

ЗАЩИТА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

И.П. Безродных, Е.И. Морозова, А.А. Петрукович
(ИКИ РАН),
С.Г. Казанцев
(АО «НИИЭМ»),
М.Н. Будяк, В.Т. Семёнов
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДА

Основной задачей при расчете радиационных дозовых нагрузок является выбор для заданных радиационных условий оптимальной защиты от воздействия радиации на элементы космического аппарата и экипажа. В первом приближении, можно считать, что существуют всего три популяции частиц, представляющих радиационную угрозу для космических аппаратов. Первая, это частицы, удерживаемые магнитным полем в околоземном космическом пространстве, во внутреннем и внешнем радиационном поясе Земли (РПЗ). Вторая, это частица солнечных космических лучей (СКЛ), источником которых являются мощные солнечные вспышки. Третья, это частицы галактических космических лучей (ГКЛ), источником которых являются взрывы сверхновых звезд. Следует отметить, что потоки всех трех популяций частиц тесно связаны с 11-летним циклом солнечной активности (ЦСА). Потоки релятивистских электронов внешнего РПЗ значительно повышаются на спадающей ветви ЦСА, когда увеличивается число высокоскоростных рекуррентных потоков солнечного ветра. Потоки ГКЛ изменяются в

противофазе с солнечной активностью (максимальны вблизи минимума активности). Потоки СКЛ отражают изменение солнечной активности (нарастают на фазе роста СА, спадают на фазе спада СА и максимальны вблизи максимума). Интенсивность потока частиц РПЗ с энергией порядка нескольких МэВ в миллионы раз превосходят потоки частиц в межпланетном пространстве. Эта самая опасная для КА популяция частиц.

Не все вспышки на Солнце являются источником частиц СКЛ, способных представлять угрозу для КА. Количество солнечных вспышек за 11-ти летний цикл солнечной активности (СА) составляет величину порядка нескольких десятков тысяч. В максимуме СА вспышки могут происходить с интервалом менее двух часов. Большинство вспышек сопровождаются потоками частиц СКЛ с энергиями менее 1 МэВ, протоны с такой энергией не способны даже преодолеть защиту из алюминия толщиной 0,005 мм. В максимуме активности Солнца в среднем ожидается одна вспышка в неделю с потоками частиц СКЛ, максимальная энергия которых для ядер химических элементов может достигать 10 МэВ/нуклон и для электронов – 1 МэВ. Однако один раз в месяц могут быть вспышки, максимальная энергия частиц СКЛ в которых может достигать 100 МэВ/нуклон для ядер и около нескольких МэВ для электронов. Один раз в год, возможно, будут вспышки, максимальные энергии частиц СКЛ в которых могут достигать 1 ГэВ/нуклон для ядер и несколько десятков МэВ для электронов. За весь 11-летний цикл СА число сверхмощных солнечных вспышек, в которых максимальная энергия частиц СКЛ может достигать 10 ГэВ/нуклон для ядер и 100 МэВ для электронов, не более трёх. Радиационные условия в околоземном

космическом пространстве исследовались во многих работах, в частности [1-10].

Для оценки радиационных нагрузок на космический аппарат в заданный период обычно используют данные об энергетических спектрах разных групп частиц и вычисляют суммарное энерговыделение в веществе потоков частиц.

Для оценки полного пробега заряженных частиц в веществе (см. рис.1) использовалась специализированная база данных и соответствующее программное обеспечение [11].

Используя данные, представленные на рис.1, можно оценить зависимость проникающей способности частиц от энергии.

Из данных по массовым пробегам частиц в веществе следует, что, по возможности, экраны для защиты электроники космических аппаратов (КА) и космонавтов от быстрых заряженных частиц космических лучей (КЛ), следует делать из более легких материалов, из материалов, состоящих из вещества с небольшим (z) атомным номером, например из алюминия и его сплавов. При одном и том же весе, защитный экран от радиации из вещества с меньшим атомным номером более эффективно препятствует движению заряженных частиц через него. В веществе с меньшим z , у заряженных частиц (электронов, протонов, ядер химических элементов) ионизационные потери на массовую единицу пути (г/см^2) больше, надо учитывать также (это особенно важно для

«релятивистских электронов -- «электронов убийц»), что при малых z возбуждается меньше вторичного, опасного и глубоко проникающего тормозного излучения. Эти рекомендации особенно важны при разработке КА, орбиты которых будут в основном проходить через внешний (электронный) радиационный пояс Земли.

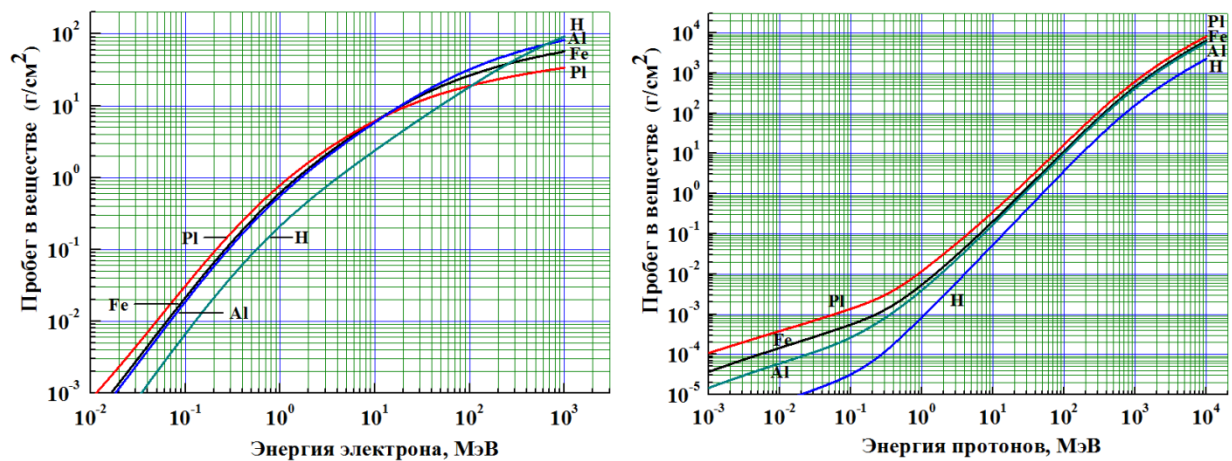


Рис.1. Зависимость массового полного пробега электронов и протонов в различных веществах (водороде, алюминии, железе и свинце) от их кинетической энергии [11].

В качестве примера расчета на рис. 2 приведена зависимость поглощенных доз радиации (протоны - р СКЛ, плюс вторичные протоны- р2, нейтроны-п и гамма- излучение в период вспышек 11.05.1959 и 12.11.1960 г) от массовой толщины защитного экрана. Для события 12.11.1960 дополнительно приведена полная суммарная доза от вторичного излучения - сигма. На рис. 3 (слева) приведен энергетический спектр частиц ГКЛ до энергии порядка 10^{10} ГэВ. Следует отметить, что максимальная возможная энергия протонов РПЗ порядка 1 ГэВ, а для частиц СКЛ порядка 10 ГэВ. На рис. 3 (справа) показан результат расчета поглощенной дозы радиации от ядер, протонов и нейтронов частиц ГКЛ за защитным сферическим экраном из алюминия. Суммарная доза от всех частиц за защитой 10 г/см^2 составляет ~ 12 рад/год.

Одно из важнейших свойств кинетической энергии – это способность ее превращаться в вещество. Точнее в вещество и антивещество в виде элементарных частиц

(см. рис.4). Если частица ГКЛ с энергией 10^{11} ГэВ (это может быть протон или даже фотон) столкнётся с тяжёлым космическим аппаратом типа «Метеор», то кинетическая энергия этой частицы ГКЛ превратится в миллиарды новых частиц и античастиц, которые будут двигаться в очень малом телесном угле, создавая тонкую плазменную, релятивистскую струю, пронизывающую КА насквозь [1]. Последствие этого события для электроники КА может быть катастрофическое.

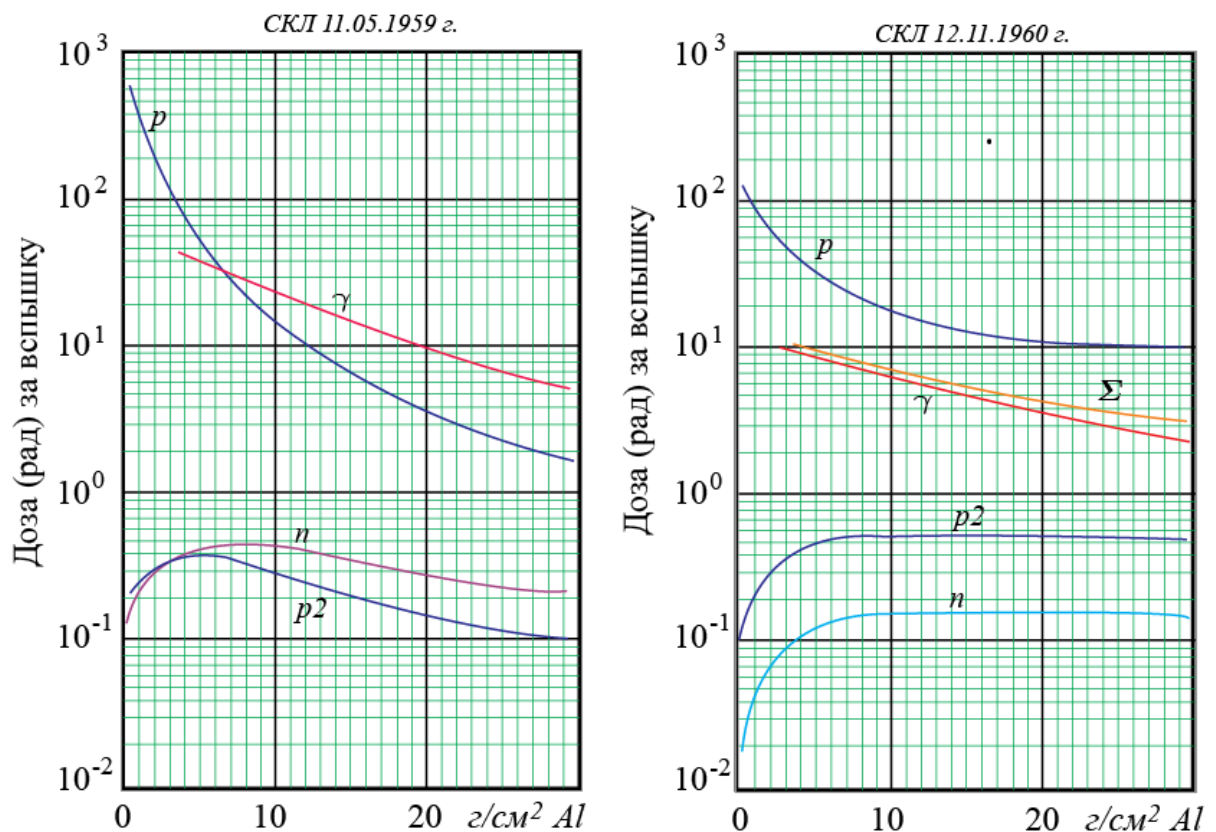


Рис.2. Зависимость полной поглощенной дозы радиации, создаваемой за экраном из алюминия первичными протонами СКЛ (солнечные вспышки 11.05.1959 и 12.11.1960) и вторичными частиц (гамма – излучением, протонами и нейтронами) от массовой толщины защитного экрана [4].

На рис. 4 слева показан результат моделирования прохождения (слева на право) протона (10^5 ГэВ) и ядра железа (26 ГэВ) частиц ГКЛ через алюминиевые

пластинки, толщиной 34 мм и 8 мм. Протон ГКЛ до 20 мм проходит через пластину почти без существенных потерь энергии, затем сталкивается с ядром атома алюминия. Обратим внимание на то, что этот процесс статистический, и столкновение могло произойти в любой точке траектории протона. В результате ядерной реакции образовался поток вторичных протонов и π -мезонов, а также многих других частиц, которые мы не учитывали. Распады π -мезонов дали начало ливню частиц из электронов, позитронов и фотонов. Ядро железа так же, как и протон, пересекает пластину слева направо. Начальная энергия ядра 26 ГэВ, из пластины ядро вылетает с энергией менее 23 ГэВ. При движении через пластину в начале пути среднее значение ЛПЭ ядра составляет величину около $1,52 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$, в конце пластины, из-за уменьшения скорости ядра, величина ЛПЭ увеличилось до $1,6 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$.

Исходя из оценок поглощенных доз радиации мы считаем, что оптимальной защитой для электронной аппаратуры КА от всех видов ионизирующих излучений можно считать экран толщиной около $2,5 \text{ г}/\text{см}^2$ их алюминия [7, 10]. Если электроника не выдерживает уровень радиации за данным экраном, то её следует заменить на более радиационно стойкую. Анализирую данные по спектрам частиц СКЛ и ГКЛ мы считаем, что

для пилотируемых космических аппаратов при полете к Луне оптимальный защитный экран $20 \text{ г}/\text{см}^2$, при полете к Марсу $40 \text{ г}/\text{см}^2 \text{ Al}$ [8,9].

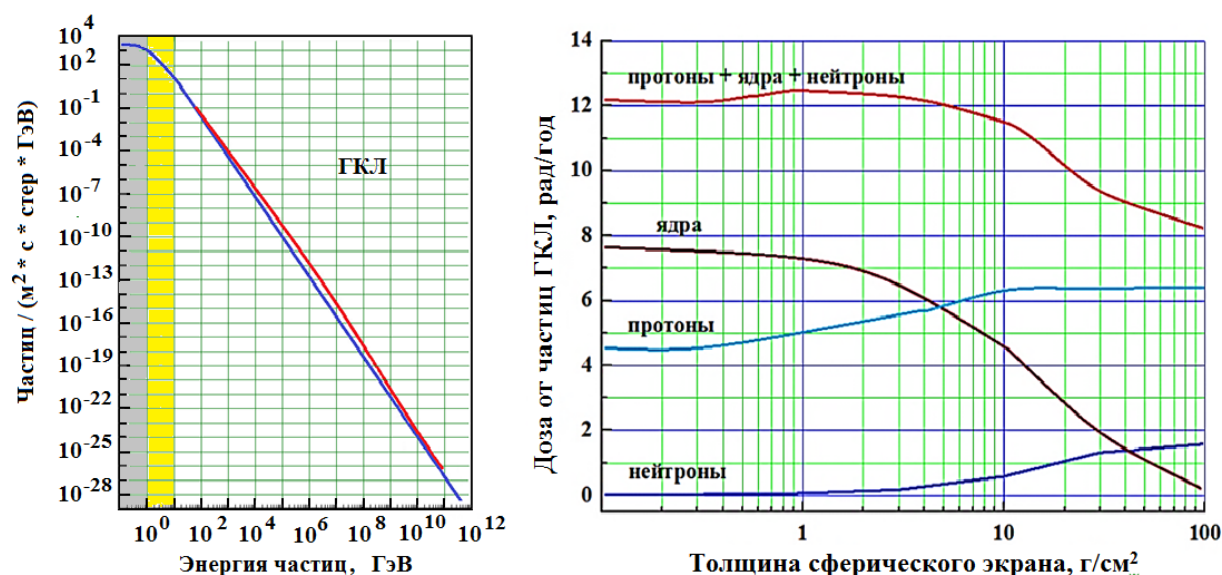


Рис.3 . Слева показан дифференциальный энергетический спектр частиц ГКЛ в области высоких энергий (красная линия), синяя линия представляет собой некую кривую, к которой стремится спектр частиц в области энергий меньше 10⁶ и в области больше 10⁶ ГэВ. Для сравнения, серым цветом на шкале энергии отмечено максимально возможное значение энергии частиц РПЗ (1 ГэВ), желтым цветом отмечено максимально возможное значение энергии частиц СКЛ (10 ГэВ). Справа показан результат расчета поглощенной дозы радиации от частиц ГКЛ за защитным сферическим экраном из алюминия.

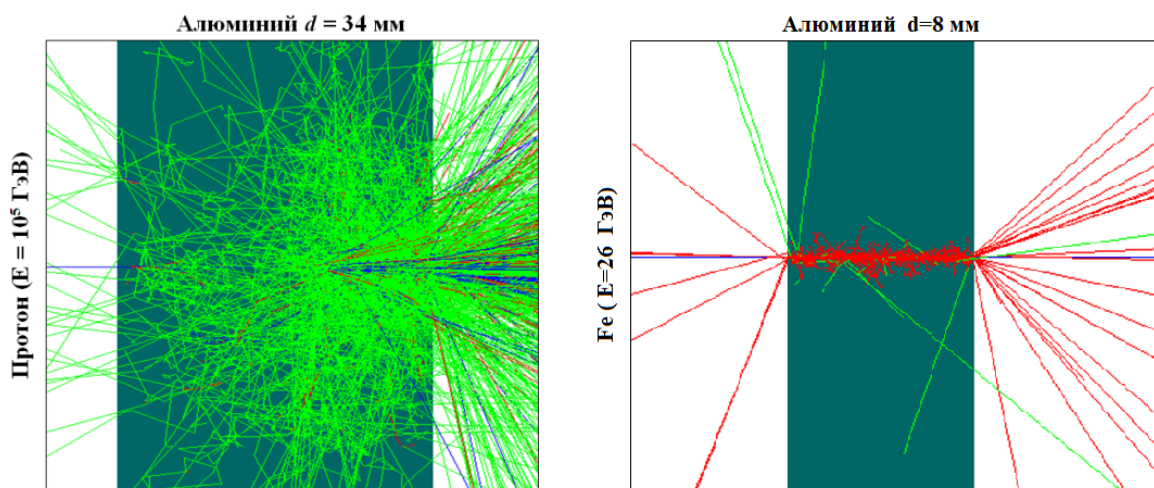


Рис. 4. Результаты моделирования прохождения (слева на право) протона и ядра железа через алюминиевые пластинки, толщиной 34 мм и 8 мм. Синим цветом показаны первичный протон и ядро, а также вторичные протоны и другие адроны, красным- вторичные электроны и другие лептоны, зеленым -показаны вторичные фотоны, в том числе и гамма-кванты [6].

Литература

1. Безродных И. П., Тютнев А.П., Семенов В.Т. Радиационные эффекты в космосе. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»», 2014 г. – 106 с.
2. Шилов А.Е., Волков С.Н., Безродных И.П., Семенов В.Т. Радиационные условия для высокоорбитальных космических аппаратов в период максимума солнечной активности. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010, том. 115, № 2, с. 47-52. [Электронный ресурс] – статья (формат pdf). - Режим доступа: <http://jurnal.vniiem.ru/text/115/47.pdf> свободный.

3. Безродных И.П., Казанцев С.Г., Семенов В.Т.
Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010, том. 116, № 3, с. 23-26.
[Электронный ресурс] – статья (формат pdf). - Режим доступа: <http://jurnal.vniiem.ru/text/116/23.pdf> свободный.
4. О. Д. Бриль, А. И. Вихров, С. С. Городков [и др] /
Ядерные взаимодействия в защите космических кораблей // – М. : АТОМИЗДАТ, 1968. – 264 с.
5. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Казанцев С.Г., Кочетов И.В., Семенов В.Т./ Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчёта // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011, том. 120, № 1, с. 37-44. [Электронный ресурс] – статья (формат pdf). - Режим доступа: <http://jurnal.vniiem.ru/text/120/37.pdf> , свободный.
6. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., С.Г. Казанцев, И.В. Кочетов, В.Т. Семёнов / Радиационные условия на орбите КА «Ионосфера» // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011, том. 123, № 4, с. 19-28.
[Электронный ресурс] – статья (формат pdf). - Режим доступа: <http://jurnal.vniiem.ru/text/123/19.pdf> , свободный.
7. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А. Казанцев С.Г., Семенов В.Т / Оценка оптимальных параметров экранов для защиты электронных систем космических аппаратов от ионизирующих излучений//» // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2012. - том. 131. -№6. -с. 15-18.
[Электронный ресурс] – статья (формат pdf). - Режим доступа: <http://jurnal.vniiem.ru/text/131/15-18.pdf> свободный.

8. Безродных И.П. Факторы космического пространства, влияющие на исследования и освоение Луны// Август 2014 . г. Москва. ИКИ РАН. [Электронный ресурс] – рукопись (формат pdf) . - Прямая ссылка:
<http://d54x.ru/articles/Luna/Luna.pdf>
9. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Семёнов В.Т.. Радиационные условия на орбите и поверхности Марса. / Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». -2014. Том. 138, № 1, -С 53 – 57. [Электронный ресурс- Режим доступа: <http://jurnal.vniiem.ru/text/138/53-57.pdf> свободный.
10. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Семенов В.Т., Долкарт В.М. / Радиационные нагрузки на космические аппараты при выводе их на межпланетную траекторию в период минимума солнечной активности // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». -2013. -том. 132. -№1. -С. 7-12. [Электронный ресурс]- Режим доступа:
<http://jurnal.vniiem.ru/text/132/7-12.pdf> свободный.
11. Access the ESTAR Database [электронный ресурс]. – База данных и программное обеспечение. – Режим доступа:
<http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm> , свободный.