

## Эффективность регистрации проникающих излучений на спутниках «Метеор»

# 08, август 2012

DOI: 10.7463/0812.0450381

Нусинов А. А., Авдюшин С. И., Гинзбург Е. А., Назаренко А. И., Никитский В. П., Писанко Ю. В., Свидский П. М., Юдкевич И. С.  
УДК 520.662

Федеральное государственное бюджетное учреждение “Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова”

[nusinov@mail.ru](mailto:nusinov@mail.ru)

[s.awdyushin@yandex.ru](mailto:s.awdyushin@yandex.ru)

[e\\_ginzburg@mail.ru](mailto:e_ginzburg@mail.ru)

[director@ipg.geospace.ru](mailto:director@ipg.geospace.ru)

[director@ipg.geospace.ru](mailto:director@ipg.geospace.ru)

[ypisanko@mail.ru](mailto:ypisanko@mail.ru)

[svidsky@mail.ru](mailto:svidsky@mail.ru)

[ipg.otdel7@gmail.com](mailto:ipg.otdel7@gmail.com)

1. По оценкам отечественных и зарубежных экспертов [2] более половины отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) обусловлено неблагоприятным воздействием факторов космического пространства (ФКП), которое может приводить к значительному сокращению срока службы бортовых систем и КА в целом.

Воздействия ФКП могут постепенно ухудшать свойства материалов и характеристик бортовых систем, что влечёт отказы в работе КА по истечении некоторого периода эксплуатации (например, вследствие накопления поглощенной дозы космической радиации постепенно снижается эффективность солнечных батарей). Иногда внезапные отказы в работе бортовой аппаратуры непосредственно сопровождают воздействие ФКП (например, одиночные протоны или тяжелые

ионы высокой энергии инициируют сбои в микросхемах с высокой степенью интеграции).

Электронная аппаратура КА чувствительна к тепловому режиму. Проблему отвода избыточного тепла от поверхности КА решают комплексно: применением терморегулирующих покрытий, эффективно излучающих и обладающих малым поглощением; ограничением внутренних источников тепла; обеспечением тепловых контактов освещенных и теневых сторон поверхности. Терморегулирующие покрытия также чувствительны к воздействию коротковолнового излучения Солнца, глубокого вакуума, потоков заряженных частиц, метеорных частиц.

Под действием заряженных частиц и электромагнитного излучения на внешней поверхности КА накапливается электрический заряд. Потенциал КА зависит от свойств материалов, используемых на внешней поверхности, и может достигать десятков киловольт. Реально наблюдаемые отрицательные потенциалы на поверхности низкоорбитальных КА, полёт которых проходит в ионосфере, достигают 3–5 В. Такие потенциалы, как правило, не представляют опасности для его бортовых систем. Но в случае дифференциального заряжения отдельных элементов внешней поверхности КА и при столь низких потенциалах возможно возникновение электрических разрядов между отдельными элементами конструкции на поверхности. Во время суббурь на высоты 20–50 тыс. км со стороны хвоста магнитосферы могут вторгаться потоки плазмы с энергией частиц порядка 5–30 кэВ при плотности потока до  $10^{14} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Величина электронного тока на поверхности КА в этих условиях такова, что на освещенных участках он ещё достаточно полно компенсируется током фотоэлектронной эмиссии, но в отсутствие освещения приносимый электронами заряд накапливается. В результате поверхность КА может приобретать отрицательный потенциал  $\sim 10\text{--}20 \text{ кВ}$ , что при дифференциальном заряжении может приводить к электрическим пробоям. Эта проблема наиболее остра для геостационарных КА. Аналогичные явления могут наблюдаться и на КА, функционирующих на высокоэллиптических орбитах, апогейные участки которых лежат в указанном интервале высот, а также на круговых орбитах высотой 20000 км. Горячая магнитосферная плазма воздействует

на КА также в авроральных областях, хотя воздействие потока авроральных частиц здесь кратковременно ( $\sim 1-10$  с) из-за быстрого пересечения КА узких зон высыпания авроральных частиц. В радиационных поясах высокие потенциалы обычно не наблюдаются, что связано с присутствием в этой области достаточно плотной холодной плазмы (плазмосферы), которая разряжает КА. Однако электроны с энергиями в несколько МэВ способны проникать в толщу диэлектрических материалов на глубину до 10 мм, заряжая диэлектрик. Между внедренным в диэлектрик электронным зарядом и поверхностью диэлектрика (либо металлическими элементами конструкции) может возникнуть значительная разность потенциалов, приводящая к пробое диэлектрика.

Ядерные реакции, происходящие в материалах конструкций и элементов КА под действием высокоэнергичной космической радиации, приводят к появлению вторичной или наведенной радиоактивности. Наведенный гамма-фон, (например, сцинтилляционного детектора и коллиматора научной аппаратуры) наблюдается в течение десятков минут после прохождения Южно-атлантической аномалии и может превышать фон от атмосферного гамма-альbedo и диффузный гамма-фон. В определенных условиях ядерные взаимодействия и образование вторичных излучений могут вносить сопоставимый вклад в радиационную обстановку внутри КА.

При планировании космических полетов возникает задача наиболее рационального распределения во времени различных операций, выполняемых на борту КА. Такие операции, как выход космонавтов в открытый космос, коррекция траектории, фотографирование, включение высокочувствительных датчиков и т. д. целесообразно производить в периоды минимальной радиационной опасности.

Таким образом, знание радиационной обстановки в ОКП необходимо как при планировании работы КА на заданной орбите, так и для обеспечения максимально возможного времени его активного существования. Однако, чаще всего сведения о радиационной обстановке используются при разработке требований по стойкости бортовой аппаратуры и комплектующих изделий к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП) и определения норм и методов испытаний.

2. Несмотря на значительные достижения космической физики, в настоящее время не представляется возможным рассчитать поля ИИКП на заданной орбите - недостаточно изучены некоторые механизмы генерации и релаксации излучений, а взаимосвязь различных геофизических и гелиофизических явлений, влияющих на пространственно-временное распределение частиц достаточно сложна. Поэтому при оценках радиационной обстановки на различных орбитах обычно опираются на результаты мониторинжных измерений ИИКП.

Проведение мониторинжных измерений ИИКП входит в задачи Гелиогеофизической службы Росгидромета и Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, исполняющего функции Главного геофизического центра этой службы [1]. Космический сегмент Гелиогеофизической службы включает два эшелона: ИСЗ «Метеор», имеющий полярную круговую орбиту, с радиационной аппаратурой для контроля радиационной обстановки в космосе на высотах 200–1000 км и геостационарный ИСЗ «Электро», который в силу своего предназначения имеет непрерывный контакт с наземными средствами приема и управления. Мониторные наблюдения ИИКП на спутниках восполняемой системы «Метеор» начаты в 1969 году. В период 1994–98 гг. к штатному мониторингу на системе «Метеор» добавились наблюдения на геостационарном КА «Электро» № 1. В декабре 2001 года на приполярную солнечно-синхронную орбиту с высотой 830 км был выведен спутник «Метеор-3М» № 1. В состав бортовой аппаратуры для наблюдений вариаций потоков заряженных частиц входил Комплекс геофизических измерений КГИ-4С.

В качестве датчиков излучения в аппаратуре КГИ-4С использованы пять гейгеровских детекторов с различными экранами, два сцинтилляционных счетчика и один черенковский. Гейгеровские счетчики регистрируют электроны и протоны суммарно, без разделения по видам частиц. Четыре из них (Сч1 – Сч4) рассчитаны на диапазон до  $10^4$  частиц·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, имеют площади около 1 см<sup>2</sup>, для пороговых энергий по электронам 0,15; 0,7; 1,5; 3,0 МэВ и, соответственно, 5; 15; 25; 40 МэВ по протонам. Экранировка пятого счетчика (Сч5, площадь  $\cong 13$  см<sup>2</sup>, диапазон от 0,01 до  $4 \cdot 10^3$  частиц·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) отсекает протоны до 30 МэВ и электроны до 2 МэВ. Сцинтилляционные счетчики предназначены для регистрации потоков протонов в

чистом виде (с отстройкой от фона электронов). Счетчик **Сч6** («малые протоны» - **МП**) – в интервале энергий от 30 до 90 МэВ (динамический диапазон от 0,2 до  $6,4 \cdot 10^4$  частиц·см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>) и счетчик Сч7 («большие протоны»-**БП**) для протонов с энергиями более 90 МэВ (диапазон от 0,01 до  $6 \cdot 10^3$  частиц·см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>). Черенковский счетчик Сч8 (**Ч**) рассчитан на регистрацию всенаправленной плотности потока протонов с энергией более 600 МэВ (диапазон от 0,1 до  $10^4$  частиц·см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>) с подавлением сигналов от электронов до  $\approx 7$  МэВ.

Количество импульсов от каждого из восьми указанных счетчиков частиц накапливается в течение 12 секунд, кодируется определенным образом и записывается в бортовое запоминающее устройство, из которого воспроизводится и передается по телеметрии в сеансах связи при прохождении спутника в зоне приемного пункта. Оперативная обработка принятой информации включает дешифровку сигнала с восстановлением его покадровой структуры (для выделения показаний отдельных детекторов), затем - привязку данных ко времени, географическим (орбитальным) и геомагнитным координатам. Таким образом получается массив, где последовательно для 12-секундных интервалов содержатся данные о числе импульсов, зарегистрированных каждым из детекторов (Сч1÷Сч8), что практически эквивалентно (пропорционально) скорости счета, с привязкой середины интервала к координатам.

В силу неидеальности характеристик детекторов, автономное использование показаний отдельных счетчиков не позволяет, вообще говоря, перейти от скоростей счёта к параметрам потоков частиц, если нет дополнительной информации: априорной (из модельных описаний состава излучений в разных пространственных зонах, функционального вида спектральных распределений и т.д.), либо получаемой из показаний других детекторов. Так, даже указанные выше пороговые энергии для отдельных видов частиц являются до некоторой степени условными. Для пояснения рассмотрим гейгеровский **Сч1** в условиях, когда известно, что присутствуют лишь протоны (потоки электронов пренебрежимо малы). Идеальная характеристика эффективности  $\eta(E)$  порогового счетчика для регистрации частиц должна иметь вид единичной ступенчатой функции Хевисайда  $\eta_{ид}(E)=U(E - E_0)$ , равной 0 при энергии  $E < E_0$  и 1 при  $E > E_0$ . (где  $E_0$  – пороговая энергия)

Полученная же с учетом реальных характеристик детектора [5] эффективность  $\eta_{\text{сч1}}(E)$  для такого счетчика, приведенная на рис. 1 (кривая 1), отличается от идеальной. В таком случае в качестве эффективной пороговой энергии счетчика  $E_{\text{эфф}}$  принимается значение порога идеального счетчика, при котором он будет показывать то же, что и реальный.

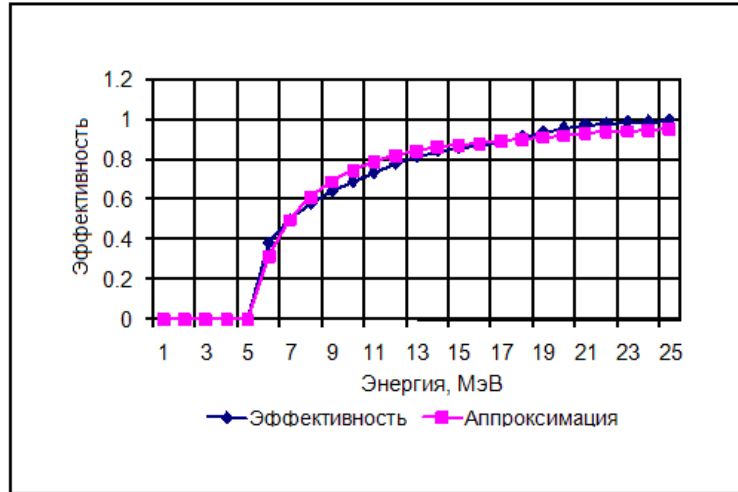


Рис. 1. Эффективность регистрации протонов счетчиком СЧ1.

Известно, что при этом  $E_{\text{эфф}}$  зависит от формы спектра, вопрос лишь в том, насколько эта зависимость существенна. Для интегральных спектров степенного типа  $N(E)=A \cdot E^{-\gamma}$  такая зависимость легко выражается в аналитической форме, если аппроксимировать  $\eta_{\text{сч1}}(E)$  в виде

$$\eta(E) = \left[ 1 - \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\beta} \right] \cdot U(E - E_0).$$

В этом случае

$$E_{\text{эфф}} = E_0 \cdot \left( 1 + \frac{\gamma}{\beta} \right)^{1/\gamma}.$$

Аппроксимирующая кривая при  $E_0=4,21$  МэВ и  $\beta=1,7$  также показана на рис. 1, а значения получающихся при этом  $E_{эфф}$  для различных  $\gamma$  приведены в четвертом столбце таблицы 1. Здесь же в столбцах 5 – 9 даны значения поправочного коэффициента  $S_{пор}/S$ , на который следует умножать площадь детектора, чтобы получить правильный результат, если для интерпретации данных принимается  $E_{пор}$ , отличное от  $E_{эфф}$ . Из данных таблицы видно, что эффективный порог при такой характеристике детектора может меняться от 5,3 до 6,9 МэВ. Однако если выбрать фиксированное значение  $E_{пор}=5,2$  МэВ и среднее значение  $\langle S_{пор}/S \rangle = 0,765$ , то будет обеспечена точность оценки потока около 10 % во всем рассмотренном диапазоне изменения наклона спектра  $\gamma$ .

#### Эффективная пороговая энергия счетчика

$\Gamma$	$1+\gamma / 1,7$	$E_{эфф}/E_0$	$E_{эфф}$	$S_{пор}/S$ при фиксированном $E_{пор}$ , МэВ			
				$E_{пор}=5,7$	$E_{пор}=5,4$	$E_{пор}=5,2$	$E_{пор}=5,0$
0,5	1,294	1,675	7,05	0,899	0,875	0,859	0,842
1	1,588	1,588	6,69	0,852	0,808	0,778	0,748
2	2,176	1,475	6,21	0,842	0,756	0,701	0,648
3	2,765	1,404	5,91	0,897	0,763	0,681	0,606
4	3,353	1,353	5,70	1,002	0,807	0,694	0,593
5	3,941	1,316	5,54	1,154	0,880	0,729	0,599
6	4,529	1,286	5,42	1,359	0,982	0,783	0,619
7	5,118	1,263	5,32	1,628	1,115	0,856	0,651

В некоторых случаях такой результат для оперативной оценки ситуации является приемлемым, однако, при регистрации этим же детектором потоков электронов, или, тем более, излучения со смешанным составом, такого рода прием приводит к большим погрешностям, так что требуется рассматривать одновременные данные совокупности детекторов с использованием реальных (неидеализированных) характеристик отклика.

Для получения геометрических факторов была проведена серия модельных расчетных исследований эффективности регистрации протонов и электронов

каждым детектором в зависимости от энергии и направления прихода частиц с учетом размещения детектора на спутнике (влияния ослабления излучения конструктивными элементами). Конфигурация детекторов и окружающих их масс космического аппарата условно принята осесимметричной и задана масками, отображающими пространственное расположение девяти различных веществ, включая рабочее тело детектора. Дискретность такого описания составляет 0,5 мм. Масса космического аппарата задана слоем небольшой толщины с высокой фиктивной плотностью. Несимметричное расположение детектора относительно массы спутника имитировалось кольцами этого фиктивного материала так, чтобы приблизительно отобразить степень экранировки в зависимости от направления относительно оси. Это дает возможность сократить объем вычислений. Для расчета сечений строилась система параллельных линий по сетке 0,5×0,5 мм, пересекающих рабочее тело детектора под углами к оси детектора от 0 до 180 градусов (шаг 10 градусов). Далее эти линии рассматривались как траектории частиц изотропного потока. Для расчёта пределов энергии, в которых частица, двигающаяся по конкретной траектории, должна быть зарегистрирована детектором, использовались табличные данные о линейных потерях энергии электронов и протонов в различных материалах в зависимости от энергии. Порог регистрации частиц газоразрядными счетчиками принимался нулевым, для сцинтилляционных детекторов были проверены несколько значений порогов от 2 МэВ до 5 МэВ, а для черенковского детектора, кроме амплитудного порога, учтены особенности возбуждения светового излучения в радиаторе. Верхний и нижний пороги энергии частиц на входе в детектор позволяют рассчитать для каждой траектории потери энергии в слоях вещества, окружающего детектор. Таким образом, получаются значения границ диапазона энергий регистрируемых частиц на входе в КА. Для электронов с энергиями до нескольких МэВ существенны отклонения от прямолинейной модели распространения частиц. Поэтому дополнительно введены поправочные коэффициенты, учитывающие кажущееся увеличение линейных потерь электронов. Если частица данной энергии, поступившая по рассматриваемой трассе, соответствует условиям регистрации детектором, это означает вклад в общую эффективную площадь 0,0025 кв. см,



поскольку шаг сетки линий был выбран равным 0,5 мм. Суммарное сечение складывается по всем рассмотренным трассам для каждой градации энергии и для каждого угла между трассой и осью симметрии. Общее сечение суммируется по этим углам с весом, соответствующим вкладу в полный телесный угол. Рассчитанные таким образом сечения представляют собой отношение счета импульсов от детектора и интенсивности изотропного потока частиц. Погрешности расчета оцениваются от 10 до 30 %. Основные причины погрешностей – упрощение пространственного расположения масс КА, дискретизация энергии, упрощенная модель распространения излучения в веществе, неточность исходных данных о ЛПЭ.

На рис. 2 и 3 представлены графики зависимостей сечений регистрации протонов и электронов от энергии для девяти детекторов. Для черенковского детектора представлены два варианта – *cher* и *cherD*. Первый вариант относится к симметричному положению детектора в центре масс КА, второй – к несимметричному положению вблизи тонкой обшивки.

Графики сечений имеют ступенчатый характер. Ступеньки определяются характерными толщинами конструктивных элементов детектора и КА. Нижний порог задан толщиной стенок собственно счетчика или специального экрана. Последняя ступенька соответствует прохождению энергичных частиц сквозь всю массу спутника. Плавное нарастание сечений вблизи порогов не везде отображается точно из-за дискретности расчетной модели. Однако, результаты этой работы позволяют рассчитывать отклик детекторов на потоки с известными характеристиками и способствовать количественной интерпретации получаемых данных о радиационной обстановке в ОКП. Такой расчет представляется нам необходимым шагом для обоснования перевода показаний детекторов в значения потоков частиц.

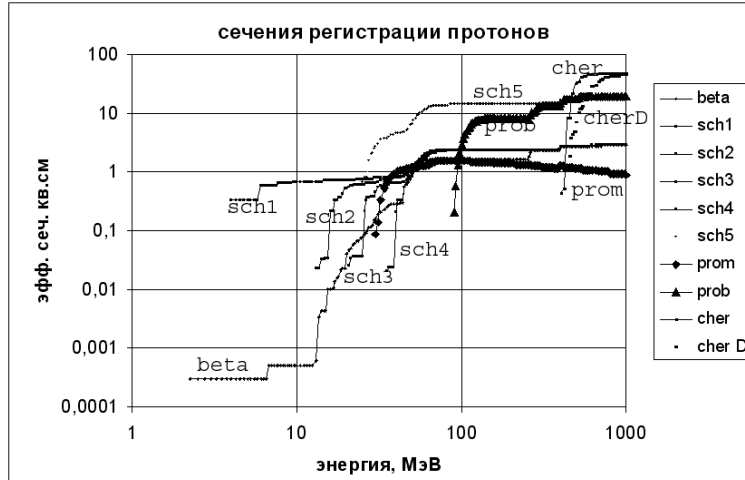


Рис. 2. Сечения регистрации протонов в зависимости от энергии.

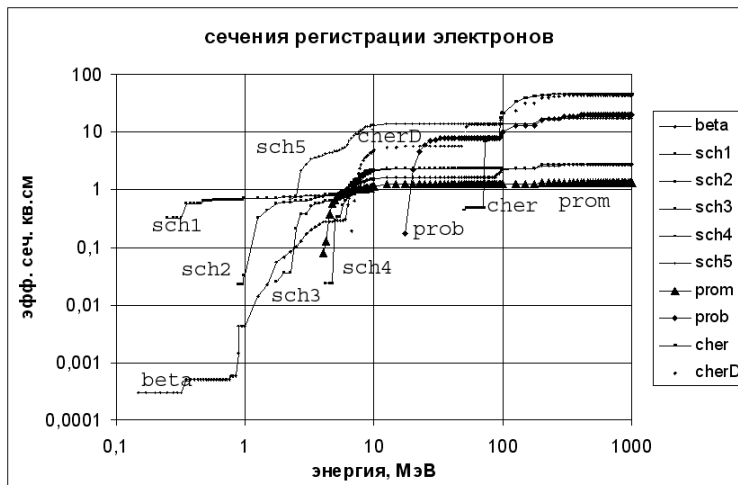


Рис. 3. Сечения регистрации электронов в зависимости от энергии.

На рис. 4 и 5 показаны зависимости сечений регистрации частиц черенковским детектором от энергии при нескольких значениях амплитудного порога. Порог обозначен числом фотонов световой вспышки в радиаторе детектора. Порог работавшего прибора соответствовал приблизительно 100 квантам. По графикам видно, что амплитудный порог в большей степени влияет на сечения для протонов, чем электронов. В то же время экран сравнительно небольшой толщины может существенно поднять энергетический порог

регистрации электронов. Это соображение иллюстрирует одну из возможностей совершенствования конструкции или настройки измерительного комплекса с использованием результатов данного расчета.

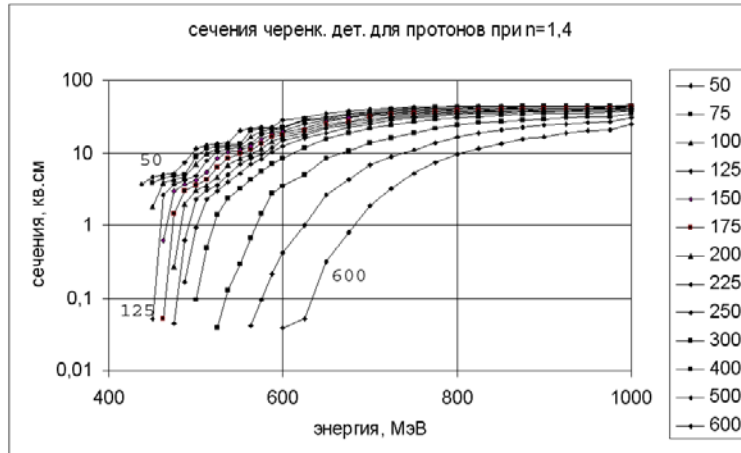


Рис. 4. Сечения регистрации протонов черенковским детектором при различных значениях амплитудного порога.

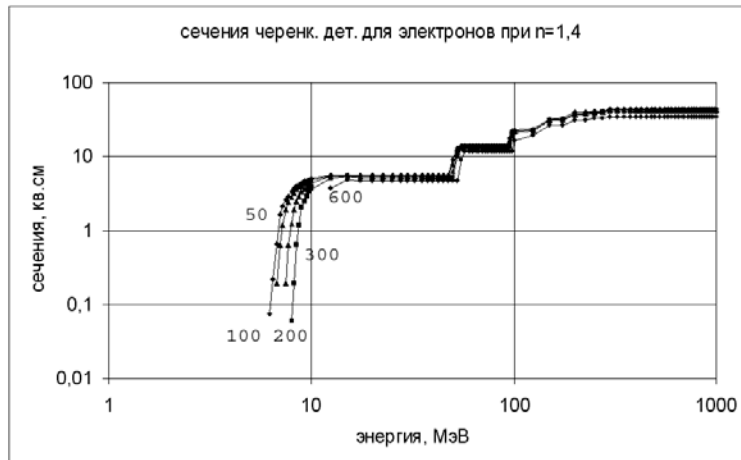


Рис. 5. Сечения регистрации электронов черенковским детектором при четырех значениях амплитудного порога.

3. Спутник «Метеор-3» № 1 проработал на орбите до мая 2005 года. На нём удалось зарегистрировать ряд уникальных космических возмущений, наблюдавшихся на фазе спада 23 цикла солнечной активности [3, 4]. Изложенная в

настоящем сообщении методика определения потоков высокоэнергичных частиц по данным о скоростях счёта различных детекторов комплекса КГИ-4С послужила основой для получения оценок потоков корпускулярной радиации, в том числе, и во время этих уникальных событий.

#### Список литературы

1. Авдюшин С.И. Гелиогеофизическая служба, ее задачи и перспективы развития // Метеорология и гидрология. 1981. № 6. С. 4-11.
2. Верхотуров В.И. Влияние внешних воздействующих факторов на работоспособность космических аппаратов // Инженерная физика. 2002. № 3. С. 25-31.
3. Российская гелиогеофизическая служба – мониторинг и прогноз потоков энергичных частиц в околоземном космическом пространстве / С.И. Авдюшин, Е.А. Гинзбург, В.И. Денисова, В.А. Крутов, А.А. Нусинов, П.М. Свидский, Г.Ф. Тулинов, И.С. Юдкевич // Космонавтика и ракетостроение. 2003. № 1 (30). С. 25-31.
4. Магнитные бури в октябре 2003 года / М.И. Панасюк, С.Н. Кузнецов, Л.Л. Лазутин, С.И. Авдюшин // Космические исследования. 2004. Т. 42, № 5. С. 509-554.
5. Радиационная аппаратура ИСЗ «Метеор-1» / С.И. Авдюшин, В.О. Вяземский, Р.М. Коган, Г.А. Коротаев, Ю.М. Кулагин, Ю.Я. Куриленко, Г.М. Поляков, И.С. Юдкевич // Вопросы физики атмосферы и радиационной космофизики : сб. статей. М.: Гидрометеиздат, 1970. Вып.1. С. 156-167.

## Efficiency of detecting penetrating radiation in "Meteor" satellites

# 08, August 2012

DOI: 10.7463/0812.0450381

Nusinov A.A., Avdyuschin S.I., Ginzburg E.A., Nazarenko A.I.,  
Nikitskii V.P., Pisanko Yu.V., Svidskii P.M., Yudkevich I.S.

Federal State Institution "Institute of Applied Geophysics. Academician EK Fedorov

[nusinov@mail.ru](mailto:nusinov@mail.ru)

[s.awdyushin@yandex.ru](mailto:s.awdyushin@yandex.ru)

[e\\_ginzburg@mail.ru](mailto:e_ginzburg@mail.ru)

[director@ipg.geospace.ru](mailto:director@ipg.geospace.ru)

[director@ipg.geospace.ru](mailto:director@ipg.geospace.ru)

[ypisanko@mail.ru](mailto:ypisanko@mail.ru)

[svidsky@mail.ru](mailto:svidsky@mail.ru)

[ipg.otdel7@gmail.com](mailto:ipg.otdel7@gmail.com)

The authors consider methodical and practical questions of detecting penetrating radiation in "Meteor" satellites as one of the important factors affecting the equipment operation in space. To implement dosimetry estimates the authors calculated active threshold energies and geometric factors for Geiger, Cherenkov and scintillation detectors of penetrating radiation which are included in the complex KGI-4S satellite "Meteor-3M» № 1 designed to detect particles with energies up to 600 MeV for protons and up to 7 MeV for electrons .

---

Publications with keywords:[outer space](#) , [radiation environment factors](#), [the satellite "Meteor"](#), [the effective area](#), [the threshold energy](#)

Publications with words:[outer space](#) , [radiation environment factors](#), [the satellite "Meteor"](#), [the effective area](#), [the threshold energy](#)

---

## References

1. Avdiushin S.I. Geliogefizicheskaia sluzhba, ee zadachi i perspektivy razvitiia [Heliogeophysical service, its problems and prospects]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1981, no. 6, pp. 4-11.
2. Verkhoturov V.I. Vliianie vneshnikh vozdestivuiushchikh faktorov na rabotosposobnost' kosmicheskikh apparatov [The influence of external factors of influence on the performance of the spacecraft]. *Inzhenernaia fizika*, 2002, no. 3, pp. 25-31.
3. Avdiushin S.I., Ginzburg E.A., Denisova V.I., Krutov V.A., Nusinov A.A., Svidskii P.M., Tulinov G.F., Iudkevich I.S. Rossiiskaia geliogefizicheskaia sluzhba – monitoring i prognoz potokov energichnykh chastits v okolozemnom kosmicheskom prostranstve [Russian heliogeophysical service - monitoring and forecast of fluxes of energetic particles in near-Earth space]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], 2003, no. 1 (30), pp. 25-31.
4. Panasiuk M.I., Kuznetsov S.N., Lazutin L.L., Avdiushin S.I. Magnitnye buri v oktiabre 2003 goda [Magnetic storms in October 2003]. *Kosmicheskie issledovaniia* [Space research], 2004, vol. 42, no. 5, pp. 509-554.
5. Avdiushin S.I., Viazemskii V.O., Kogan R.M., Korotaev G.A., Kulagin Iu.M., Kurilenko Iu.Ia., Poliakov G.M., Iudkevich I.S. Radiatsionnaia apparatura ISZ «Meteor-1» [Radiation equipment of Artificial Satellite of the Earth "Meteor-1"]. *Voprosy fiziki atmosfery i radiatsionnoi kosmofiziki : sb. statei* [Questions of physics of the atmosphere and radiation space physics : collection of articles]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1970. Iss. 1, pp. 156-167.