

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

Б 245

P2-88-615

В.С.Барашенков, А.Н.Соснин, П.И.Тараненко\*,  
С.Н.Федотов\*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НАВЕДЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ  
В КОЛЛИМИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛАХ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОТОНОВ  
КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Направлено в журнал "Атомная энергия"

---

\*Московский инженерно-физический институт

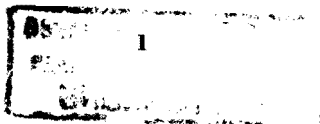
**1988**

## Введение

При проведении гамма-спектрометрических исследований в области средних энергий гамма-квантов на околоземных орбитах наряду с диффузным космическим фоном и атмосферными альбедными гамма-квантами необходимо учитывать фон гамма-излучения активированных ядер, образующихся в детекторах и окружающих конструкционных материалах под действием протонов первичного космического излучения (ПКИ) и высокоэнергетических частиц радиационных поясов Земли /1-5/. Это особенно важно для различного рода коллиматоров и кодированных апертур, так как именно эти устройства, основным назначением которых является поглощение гамма-квантов, изготавливаются из таких тяжелых материалов, как свинец и вольфрам, и в значительной мере подвержены активации высокоэнергетическими протонами, что служит заметным источником наведенного гамма-фона. Прогнозирование величины этого фона и поиски путей его снижения являются весьма актуальной задачей.

К сожалению, в литературе очень мало данных по активации конструкционных материалов частицами космического спектра. Наибольшего внимания заслуживает работа /3/, в которой приведены результаты расчета гамма-фона конструкционных материалов на основе сплава из алюминия, титана и железа под действием первичных космических протонов и излучения Техно-Атлантической аномалии (ТАА). Что же касается тяжелых материалов, то данные по мгновенному гамма-излучению, индуцированному высокоэнергетическими протонами, и уровню наведенной в них гамма-активности в литературе отсутствуют.

Целью нашей работы является путем математического моделирования:



- сравнение коллиматоров из традиционно используемых материалов свинца и вольфрама по уровню наведенной в них активности для различных орбит полета спутника и длительности нахождения на орбите;

- исследование характеристик мгновенного гамма-излучения и сравнение их с диффузной и активационной составляющей гамма-фона.

#### Модель и метод расчета

В качестве мишени рассматривались кодированные апертуры из свинца и вольфрама, которые имеют вид цилиндра с радиусом 50 см и толщиной 2 см для Рb и I, 187 см для W. В единицах г/см<sup>2</sup> толщина мишеней одинакова, что позволяет проводить сравнительный анализ результатов вычислений для Рb и W.

Поскольку подавляющее число гамма-активных ядер образуется под действием протонов, вкладом других космических частиц (в частности,  $\alpha$ -частиц ПКМ) можно пренебречь.

Моделирование спектра протонов ПКМ и ЮАА выполнялось так же, как в нашей предыдущей работе /6/.

Предполагалось, что время нахождения мишени на орбите варьируется в интервале от суток до года. Рассматривались случаи орбит в межпланетном пространстве, где на аппаратуру действует лишь первичное космическое излучение, и орбиты, периодически пересекающие зону ЮАА. Расчет выполнялся при условии, что спутник трижды в течение суток пересекает зону аномалии. Считалось, что время прохождения зоны аномалии 20 минут, остальные 70 минут полета по орбите на аппаратуру спутника действует только ПКМ. Временная диаграмма нахождения спутника в зонах ПКМ и ЮАА показана на рис. I.

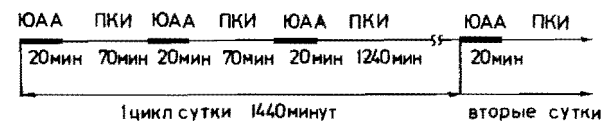


Рис. I. Временной режим экспозиции мишеней в зонах ПКМ и ЮАА.

Проходя сквозь вещество коллиматора, первичный протон порождает адронный каскад, в результате которого в веществе образуются возбужденные ядра - продукты реакций расщепления. Свою энергию возбуждения они теряют в "испарительном каскаде" и путем последующего испускания гамма-квантов при переходе из слабо возбужденных послекаскадных состояний в основное, невозбужденное состояние. Образовавшиеся нуклиды в результате  $\alpha, \beta^{\pm}$ -распадов и реакций захвата электрона претерпевают серию радиоактивных превращений, тоже сопровождающихся испусканием гамма-квантов.

Для моделирования адронного каскада в веществе и перехода возбужденных остаточных ядер в основное состояние использовался программный комплекс "Каскад" /7/, дополненный данными об энергиях возбуждения и вероятностях гамма-переходов из "Nuclear Data Sheets" для ядер-продуктов активации свинца и вольфрама.

Данные, получаемые в результате моделирования взаимодействия протонов ПКМ и ЮАА с материалом мишени по программе "Каскад", а именно скорости образования остаточных ядер, их энергии возбуждения и распределения по глубине мишени, используются на втором этапе расчета - при вычислении гамма-фоновых характеристик. Для этой цели разработана программа "Спектр". Основой программы является алгоритм расчета активностей и нуклидного состава активированного образца, заключающийся в решении систем дифференциальных уравнений, описывающих кинетику изменения активностей нуклидов, образующихся в облученной мишени, учете изменения нуклидного состава за счет  $\alpha, \beta^{\pm}$ -распадов и реакций захвата

электрона, происходящих в изобарических цепочках с учетом коэффициентов ветвления. На основе данных о распределении остаточных изотопов по глубине мишени и ее геометрии учтено поглощение и рассеяние гамма-излучения [8], выходящего из мишени в телесный угол  $2\pi$ . Информационным обеспечением программы служит библиотека ядерно-физических данных для всех нестабильных изотопов с периодами полураспада  $> 0,02$  с, входящих в изобарические цепочки с массами от  $A=2$  до  $A=210$ .

#### Обсуждение результатов

На рис. 2 для трех энергетических интервалов приведена зависимость суммарной наведенной гамма-активности от длительности полета по орбите, где на коллиматоры действуют лишь протоны ПКЧ. Для диапазона энергий гамма-квантов  $0,1+10$  МэВ показан уровень суммарного, рассеянного и нерассеянного излучения и отдельно вклад нерассеянных гамма-квантов, в остальных интервалах энергий приведено только нерассеянное излучение. На примере свинцовой мишени показан уровень "мгновенного излучения". Как видно, суммарная наведенная гамма-активность ( $E_\gamma = 0,1 + 10$  МэВ) в свинцовой мишени на 25-30% выше, чем в вольфрамовой. Иначе обстоит дело с высокоэнергетической компонентой гамма-излучения, в диапазоне энергий  $1+10$  МэВ уровень наведенной активности в мишенях практически одинаков, в диапазоне  $2+10$  МэВ наблюдается сближение интенсивностей гамма-излучения в свинцовой и вольфрамовой мишени для длительных экспозиций (Текс.  $\geq 3$  месяца). Это обусловлено тем, что нуклиды-продукты активации Рb и W, гамма-излучение которых дает основной вклад в диапазоне энергий  $E_\gamma > 2$  МэВ, имеют отличающиеся (иногда в несколько раз) периоды полураспада,

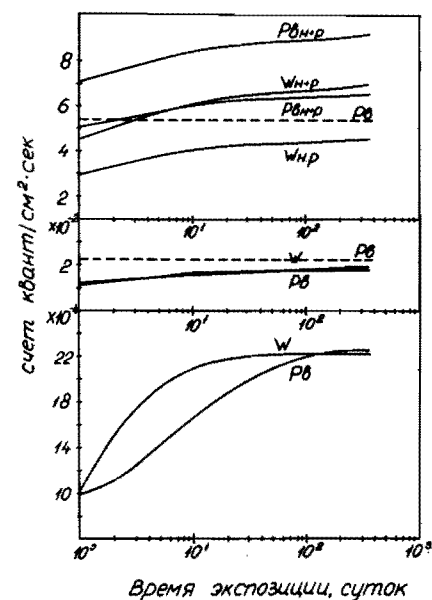


Рис. 2. Зависимость интенсивности суммарного наведенного гамма-излучения в свинцовом и вольфрамовом коллиматорах от времени экспозиции в поле первичного космического излучения. Показано нерассеянное (nr) и его сумма с рассеянным излучением (n+r). Пунктир - интенсивность мгновенных гамма-квантов в свинцовом коллиматоре. Верхний, средний и нижний рис. относятся соответственно к диапазонам  $E_\gamma = 0,1+10, 1+10, 2+10$  МэВ.

вследствие чего кривые нарастания активности от времени имеют разную крутизну. Так, наиболее долгоживущий гамма-излучатель в свинцовой мишени-изотоп  $Pt^{188}$  ( $T_{1/2}=10,2$  дн.), в вольфрамовой -  $Yb^{166}$  ( $T_{1/2}=2,36$  дн.).

Особый интерес представляет случай движения по околоземной орбите с периодическим пересечением зоны ЮАА, где интенсивность протонной компоненты возрастает на несколько порядков. Соответ-

стствующая зависимость суммарной наведенной активности от времени экспозиции показана на рис. 3. Как видно, в энергетическом диапазоне 0,1-10 МэВ наведенная активность в свинцовой мишени заметно выше, чем в вольфрамовой, для высокоэнергетической компоненты гамма-излучения ( $E_\gamma = 1-10$  МэВ) уровень наведенной активности в вольфраме превышает уровень в свинцовой мишени на 20-30%, выход гамма-квантов с энергиями  $E_\gamma > 2$  МэВ в вольфраме во много раз больше, чем в свинце. Это объясняется наличием в продуктах активации вольфрама таких высокоэнергетических гамма-излучателей, как  $^{136}\text{Yb}$ ,  $^{170}\text{Lu}$ ,  $^{176}\text{Ta}$ , которые образуются в мишени под действием интенсивного излучения ЭАА.

Чтобы нагляднее проиллюстрировать вклад высокоэнергетического гамма-излучения, на рис.4 показана временная зависимость относительной доли нерассеянных гамма-квантов с энергиями, большими или одного и двух МэВ,

$$K = \text{Nnr} (E_\gamma > 1 \text{ или } 2 \text{ МэВ}) / \text{Nnr} (E_\gamma > 0,1 \text{ МэВ})$$

Данные относятся к орбите, пересекающей ЭАА. При экспозициях, превышающих десять суток, величина  $K$  в свинцовых коллиматорах очень медленно возрастает с увеличением продолжительности полета, а в вольфрамовых, наоборот, сравнительно быстро уменьшается. Причина различного поведения кривых  $K(t_{\text{эксп}})$  состоит в том, что гамма-излучение свинцовой и вольфрамовой мишени обусловлено различным нуклидным составом гамма-излучателей.

На рис.5,6 показаны расчетные спектры наведенной гамма-активности в свинцовом и вольфрамовом коллиматоре для годичной экспозиции протонами ПКСИ. Пунктирными кривыми приведен диффузный космический спектр /9/. Стрелками отмечены наиболее интенсивные гамма-излучатели.

Из рисунков видно, что активность свинца несколько выше активности вольфрама для гамма-квантов с энергиями 0,1-2 МэВ. Однако в диапазоне 2-10 МэВ количество интенсивных гамма-линий

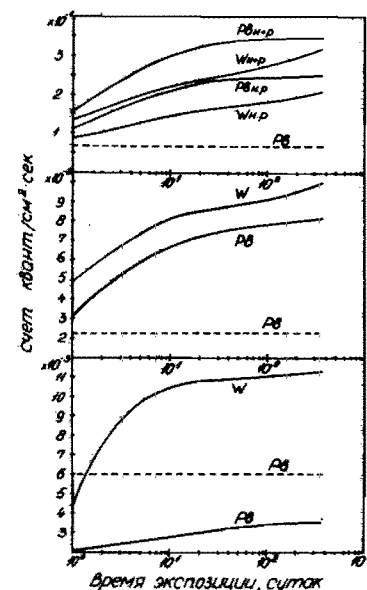


Рис. 3. То же, что и на рис.2. Случай орбиты, пересекающей ЭАА-Атлантическую аномалию.

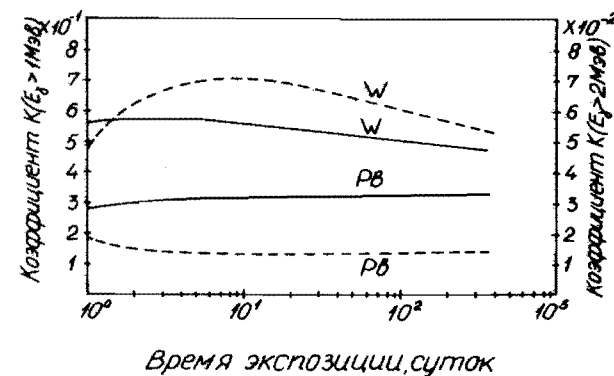


Рис. 4. Относительный вклад наведенного высокоэнергетического гамма-излучения в свинцовой и вольфрамовой мишенях при различных временах экспозиции на орбите, пересекающей ЭАА. Сплошные кривые - для  $E_\gamma > 1$  МэВ (левая шкала), пунктирные - для  $E_\gamma > 2$  МэВ (правая шкала).

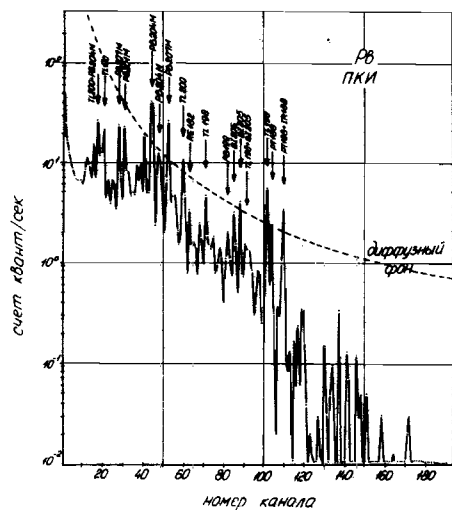


Рис. 5. Спектр наведенной гамма-активности в свинцовой мишени при годичной экспозиции в поле ПКМ. Пунктир - диффузный космический фон. Ширина канала - 20 кэВ.

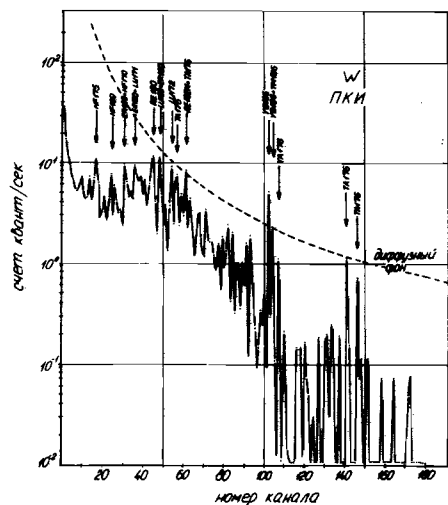


Рис. 6. То же, что и на рис. 5. Вольфрамовая мишень.

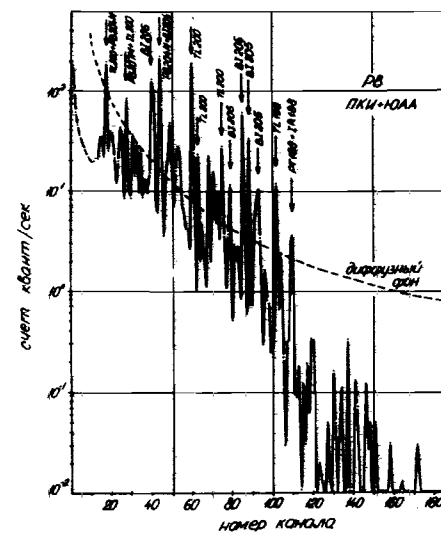


Рис. 7. То же, что и на рис. 5. Годичная экспозиция на орбите, пересекающей ЮАА.

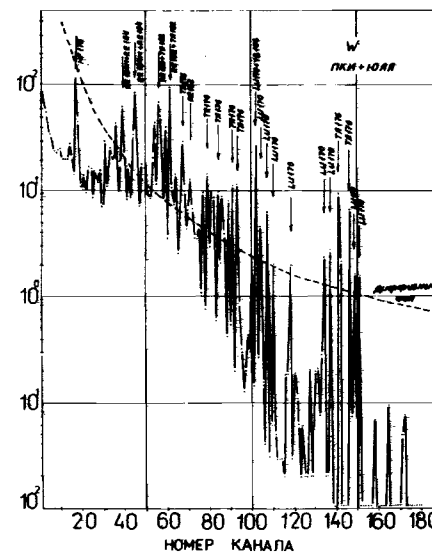


Рис. 8. То же, что и на рис. 5. Вольфрамовая мишень. Годичная экспозиция на орбите, пересекающей зону ЮАА.

у вольфрама больше, чем в свинце, хотя они не превышают уровня диффузного фона.

Аналогичные спектры наведенной гамма-активности для годичной экспозиции на орбитах, пересекающих зону ЮАА, приведены на рис. 7,8.

Протоны ЮАА резко увеличивают интенсивность гамма-излучения наведенной активности, наиболее интенсивные гамма-линии в среднем в несколько раз превышают уровень диффузного фона для энергий  $E_\gamma < 2$  МэВ. В вольфрамовом коллиматоре их интенсивность заметно возрастает и при  $E_\gamma > 2$  МэВ, здесь она значительно выше гамма-излучения свинцового коллиматора.

Как уже упоминалось выше, наряду с гамма-излучением наведенной активности представляет интерес "мгновенное излучение", возникающее в материале коллиматора в момент прохождения через нее протона, то есть излучение возбужденных ядер с временами высвечивания гамма-квантов  $10^{-6} - 10^{-15}$  с.

Вклад этого излучения может быть сделан пренебрежимо малым при использовании антисовпадетельной защиты от протонов. Однако целесообразность применения антисовпадетельной защиты оправдана лишь в том случае, когда "мгновенное излучение" вносит заметный вклад по сравнению с другими составляющими фона.

Спектр "мгновенного" гамма-излучения, выходящего из свинцовой мишени в направлении детектора при ее активации первичным космическим излучением представлен на рис. 9. Видно, что спектр простирается до 7,4 МэВ, то есть имеет место вылет из возбужденных ядер гамма-квантов с энергиями, сравнимыми с энергиями отрыва "испарительных" нуклонов.

Коэффициент К для  $E_\gamma > 1$  и 2 МэВ составляет соответственно 0,41 и 0,11. Если не считать нескольких резко выделяющихся линий (например, Рb  $^{208} E_\gamma = 2,614$  МэВ), уровни спектров "мгновенного излучения" и диффузного космического фона во всем энергетическом диапазоне практически одинаковы.

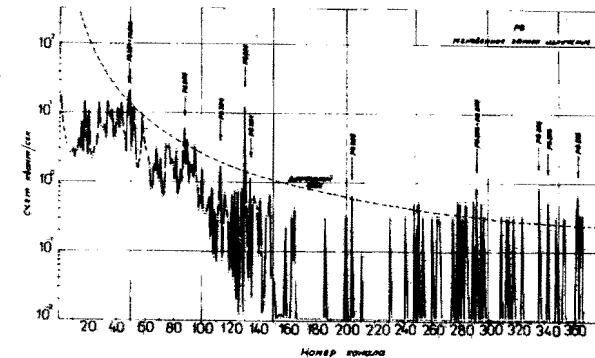


Рис. 9. Спектр "мгновенных" гамма-квантов в свинце, облучаемом протонами первичного космического излучения.

#### Литература

1. Dyer C.S. et.al. Nucl.Instr.Meth., 1980, v.173, p.585-601.
2. Калинин И.В., Пилипешин Н.А. В сб.: Экспериментальные методы ядерной физики высоких и низких энергий. Атомиздат, М., 1982, с.28.
3. Fischbein W.L.et.al.IEEE Trans.on Nucl.Science vol.NS-26, 1979, No 6, p.5156-5161.
4. Trombka J.I. et.al. Astrophys J., 181(1973), p.737 .
5. Dyer C.S. IEE Trans.on Nucl.Science vol.NS-32, No 6, p.4421-4424.
6. Барашенков В.С. и др. ОИИ, Р2-86-226, Дубна, 1986
7. Барашенков В.С. и др. ОИИ, Р2-85-173, Дубна, 1985
8. Кимель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. Изд. 2.М., Атомиздат, 1972.
9. Diffuse background of Energetic x-rays, x-and Gamma-Ray astronomy. Ral.Y.-Int.Astron.Union-Symp.Y55, 1973.p.279 .

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 августа 1988 года.