соотношение может варьироваться от сотни до десяти. В этом случае, при низкой выборке альфа-канала, для попадания в последние каналы просто может не хватать статистики.

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ РЕГИСТРАЦИИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЕРВЫМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ (ДЗ)

При прохождении космическим аппаратом КОРНАС-ФОТОН области БМА наблюдался рост интегральных потоков, регистрируемых по каналам ДЗ, относительно показаний кремниевых матриц. Так, при примерно равных потоках зарегистрированных детекторами Д1 и Д2, при прохождении радиационного пояса (110309,1:51:00 UTC) и прохождении области БМА (110309,03:14:00 UTC) было отмечено возрастание интегральных потоков по каналу ДЗе с 27 до 3085 (время наблюдения 30 сек) более чем в 100 раз (рис.5а). Конечно, только изменением спектрального распределения электронов это объяснить трудно.

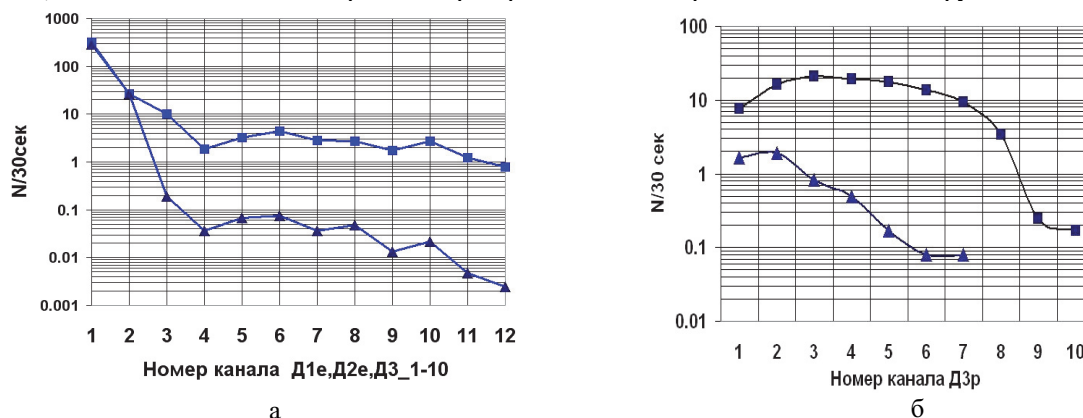


Рис.5. Распределение, темпов счета за 30 сек. в электронном (а) и протонном (б) каналах в области радиационного пояса – ▲, в области БМА – ■.

б - ▲ - $D2e=1,8 \cdot 10^3$, $D1p=2,5 \cdot 10^3$, $D2p=79$, $D3p=5,2$; ■ - $D2e=5,5 \cdot 10^4$, $D1p=6,8 \cdot 10^2$, $D2p=74$, $D3p=1,0 \cdot 10^2$.

При прохождении максимума интенсивности радиационного пояса, интенсивность потока попадающего на боковые поверхности прибора не велика. При прохождении максимума интенсивности БМА, которая в частности имеет более протяженные размеры, вся поверхность прибора и соответствующие конструктивы подвергаются воздействию широкого изотропного потока. И хотя в режиме регистрации плотности потока (прохождение электронов через телескопический коллиматор и детектирующие матрицы), зарегистрированные потоки не дают существенного превышения плотностей потока или даже дают близкие значения (как в приведенном примере), интегральный поток регистрируемого гамма-излучения будет пропорционален не столько плотности потока, сколько пространственным размерам потока с максимальной интенсивностью.

Характерным для некоторых областей БМА является наличие пространственного разделения протонных и электронных потоков. Это разделение позволило сравнить показания детекторов по каналу протонов при минимальных потоках электронов, зафиксировав, характерные показания протонного канала по кремниевым матрицам, с такими же показаниями кремниевых матриц (канала протонов), но при существенном увеличении электронной компоненты смешанного потока.

Так, например, на рис.5б, представлено распределения потоков по каналам ДЗр, полученные при одинаковых показаниях Д1р Д2р, но при разных потоках, зарегистрированных по каналу Д2е, данные получены 1 мая 2009 года во времена 01:59 и 02:05 соответственно.

Как видно на рис.5б, в отсутствие существенных электронных потоков (и протонных в диапазоне энергий 15,6-66,0 МэВ) запись в ДЗр практически не производится. На рис.5б видно, что возрастание электронной компоненты потока, приводит к возрастанию интегрального потока в ДЗр, но не изменило величину потока, регистрируемого по каналу Д2р. Из этого следует, что в присутствии интенсивных протонных потоков вклад электронной компоненты в показания Д1р, Д2р незначителен.

Условием регистрации высокоэнергетических протонов по каналу ДЗр, являются большие энергетические потери частицы в кремниевых матрицах. Но так как показания последних не изменились, по сравнению со случаем отсутствия электронного потока, то можно сделать вывод, что поток частиц, имеющих потенциальную возможность регистрироваться в ДЗр, не увеличился. Отсюда следует, что в ДЗр происходит регистрация вторичных частиц: тормозных гамма-квантов, а условием регистрации гамма-квантов является поглощение в момент срабатывания канала ДЗр протонов в Д2р, которые предварительно оставили большую поглощенную энергию в Д1. Этим же эффектом объясняется и соизмеримость регистрируемых потоков в Д2р и в ДЗр (рис.5,6а).

Справедливость представленного механизма регистрации сигнала в ДЗр, подтверждается не только соответствием регистрируемых интегральных потоков Д2р и ДЗр, но и соответствием пространственных распределений (рис.6а). Соответствие пространственных распределений является подтверждением того, что

наличие электронного потока не является достаточным условием регистрации вторичного тормозного излучения в ДЗр. Только срабатывание Д1р, Д2р на большую поглощенную энергию приводит к записи гамма-кванта в ДЗр. Как видно на рис.6а, именно такая ситуация и реализуется в области БМА. В то время как электронный поток, являющийся источником тормозного излучения, монотонно увеличивается при продвижении космического аппарата к максимуму интенсивностей электронных потоков (время 4:51:30), каналы Д1р, Д2р регистрируют частицы иного пространственного распределения. Также следует обратить внимание на пространственные распределения, полученные при других исследованиях областей магнитосферы Земли (рис.6б). На этих распределениях видно, что пространственное распределение электронов разных энергий ведет себя примерно одинаково. В то время как пространственное распределение протонов, ведет себя иначе, чем электронное, также как и разные энергетические компоненты протонных потоков, также ведут себя по-разному.

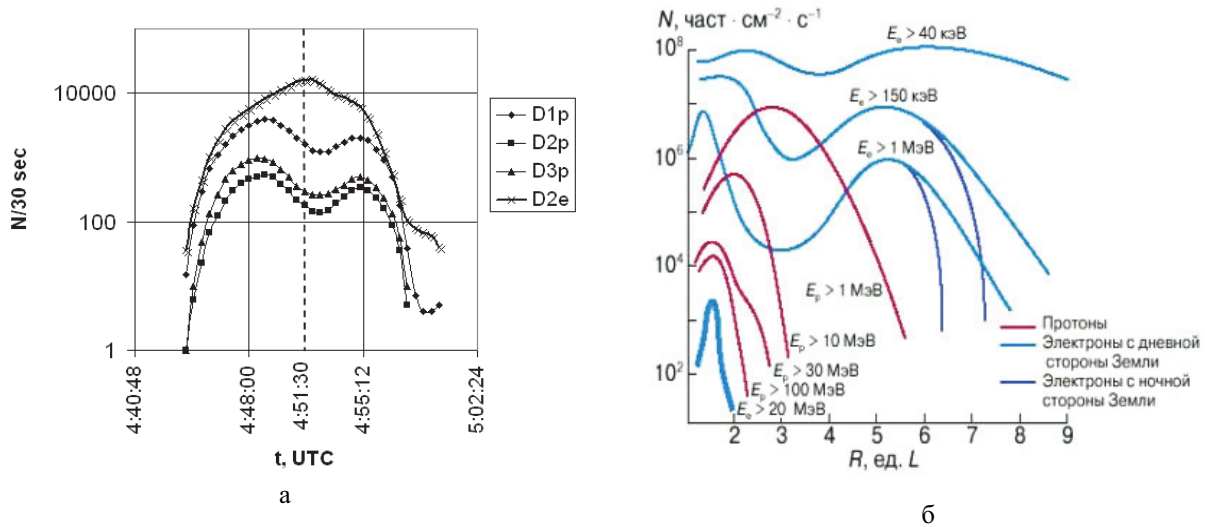


Рис.6. Пространственные распределения электронов и протонов в областях магнитосферы.

а - временная, пространственная зависимость сигнала в Д1, Д2 и Д3 по каналу протонов и Д2 по каналу электронов 11 марта 2009; б - пространственные распределения электронов и протонов в зависимости от L – оболочки [5].

Процесс регистрации гамма-квантов является вероятностным и определяется интенсивностью электронных потоков, а главное пространственными размерами: широкий электронный поток приводит к изотропному облучению всех конструктивов, непосредственно расположенных возле детекторов. В этом случае вероятность поглощенной в во второй кремниевой матрице частице быть зарегистрированной по каналу Д2 или вероятность регистрации гамма-кванта по каналу Д3 становятся примерно равными. Такой механизм объясняет примерное равенство интегрального потока в Д3 и показаний в Д2. Например, 11.03.09, за время с 4:44 до 5:00 по каналу Д2а было зарегистрировано 142 частицы, по каналу Д3а - 147, для протонов, за это же время по каналу Д2р было зарегистрировано- 6542, по каналу Д3р - 11455.

Поток, регистрируемый в Д2 по каналу электронов, как правило превышает поток, регистрируемый в Д3, что говорит о превышении интенсивности потоков электронов в диапазоне энергий 0,35 – 0,95 МэВ над потоком регистрируемых в этой области гамма-квантов.

По каналу протонов поток, регистрируемый в Д3 может превышать поток регистрируемый в Д2. Такие отличия с электронным каналом могут быть связаны с тем что условия открытия канала электронов для записи в Д2, Д3, Д4 близки и определяются энергетическими потерями пролетных электронов которые в широком диапазоне энергий практически одинаковы (рис.7).

В отличие от канала электронов, условия записи гамма-квантов по каналу Д3р существенно отличаются энергетическими потерями в кремниевых матрицах от условий регистрации по каналу Д2р. На рис.7 видно, что в диапазоне энергий Д2р -7.4-10 МэВ, средние потери энергий в обоих детекторах составляют $\Delta E=3-4$ МэВ. В то же время условием открытия канала Д3р, при энергии протона до 60 МэВ (максимальная энергия диапазона регистрации протонов в Д3, соответствующая минимальным энергетическим потерям) будет энерговыделение меньше 1МэВ в каждой кремниевой матрице. Таким образом, возможно, что часть потока, превышающая показания Д2р и регистрируемая в виде гамма-квантов по каналу Д3р, может определяться поглощением высокоэнергетичных электронов во второй кремниевой матрице.

Несколько иная картина складывается в случае альфа - канала. Там работает такой же механизм разделения частиц по энергии, однако показания Д2а, Д3а близки. Это, по всей видимости, связано с тем, что минимальным условием открытия канала Д3а является энерговыделение $\Delta E=2-3$ МэВ в каждой кремниевой

матрице, что существенно превышает максимально возможное энерговыделение электронов при толщинах кремниевых матриц 380мкм (рис.7).

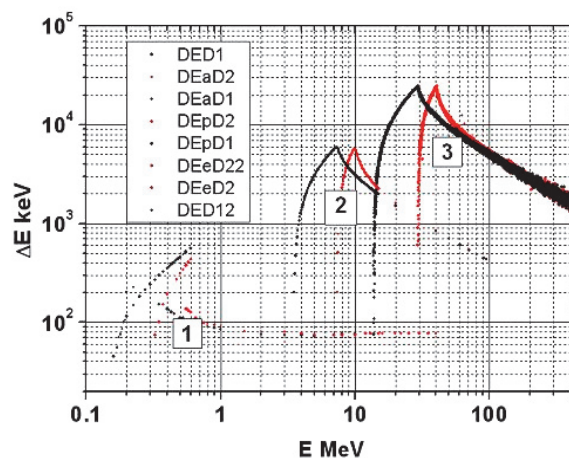


Рис.7. Зависимость поглощенной энергии от энергии первичных частиц в кремниевых матрицах Д1 (чёрная кривая), Д2 (серая кривая) от типа частиц, 1- электроны; 2-протоны; 3 - альфа частицы.

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В МЕСТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРИБОРА СТЭП-Ф ПОВТОРИЧНОМУ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ

Регистрируемый поток гамма-квантов, соизмеримый с регистрируемым прибором потоком электронов, не может создаваться исключительно этим потоком частиц. Это в частности связано с тем, что оптимальная для генерации тормозного излучения энергия электронов, поглощающаяся в обеих кремниевых матрицах -500 кэВ имеет радиационный выход не соответствующий полученным значениям потока гамма-квантов в приборе. Поэтому для подтверждения возможности регистрации прибором СТЭП-Ф таких потоков гамма-квантов необходимо определить возможные источники тормозного излучения – мишени и условия возникновения соответствующих потоков электронов в месте расположения прибора.

По геометрическому фактору и зарегистрированным электронным потокам в Д1 и Д2 можно судить о плотности потока электронов, попадающих на весь прибор. Плотность потока электронов, воздействием которого на весь прибор, могут создаваться измеренные потоки гамма-квантов, определялась по площади регистрирующей матрицы размер которой -19 см². При расчёте интегрального потока первичных электронов выбиралось время прохождения спутником области БМА – 15 мин. Максимальный поток электронов, регистрируемый прибором за это время составил $2 \cdot 10^6$, что соответствует плотности потока $10^5/\text{см}^2$. Площадь поверхности прибора - 295 см² соответствует возможности сгенерировать гамма-излучение, направленное внутрь прибора (рис.1) потоку $2,9 \cdot 10^7$ электронов, что в свою очередь соответствует потоку гамма-квантов – $1,3 \cdot 10^5$. Детектор Д3 за это время, по каналам электронов, протонов и альфа частиц зарегистрировал $6,8 \cdot 10^4$ событий, что может соответствовать $1,54 \cdot 10^7$ электронов. Приведенные результаты определяют возможность конструктивов прибора являться источником гамма-квантов.

Однако следует отметить, что количество гамма-квантов, попадающих в прибор, должно быть существенно больше, чем количество зарегистрированных при прямом попадании гамма-квантов на чувствительную область фотодиодов.

Качественно, соотношение зарегистрированных гамма-квантов соотносится к гамма-квантам, попавшим в прибор как соотношение площади поверхности прибора (скажем так: «если бы вся поверхность прибора была детектором») к чувствительной площади фотодиодов.

То есть реальный поток электронов, создающий гамма-излучение в приборе будет не $1,54 \cdot 10^7$, а $1,54 \cdot 10^7 / 4,3 \cdot 295 = 1,0 \cdot 10^9$.

В предположении однородности плотности потока электронов, возможным источником вторичного излучения должна быть поверхность не менее 10^4 см^2 , расположенная в непосредственной близости от детектирующей системы прибора, что соответствует наличию некоего экрана размером 100x100 см, при габаритных размерах прибора 9x8 см. Более вероятно что этих конструктивов - четыре - с каждой стороны боковой поверхности прибора и тогда их размеры: 50x50 см представляются более вероятными.

Важным моментом приведенного анализа является то, что поверхность прибора не может являться единственным источником гамма-квантов и что сам прибор не является достаточным защитным экраном для гамма-квантов.

ОТКРЫТИЕ КАНАЛА Д4 ЭЛЕКТРОНАМИ В ДИАПЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 0,5-0,95 МЭВ (Д2е)

Регистрация потока частиц, обладающего монотонным непрерывным спектральным распределением, последовательно расположенными детекторами предполагает наличие определенных соотношений, между

регистрируемыми в соседних детекторах, потоками. В частности, превышение интегральных потоков с меньшими энергиями, зарегистрированных предыдущим детектором, над потоком, зарегистрированным последующим детектором с большими энергиями.

В случае последнего сцинтиляционного детектора, предназначенного для полного поглощения электронов с энергией более 15 МэВ, протонов с энергией более 60 МэВ и альфа-частиц с энергией более 200 МэВ, наблюдалось существенное превышение показаний по сравнению с предстоящим детектором – Д3 (см. расположение детекторов на рис.1). В случае регистрации по ионным каналам наблюдалось также превышение потоков, регистрируемых второй кремниевой матрицы. На основании этого было сделано предположение о не ионной природе этого сигнала, а для канала регистрации электронов, о том, что этот сигнал не связан с высокоэнергетичной частью спектрального распределения электронов.

Выбор канала типа частиц для каждого последовательно расположенного детектора определяется поглощенными энергиями в предыдущих детекторах, исходя из этого, было сделано предположение, что, по крайней мере, ионные каналы, в отличие от каналов Д3, открываются не поглощением ионов во второй кремниевой матрице.

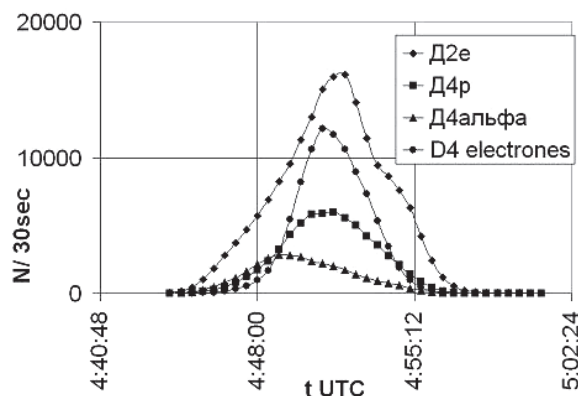


Рис.8. Сравнение временных характеристик сигнала в Д2_электроны с сигналами в Д4.

В области максимальной интенсивности потоков (район БМА) наблюдалась следующая закономерность, сумма потоков, зарегистрированных по всем каналам Д4 равнялась по порядку величины потоку в Д2 по каналу электронов. Так, например, за время 15 мин. поток в Д2е составил $1,88 \cdot 10^5$, а в Д4е+Д4р+Д4а= $1,8 \cdot 10^5$ (время наблюдения 110309 04:44-05:00), в другой серии: за время 20 мин. поток в Д2е составил $1,4 \cdot 10^5$, а в Д4е+Д4р+Д4а= $2,0 \cdot 10^5$ (время наблюдения 020909 02:21-02:41). В последнем случае по каналу протонов поток в Д4р превысил поток в Д3р, Д2р более чем 50 раз.

Проведенное моделирование работы прибора СТЭП-Ф, а также обработка экспериментальных данных показали, что Д2е достаточно адекватно измеряет часть потока электронов в диапазоне энергий до 1МэВ. На основании этого было сделано предположение, что условием открытия каналов Д4 является поглощение электронов именно этого диапазона энергий.

Как отмечено ранее, по каналу протонов и альфа частиц регистрация тормозного излучения при непосредственном попадании гамма-кванта в фотодиоды детектора Д3 возможна при полном поглощении энергии ионов во второй кремниевой матрице. Регистрация части потока гамма-квантов в последнем, четвертом детекторе Д4, судя по временным (пространственным) характеристикам распределения в Д4 (в отличие от таких же распределений для Д3 – рис.6а), хорошо согласуется с распределением в Д2 по каналу электронов по форме (рис.8), и количественно, как было указано выше.

Возможность открытия Д4 по всем каналам электронами и, соответственно, превышение значений потоков, регистрируемых по каналу Д3, определяется (как уже отмечалось выше) спецификой открытия канала ионами с большей энергией. Частицы с большей энергией должны оставить в Д1_Д2 существенно меньшую энергию чем частицы регистрируемые в Д3 (рис.7). Соответственно менее жесткие условия позволяют открывать канал Д4 частицам с меньшей энергией, но поглощающимися в Д2.

На рис.7 видно что протон с энергией 80 МэВ (соответствующей максимальной энергии, второго сцинтиляционного детектора по каналу протонов) оставляет в Д1, Д2 такое же ΔE как и электрон с энергией порядка 500 кэВ. Альфа-частица с энергией 300 МэВ (соответствующей максимальной энергии второго сцинтиляционного детектора по каналу альфа-частиц) оставляет в Д1, Д2 существенно меньшую энергию чем частица с максимальной энергией регистрируемая в Д3 (150 МэВ $\Delta E \sim 4$ МэВ) – порядка $\Delta E = 1$ МэВ, – что может соответствовать энерговыделению релятивистского электрона в кремниевой матрице толщиной 380мкм.

Условием выбора канала протонов Д2, даже при самых незначительных поглощенных энергиях во втором кремниевом детекторе, является оставление в предыдущем детекторе не менее 6 МэВ (рис.7-2), что невозможно при прохождении электроном матрицы толщиной 380мкм. Такие энергетические потери на порядок

больше тех, что может оставить протон диапазона энергий Д4р – 60 – 80 МэВ. Механизм регистрации альфа частиц – аналогичный, за исключением того, что условием регистрации во второй кремниевой матрице – энергетические потери: ΔE более 20 МэВ в первой кремниевой матрице при любой сколь угодно малой поглощенной энергии во второй кремниевой матрице (рис.7-3).

Представленные распределения электронных и протонных компонент смешанных потоков на рис.6а, рис.8, иллюстрируют отработку алгоритма дискриминации разных типов частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При прохождении КА КОРОНАС-ФОТОН области больших потоков электронов (область БМА) происходила генерация тормозного излучения не только от электронов, попадающих в коллиматор прибора, но и от электронов, поглощаемых всей поверхностью прибора, также как и на соседних конструктивах спутника. При этом все детекторы прибора изотропно облучались потоком вторичных гамма-квантов, что создавало трудности в определении высокоэнергетичных компонент потоков частиц. Существенный вклад в детектируемый сигнал давали гамма-кванты, попадающие непосредственно в фотодиоды, большой поток гамма-квантов регистрировался в детекторе Д4, обладающем более низким порогом регистрации. Компьютерное моделирование реальной геометрии прибора показало соответствие расчётных режимов работы прибора с данными, полученными в ходе эксперимента КОРОНАС-ФОТОН. Проведенные исследования поставили вопрос о достоверности показаний измерительной аппаратуры, подвергающейся воздействию интенсивного потока гамма-излучения, являющимся, в свою очередь, следствием интенсивных потоков электронов на орбите. Кремниевые позиционно-чувствительные матричные детекторы Д1, Д2 показали свою надежность в определении спектра и типа заряженных частиц за счёт низкой эффективности регистрации гамма-квантов и высокого порога регистрации тяжелых частиц. Регистрация детектором Д3 непрерывного монотонного спектра показала возможности схем регистрировать спектральные распределения непрерывного спектра, продемонстрировала надежность схемы пороговой дискриминации, перераспределения частиц пропорционально их поглощенной энергии с точностью до десятков кэВ. Понимание природы сигналов в Д3, Д4 позволило расширить объем информации, накапливаемой прибором СТЭП-Ф, оценить его спектральные возможности, позволила оценить гамма-фон, а также реальные потоки электронов в месте расположения прибора. Работа с Д4 показала, что условия открытия канала Д4 как для ионов так и для электронов требуют совершенствования алгоритма работы прибора. Объяснение механизма записи тормозного излучения в Д3, Д4 дало дополнительную информацию по спектральному распределению для всех типов частиц.

Опыт работы прибора в смешанных потоках, дал полезную информацию для разработки детектирующих систем в смешанных потоках, не только в плане разделения частиц разного типа и энергии, но указал возможные пути преодоления воздействия нежелательного гамма-фона.

Автор благодарит к. ф-м. наук Дудника А.В. за предоставленные характеристики прибора СТЭП-Ф и первичные данные, полученные космическим аппаратом КОРОНАС-ФОТОН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. GEANT4 Collaboration, in GEANT4 Physics Reference Manual, Application Software Group, CERN, Geneva, 2005.
2. Dudnik A.V. Variacii potokov electronov v radiacionnyh pojasah zemli v maje 2009 goda po nabludenijam s pomoshju pribora "STEP-F" // The Journal of Kharkiv National University, physical series: Nuclei, Particles, Fields. - 2010. - №916. – Vyp. 3/47. – S.49-58.
3. Dudnik A.V. Issledovanie radiacionnyh pojasov Zemli v Maje 2009 goda na nizkoorbitalnom sputnike s pomoshju pribora STEP-F // Kosmichna nayka i tehnologija. -2010.-T.16.- №5.- S.12- 28.
4. Globus M., Brinyov, Jong Kyung Kim Inorganic Scintillators for Modern and Traditional Applications. Institute for Single Crystals. – Ukraine, Kharkov, 2005- 583p.
5. Galper A.M. Radiacionnyj pojas Zemli // SOZh -1999. - №6.- S.75-81.
6. Tateo Goka Haruhisa Matsumoto Measurement of Near Earth Radiation Environment in JAXA. - Overview and Plan. Japan Aerospace Exploration Agency, Sngen-2-2-1, Ibaraki, 305-8505, Japan, 2006.
7. Chan K.W., Teague M.J., Schofield N.J., Vette J.I. Modeling of Electron Time Variation in the Radiation Belts. - P.121-149. In Olson W.P. Quantitative modeling of Magnetospheric Processes.: American Geophysical Union, 1979.- 653 p.