

ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

И.П. Безродных, Е.И. Морозова,
А.А. Петрукович
(ИКИ РАН)
В.Т. Семёнов
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

На основании данных о проникающей способности частиц радиационного пояса Земли и их энергетического и пространственного распределения в околоземном космическом пространстве сделан вывод, что для солнечно-синхронных космических аппаратов увеличение массовой толщины защитного экрана более $2,0 \text{ г/см}^2$ не целесообразно. Для высокоорбитальных и геостационарных космических аппаратов не целесообразно увеличивать массовую толщину защитного экрана более $2,5 \text{ г/см}^2$. Вышеуказанные защитные экраны позволяют отсеять мягкую (наиболее интенсивную) компоненту ионизирующего излучения. Под защитными экранами остается только жёсткая компонента ионизирующего излучения с большой проникающей способностью. По этой причине дальнейшее увеличение толщины защитного экрана не приведёт к существенному снижению поглощенной дозы. В случае, если указанные толщины экранов не обеспечивают необходимый уровень надёжности функционирования электронных систем, рекомендуется заменить проблемные электронные компоненты на более радиационно стойкие.

***Ключевые слова:** поглощённая доза радиации, радиационные пояса, защита от ионизирующих излучений космических лучей.*

В состав первичных космических лучей входят электроны, позитроны, протоны, антипротоны, нейтроны, антинейтроны, фотоны и ядра атомов химических элементов от гелия до урана. Состав вторичного излучения, образованного вследствие взаимодействия частиц космических лучей с веществом, более разнообразен и насчитывает около 300 различных видов частиц.

Различные частицы космических лучей обладают разной способностью проникать вглубь вещества. По этому признаку все частицы космических лучей делят на две компоненты: мягкую и жёсткую. Большая часть потока космических лучей – это мягкая компонента. Частицы, относящиеся к мягкой компоненте, не обладают способностью глубоко проникать в вещество и тем самым легко отсекаются защитным экраном. Небольшая часть космических лучей (жёсткое электромагнитное излучение, мюоны, протоны и нейтроны высоких энергий и т. д.) относится к жёсткой компоненте. Жёсткая компонента потока частиц космических лучей отличается тем, что применение защитных экранов для ослабления потока таких частиц не эффективно из-за их высокой проникающей способности. Для защиты электронной аппаратуры от мягкой компоненты космических лучей, например, от электронов с энергией 2 МэВ и протонов 30 МэВ, требуется защитный экран из алюминия с массовой толщиной около 1 г/см^2 . Однако для защиты аппаратуры от относительно более жёсткого излучения, например, от протонов с энергией 100 МэВ, потребуется экран с массовой толщиной уже около 10 г/см^2 . Как уже

упоминалось, кроме первичного космического излучения, существует вторичное излучение, образованное в результате взаимодействия частиц космических лучей с веществом космического аппарата (КА). В частности к вторичному излучению с высокой проникающей способностью относится жёсткое электромагнитное излучение, образованное торможением электронов в веществе, например, такие заряженные частицы, как мюоны (мюоны более чем в 206 раз тяжелее электронов, их иногда называют тяжёлыми электронами). Быстрые мюоны обладают самой большой проникающей способностью по сравнению с другими заряженными частицами с той же энергией. Поскольку полностью защитить электронные системы КА от радиации с помощью защитных экранов невозможно, то возникает вопрос, какую оптимальную толщину экрана следует использовать и насколько радиационно стойкими должны быть электронные компоненты, чтобы можно было обеспечить нужную степень надёжности аппаратуры при заданной толщине экрана. Для того, чтобы ответить на эти вопросы, мы рассмотрим способности некоторых типов частиц проникать вглубь вещества и оценим поглощённые дозы радиации на солнечно-синхронной (ССО) и геостационарной орбитах (ГСО) под различными сферическими защитными экранами из алюминия.

Ослабление потока электронов за защитным экраном из алюминия. При описании проникающей способности электронов часто используют такие

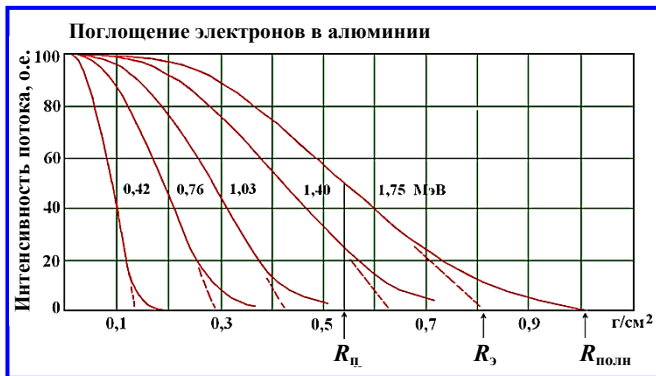


Рис. 1. Ослабление экраном из алюминия потока электронов с энергиями от 0,42 до 1,75 МэВ

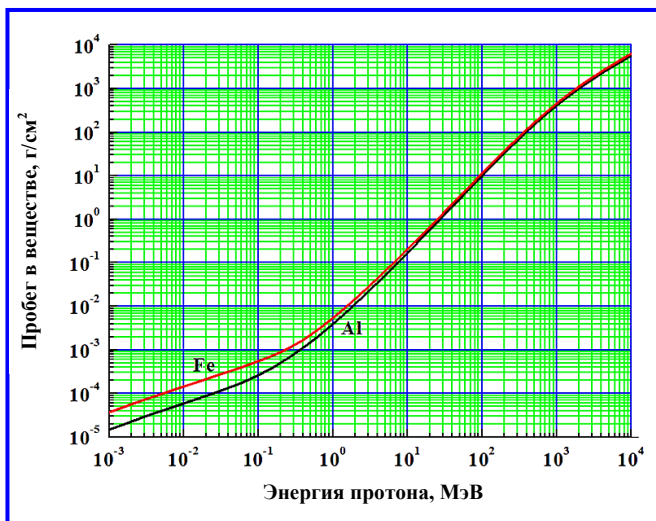


Рис. 2. Зависимость полного пробега протона в железе и алюминии от энергии протонов [2]

понятия, как половинный пробег $R_{0.5}$, экстраполированный пробег R_3 и полный пробег $R_{полн}$. Пробег электронов, при котором интенсивность исходного потока уменьшается в два раза, называется половинный пробег $R_{0.5}$.

Все три вида этих пробегов в алюминии показаны на рис. 1 для электронов с энергией 1,75 МэВ. Экстраполированный пробег R_3 ($г/см^2$) электронов в алюминии в диапазоне энергий от 0,01 до 16 МэВ можно вычислить как [1]: $R_3 = kE^n$ при энергии электронов $0,01 < E < 2,5$ МэВ, $k = 0,412$; $n = 1,265 - 0,0954 \ln(E)$; $R_3 = 0,530E - 0,106$ при $2,5$ МэВ $< E < 16$ МэВ.

Для электронов с $E = 1,75$ МэВ: $R_{0.5} = 0,54$ $г/см^2$; $R_3 = 0,81$ $г/см^2$; полный пробег $R_{полн} = 1,058$ $г/см^2$.

При построении графика использовались данные экспериментальных исследований поглощения энергичных электронов в алюминиевой пластинке, приведённые в работе [1]. Значения пробега электронов $R_{полн}$, соответствующие их полному поглощению в алюминии, вычислялись по программе ESTAR [2].

Полные пробеги электронов и протонов в веществе. На рис. 2 показана зависимость полного пробега протона в железе и алюминии от их энергии. При энергии протона меньше 10 МэВ пробег протона в алюминии существенно меньше, чем в железе.

На рис. 3 показана зависимость полного пробега электрона в железе и алюминии от энергии электронов. При энергии электрона меньше 10 МэВ пробег электрона в алюминии меньше, чем в железе. Поскольку в околоземном космическом пространстве большая часть электронов имеет энергию существенно меньше 10 МэВ, то защитные экраны из алюминия будут обеспечивать лучшую радиационную защиту, чем экраны из железа. Для космических аппаратов, орбиты которых проходят через экваториальные области внешнего радиационного пояса Земли, радиационные условия определяются потоками электронов, а не протонов. Для геостационарных и высокоорбитальных космических аппаратов, орбиты которых проходят через экваториальные области внешнего радиационного пояса Земли, мы рекомендуем на внешней поверхности космических аппаратов не использовать конструкционные материалы с большим атомным номером Z . Поскольку в таких веществах электронами космических лучей эффективно генерируется глубоко проникающее, жёсткое электромагнитное излучение, защита от которого более сложная, чем от электронов [3].

Основные характеристики радиации на солнечно-синхронных орбитах. Наиболее интенсивные потоки ионизирующих излучений радиационных поясов Земли (РПЗ) сосредоточены в области магнитного экватора. Нижняя граница РПЗ в области экватора располагается в основном на высоте около 1000 км верхняя граница – на высоте около 65 000 км.

Условно РПЗ делят на две части. Ту часть РПЗ, которая в плоскости геомагнитного экватора ближе к Земле (от 1000 до 13 000 км), называют внутренним РПЗ, а ту, которая дальше от Земли (от 13 000 до 65 000 км), называют внешним РПЗ. Основная компонента частиц внутреннего РПЗ – это высокоэнергичные протоны (до 1000 МэВ). Основная компонента внешнего РПЗ – электроны с энергией в несколько МэВ. Часть внутреннего РПЗ в области Южно-Атлантической (Бразильской) магнитной аномалии в виде воронки опускается до высот около 200 км над Землей. Если ССО расположена на высоте меньше 1000 км, то большая часть орбиты находится вне зоны действия потоков частиц РПЗ, и только в области Южно-Атлантической магнитной аномалии КА на этой орбите подвергается интенсивному облучению частицами РПЗ, которые и дают основной вклад в поглощённую дозу радиации.

На рис. 4 показана для ССО зависимость поглощённой дозы радиации в центре сферы из алюминия от массовой толщины сферического экрана.

Под экраном из алюминия толщиной около 1 г/см^2 вклад в поглощённую дозу дают:

- электроны РПЗ (с энергией более 2 МэВ) около 54%;
- протоны РПЗ (с энергией более 30 МэВ) около 39%;
- протоны СКЛ (с энергией более 30 МэВ) около 6%;
- тормозное излучение электронов около 1%.

Под экраном из алюминия толщиной около 2 г/см^2 вклад в поглощённую дозу дают:

- протоны РПЗ (с энергией более 40 МэВ) около 85%;
- протоны СКЛ (с энергией более 40 МэВ) около 11%;
- электроны РПЗ (с энергией более 3 МэВ) около 4%;
- тормозное излучение электронов менее 1%.

Как следует из вышеприведённых данных, за экраном около 2 г/см^2 и более основной вклад в поглощённую дозу радиации на ССО дают высокоэнергичные протоны внутреннего РПЗ (область Южно-Атлантической магнитной аномалии, рис. 5).

На рис. 5 показано изображение области, которая совпадает с областью Южно-Атлантической магнитной аномалии, при пролёте через которую КА подвергается импульсному воздействию потоков высокоэнергичных протонов. Кроме протонов и электронов в этой области есть небольшая доля высокоэнергичных, тяжёлых ядер химических элементов, которые не дают заметного вклада в поглощённую дозу радиации, но являются причиной сбоев и в некоторых случаях причиной отказа электронных систем КА. Для ССО экраны толщиной 2 г/см^2 имеют особое значение. С помощью экрана такой толщины удаётся отсечь наиболее радиационно опасную мягкую компоненту космических лучей. Под экраном более двух 2 г/см^2 в основном остается жёсткая компонента, и по этой причине дальнейшее увеличение толщины защитного экрана не приводит к существенному уменьшению дозы радиации (см. рис. 4).

Основные характеристики радиации на геостационарной орбите. Космические аппараты, предназначенные для телекоммуникаций и навигации, орбиты которых находятся в значительном удалении от поверхности Земли, подвергаются воздействию ионизирующего излучения внешнего РПЗ. Внешний РПЗ в плоскости геомагнитного экватора располагается на высоте примерно от 13 000 км и до 65 000 км с максимумом потока электронов ($E > 40 \text{ кэВ}$) порядка $500\,000\,000 \text{ частиц/(см}^2 \cdot \text{с)}$ на высоте около 16 500 км.

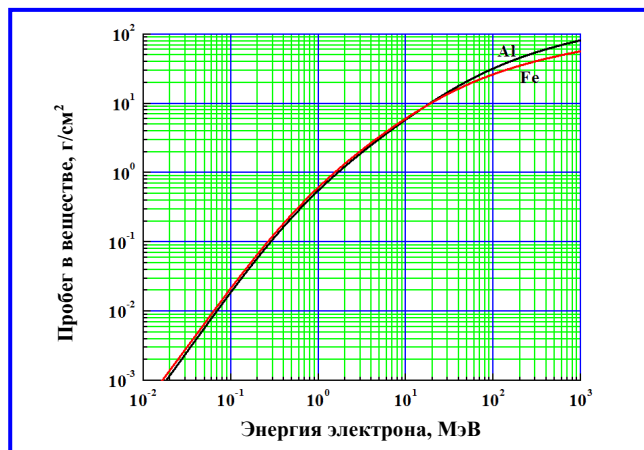


Рис. 3. Зависимость полного пробега электронов в железе и алюминии от энергии электронов [2]

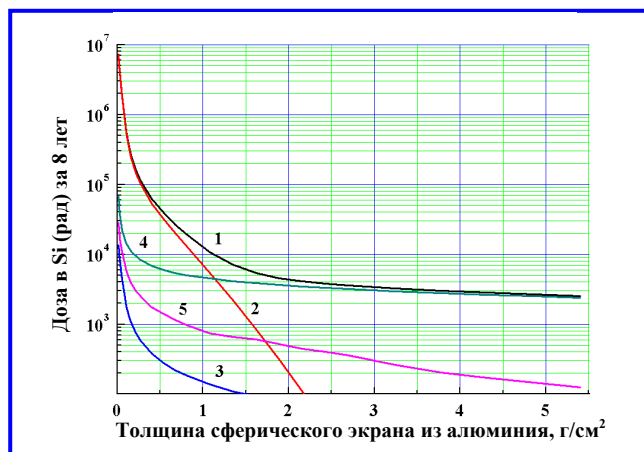


Рис. 4. Зависимость поглощенной дозы радиации за 8 лет на ССО ($h = 832 \text{ км}$) в центре сферы из алюминия (поглощающее вещество кремний) от массовой толщины сферического экрана: суммарная доза (1); доза от электронов РПЗ (2); от тормозного излучения (3); от протонов РПЗ (4); от протонов СКЛ (5)

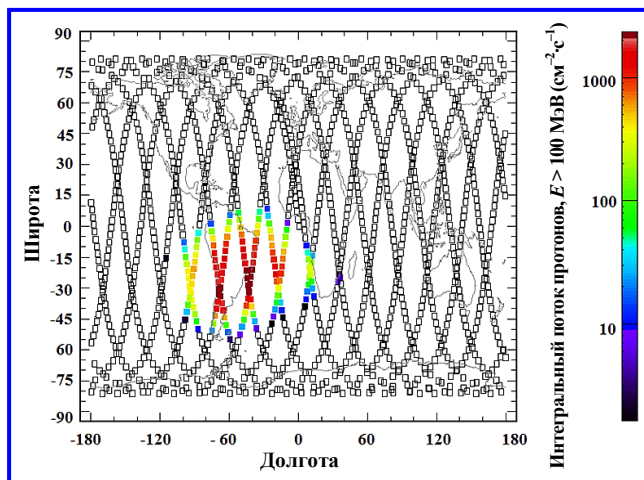


Рис. 5. Распределение интенсивности потока протонов РПЗ с энергией более 100 МэВ на ССО с $h = 832 \text{ км}$ [4]

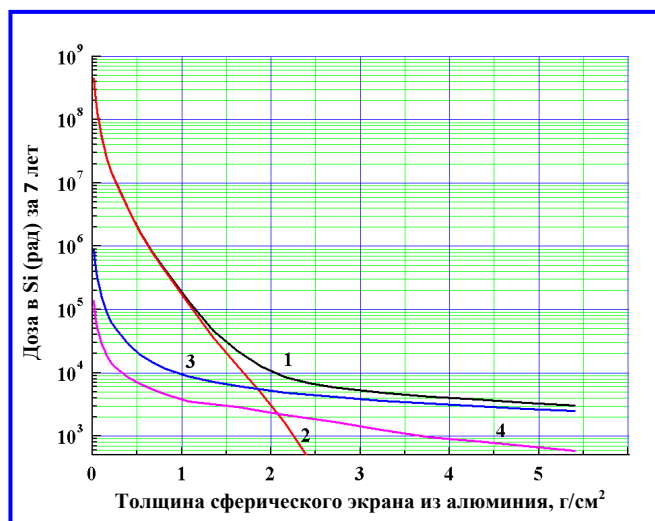


Рис. 6. Зависимость поглощённой дозы радиации за 7 лет на геостационарной орбите в центре сферы из алюминия (поглощающее вещество кремний); от массовой толщины сферического экрана. Суммарная доза (1); доза от электронов РПЗ (2); от тормозного излучения (3); от протонов СКЛ (4)

На рис. 6 показана зависимость поглощённой дозы радиации за 7 лет на ГСО в центре сферы из алюминия от массовой толщины сферического экрана.

Под экраном из алюминия толщиной около 1 г/см² вклад в поглощенную дозу дают:

- электроны РПЗ (с энергией более 2 МэВ) около 93,6%;
- тормозное излучение электронов около 5,0%;
- протоны СКЛ (с энергией более 30 МэВ) около 1,4%;
- протоны РПЗ (с энергией более 30 МэВ) около 0%.

Под экраном из алюминия толщиной около 2,5 г/см² вклад в поглощённую дозу дают:

- тормозное излучение электронов около 73%;
- протоны СКЛ (с энергией более 45 МэВ) около 27%;

- электроны РПЗ (с энергией более 4 МэВ) около 0%;
- протоны РПЗ (с энергией более 45 МэВ) около 0%.

За экраном около 2,5 г/см² и более основной вклад в поглощённую дозу радиации на ГСО даёт тормозное электромагнитное излучение электронов.

При начальном увеличении толщины экранов радиационной защиты поглощённая доза радиации под защитой быстро убывает, но при достижении толщины защиты около 2 г/см² на ССО и около 2,5 г/см² на ГСО дальнейшее увеличение толщины защиты не приводит к существенному уменьшению поглощённой дозы радиации. Толщины экранов радиационной защиты для электронных устройств 2 и 2,5 г/см² можно рассматривать как оптимальные для этих орбит. В случае, если указанные толщины экранов не обеспечивают необходимый уровень надёжности функционирования электронных систем, рекомендуем проблемные электронные компоненты заменить на более радиационно стойкие.

Литература

1. The Passage of Fast Electrons Through Matter / R. D. Birkhoff // Handbuch der Physik ed. (S. Flugge). – Bd 34. – Berlin: Springer, 1958. – P. 53 – 136.
2. AccesstheESTARDatabase. [Электронный ресурс] – база данных и программное обеспечение. – Режим доступа: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/method.html> /, свободный.
3. Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчёта / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 120. – № 1. – С. 37 – 44.
4. The Space Environment Information System, ESA Technical Officer. [Электронный ресурс] – база данных и программное обеспечение. Режим доступа : <http://www.spenvis.oma.be>, свободный.

Поступило в редакцию 11.12.2012

Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, т. (495) 366-38-38, e-mail: d54x@mail.ru.

Евгения Ивановна Морозова, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, т. (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2012@yandex.ru.

Анатолий Алексеевич Петрукович, член-корреспондент РАН, зав. отделом, т. (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.

Владимир Тимофеевич Семёнов, начальник лаборатории, т. (495) 366-38-38, e-mail: vniiem@vniiem.ru.