

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

# ЛУЧИ КОСМИЧЕСКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ

## Вероятностная модель потоков протонов

Издание официальное

БЗ 1—2001/479

ГОССТАНДАРТ РОССИИ  
Москва

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Научно-исследовательским институтом ядерной физики Московского Государственного Университета (НИИЯФ МГУ) и Всероссийским научно-исследовательским институтом стандартизации (ВНИИСтандарт) Госстандарта России

2 ПРИНЯТ И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Госстандарта России от 27 апреля 2001 г. № 196-ст

3 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

© ИПК Издательство стандартов, 2001

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Госстандарта России

## ЛУЧИ КОСМИЧЕСКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ

## Вероятностная модель потоков протонов

Solar energetic particles. Probabilistic model for proton fluxes

Дата введения 2002—01—01

## 1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает вероятностные энергетические спектры потоков (флюенсов и максимальных пиковых потоков) протонов солнечных космических лучей (СКЛ) с энергией  $E \geq 5$  МэВ в околоземном космическом пространстве вне магнитосферы Земли для условий изменяющегося уровня солнечной активности.

Стандарт предназначен для использования в расчетах радиационного воздействия протонов СКЛ на технические устройства, материалы и другие объекты в космическом пространстве.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 25645.105—84 Лучи космические солнечные. Термины и определения

ГОСТ 25645.302—83 Расчеты баллистические искусственных спутников Земли. Методика расчета индексов солнечной активности

## 3 Определения

В настоящем стандарте применяют следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **солнечные космические лучи (СКЛ):** Потоки заряженных частиц высоких энергий (более 5 МэВ/нуклон) солнечного происхождения.

3.2 **число Вольфа:** Относительное число солнечных пятен, определяемое ежесуточно (ГОСТ 25645.302).

3.3 **уровень солнечной активности:** Среднегодовое или среднемесячное число Вольфа.

3.4 **прогнозируемый уровень солнечной активности:** Уровень солнечной активности, прогнозируемый от 4 месяцев до 11 лет вперед (по ГОСТ 25645.302).

3.5 **солнечное протонное событие (СПС):** По ГОСТ 25645.105.

3.6 **флюенс протонов:** Полное количество протонов, падающих на сферу с сечением площадью 1 см<sup>2</sup>.

3.7 **пиковый поток протонов:** Максимальное количество протонов, падающее в единицу времени в единице телесного угла на единичную площадку, перпендикулярную направлению наблюдения (в одном или нескольких событиях СКЛ, произошедших за определенный промежуток времени).

3.8 **дифференциальный энергетический спектр флюенса протонов:** Дифференциальное распределение флюенса протонов по энергии.

3.9 **дифференциальный энергетический спектр пикового потока протонов:** Дифференциальное распределение пикового потока протонов СКЛ по энергии.

3.10 **вероятность флюенса:** Вероятность, с которой флюенс протонов превышает заданное значение.

3.11 **вероятность пикового потока:** Вероятность, с которой пиковый поток протонов превышает заданное значение.

## 4 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте применяют следующие сокращения и обозначения:

- $\langle W \rangle$  — среднегодовой уровень солнечной активности;
- $\langle W^* \rangle$  — среднемесячный уровень солнечной активности;
- $\Phi$  — флюенс протонов,  $\text{см}^{-2}$ ;
- $\Phi (\geq 30)$  или  $\Phi_{30}$  — значение события СКЛ;
- $\Phi(E)$  — дифференциальный энергетический спектр флюенса протонов,  $(\text{см}^2 \cdot \text{МэВ})^{-1}$ ;
- $f$  — пиковый поток протонов,  $\text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- $f(E)$  — дифференциальный энергетический спектр (пикового) потока протонов,  $(\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ})^{-1}$ ;
- $R$  — жесткость протона, МВ;
- $M_0 c^2$  — энергия покоя протона, равная 938 МэВ;
- $D$  — спектральный коэффициент дифференциального энергетического спектра протонов;
- $\lambda$  — спектральный индекс дифференциального энергетического спектра протонов;
- $\delta$  — индекс завала спектра дифференциального энергетического спектра протонов;
- $\langle n \rangle$  — ожидаемое в среднем количество событий СКЛ  $\Phi_{30} \geq 10^5 \text{ см}^{-2}$ ;
- $\Psi$  — вероятность флюенса или пикового потока протонов превышать заданное значение;
- $\beta$  — относительная скорость света;
- $E$  — кинетическая энергия протона, МэВ.

## 5 Основные положения

5.1 Модель устанавливает в виде дифференциальных энергетических спектров значение флюенсов и пиковых потоков протонов, превышение которых в условиях заданного уровня солнечной активности  $\langle W(t) \rangle$  на временном интервале  $T$  ожидается с заданной вероятностью  $\Psi$ .

5.2 Дифференциальные энергетические спектры флюенсов  $[\Phi(E)]$  или пиковых потоков  $[f(E)]$  протонов [обобщенно  $F(E)$ ] задают в форме степенных функций жесткости протонов  $R$ :

$$F_{\Psi, \langle n \rangle}(E) dE = D \left( \frac{R}{R_0} \right)^{\mu} \frac{dE}{\beta}, \quad (1)$$

где  $\mu$  — спектральный индекс, при  $E \geq 30$  МэВ постоянен и равен  $\lambda$ ,  
а при  $E < 30$  МэВ  $\mu$  вычисляют по формуле

$$\mu = \lambda \left( \frac{E}{30} \right)^{\delta} \quad (2)$$

$R$  — жесткость протонов, вычисляют по формуле

$$R = \sqrt{E(E + 2M_0 c^2)}, \quad (3)$$

где  $E$  — кинетическая энергия протона, МэВ;

$M_0 c^2$  — энергия покоя протона, равная 938 МэВ;

$R_0 = 239$  МВ, соответствует энергии протона  $E = 30$  МэВ;

$\beta$  — относительная скорость протона, которую вычисляют по формуле

$$\beta = \frac{\sqrt{E(E + 2M_0 c^2)}}{E + M_0 c^2}. \quad (4)$$

5.3 Энергетические спектры (1) определяют, используя три параметра:

$D$  — спектральный коэффициент;

$\lambda$  — спектральный индекс;

$\delta$  — индекс завала спектра.

Каждый из параметров является функцией двух параметров модели — среднего ожидаемого числа событий СКЛ  $\langle n \rangle$  и вероятности  $\Psi$ .

5.4 К параметрам модели относятся:

- вероятность  $\Psi$  превышения флюенса или пикового потока протонов энергии  $E$ , задаваемого дифференциальным энергетическим спектром (1);

- среднее ожидаемое число событий СКЛ  $\Phi_{30} \geq 10^5 \text{ см}^{-2}$  —  $\langle n \rangle$ .

5.5 Среднее ожидаемое число событий СКЛ  $\Phi_{30} \geq 10^5 \text{ см}^{-2}$  —  $\langle n \rangle$  вычисляют по формулам: при продолжительности периода времени (длительность полета)  $T \leq 1$  год и равной  $m$  месяцам

$$\langle n \rangle = 0,27 \cdot \frac{1}{12} \sum_{i=1}^m \langle W_i^* \rangle, \quad (5)$$

где  $\langle W_i^* \rangle$  — среднемесячные (прогнозируемые) числа солнечных пятен, при длительности полета  $T > 1$  год и  $T = s$  (лет) +  $m$  (месяцев)

$$\langle n \rangle = 0,27 \left( \sum_{i=1}^s \langle W_i \rangle + \frac{1}{12} \sum_{i=1}^m \langle W_i^* \rangle \right), \quad (6)$$

где  $\langle W_i \rangle$  — среднегодовые (прогнозируемые) числа солнечных пятен, а отсчет года начинают от момента начала интервала времени (начала полета).

5.6 Среднегодовые и среднемесячные числа солнечных пятен вычисляют по ГОСТ 25645.302—83.

5.7 Значения параметров дифференциальных энергетических спектров для флюенсов и пиковых потоков протонов  $D_{\Psi, \langle n \rangle}$ ,  $\lambda_{\Psi, \langle n \rangle}$  и  $\delta_{\Psi, \langle n \rangle}$  для набора наиболее часто встречающихся на практике параметров модели — вероятности  $\Psi$ , равной 0,9; 0,842; 0,5; 0,158; 0,1; 0,05; 0,0316; 0,01 и ожидаемых в среднем количествах событий  $\langle n \rangle$ , равных 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, приведены в таблицах А.1—А.6 (приложение А). Параметры энергетических спектров для промежуточных значений параметров модели вычисляют по табличным данным методами интерполяции.

5.8 Подробная методика расчета флюенсов и пиковых потоков протонов, которая может быть использована для определения как дифференциальных энергетических спектров, так и промежуточных величин, необходимых для проведения некоторых специальных расчетов, приведена в приложении Б.

## 6 Точность метода

6.1 Точность метода характеризуется относительной погрешностью определения значений флюенсов и пиковых потоков, обусловленной ограниченной статистической точностью накопившихся к настоящему времени экспериментальных данных (таблицы В.1 и В.2).

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
(обязательное)

Таблицы параметров для расчета энергетических спектров  
флюенсов и пиковых потоков протонов

Таблица А.1 — Коэффициенты дифференциального энергетического спектра флюенсов протонов  $D_{\Psi, \langle n \rangle}$

| $\langle n \rangle$ | $D_{\Psi, \langle n \rangle}$ , см <sup>-2</sup> , при интегральной вероятности $\Psi$ |           |           |           |           |           |           |           |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                     | 0,9                                                                                    | 0,842     | 0,5       | 0,158     | 0,1       | 0,05      | 0,0316    | 0,010     |
| 1                   | —                                                                                      | —         | 0,676E+04 | 0,134E+06 | 0,336E+06 | 0,103E+07 | 0,196E+07 | 0,781E+07 |
| 2                   | —                                                                                      | —         | 0,384E+05 | 0,505E+06 | 0,104E+07 | 0,277E+07 | 0,501E+07 | 0,153E+08 |
| 4                   | 0,149E+05                                                                              | 0,260E+05 | 0,175E+06 | 0,156E+07 | 0,307E+07 | 0,696E+07 | 0,111E+08 | 0,262E+08 |
| 8                   | 0,931E+05                                                                              | 0,144E+06 | 0,727E+06 | 0,445E+07 | 0,761E+07 | 0,147E+08 | 0,207E+08 | 0,397E+08 |
| 16                  | 0,450E+06                                                                              | 0,644E+06 | 0,240E+07 | 0,103E+08 | 0,164E+08 | 0,265E+08 | 0,340E+08 | 0,558E+08 |
| 32                  | 0,186E+07                                                                              | 0,248E+07 | 0,704E+07 | 0,221E+08 | 0,298E+08 | 0,429E+08 | 0,523E+08 | 0,773E+08 |
| 64                  | 0,648E+07                                                                              | 0,810E+07 | 0,185E+08 | 0,421E+08 | 0,520E+08 | 0,686E+08 | 0,794E+08 | 0,109E+09 |
| 128                 | 0,198E+08                                                                              | 0,236E+08 | 0,435E+08 | 0,771E+08 | 0,905E+08 | 0,111E+09 | 0,123E+09 | 0,153E+09 |
| 256                 | 0,539E+08                                                                              | 0,616E+08 | 0,938E+08 | 0,141E+09 | 0,157E+09 | 0,179E+09 | 0,195E+09 | 0,225E+09 |
| 512                 | 0,135E+09                                                                              | 0,147E+09 | 0,195E+09 | 0,257E+09 | 0,276E+09 | 0,300E+09 | 0,318E+09 | 0,345E+09 |

Таблица А.2 — Индексы дифференциального энергетического спектра флюенсов протонов  $\lambda_{\Psi, \langle n \rangle}$

| $\langle n \rangle$ | $\lambda_{\Psi, \langle n \rangle}$ при интегральной вероятности $\Psi$ |       |      |       |      |      |        |       |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|------|------|--------|-------|
|                     | 0,9                                                                     | 0,842 | 0,5  | 0,158 | 0,1  | 0,05 | 0,0316 | 0,010 |
| 1                   | —                                                                       | —     | 6,41 | 5,18  | 4,86 | 4,48 | 4,29   | 4,12  |
| 2                   | —                                                                       | —     | 5,64 | 4,74  | 4,50 | 4,30 | 4,19   | 4,03  |
| 4                   | 6,15                                                                    | 5,91  | 5,19 | 4,46  | 4,29 | 4,19 | 4,11   | 3,94  |
| 8                   | 5,60                                                                    | 5,46  | 4,81 | 4,28  | 4,18 | 4,10 | 4,02   | 3,86  |
| 16                  | 5,19                                                                    | 5,05  | 4,52 | 4,18  | 4,11 | 4,02 | 3,95   | 3,79  |
| 32                  | 4,83                                                                    | 4,70  | 4,36 | 4,13  | 4,04 | 3,95 | 3,88   | 3,73  |
| 64                  | 4,56                                                                    | 4,48  | 4,27 | 4,05  | 3,98 | 3,90 | 3,84   | 3,69  |
| 128                 | 4,41                                                                    | 4,37  | 4,20 | 4,01  | 3,95 | 3,87 | 3,81   | 3,67  |
| 256                 | 4,31                                                                    | 4,28  | 4,14 | 3,99  | 3,93 | 3,85 | 3,81   | 3,67  |
| 512                 | 4,24                                                                    | 4,21  | 4,10 | 3,96  | 3,91 | 3,84 | 3,81   | 3,68  |

Т а б л и ц а А.3 — Индексы завала дифференциального энергетического спектра флюенсов протонов  $\delta_{\Psi, \langle n \rangle}$

| $\langle n \rangle$ | $\delta_{\Psi, \langle n \rangle}$ при интегральной вероятности $\Psi$ |       |       |       |       |       |        |       |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|                     | 0,9                                                                    | 0,842 | 0,5   | 0,158 | 0,1   | 0,05  | 0,0316 | 0,010 |
| 1                   | —                                                                      | —     | 0,168 | 0,055 | 0,050 | 0,049 | 0,054  | 0,078 |
| 2                   | —                                                                      | —     | 0,076 | 0,048 | 0,048 | 0,057 | 0,071  | 0,089 |
| 4                   | 0,122                                                                  | 0,085 | 0,062 | 0,049 | 0,059 | 0,074 | 0,085  | 0,086 |
| 8                   | 0,077                                                                  | 0,069 | 0,050 | 0,062 | 0,072 | 0,084 | 0,084  | 0,069 |
| 16                  | 0,058                                                                  | 0,053 | 0,048 | 0,067 | 0,070 | 0,081 | 0,076  | 0,052 |
| 32                  | 0,048                                                                  | 0,046 | 0,050 | 0,064 | 0,065 | 0,066 | 0,059  | 0,032 |
| 64                  | 0,045                                                                  | 0,046 | 0,057 | 0,064 | 0,060 | 0,054 | 0,046  | 0,019 |
| 128                 | 0,049                                                                  | 0,052 | 0,059 | 0,056 | 0,052 | 0,042 | 0,034  | 0,009 |
| 256                 | 0,053                                                                  | 0,055 | 0,056 | 0,049 | 0,043 | 0,032 | 0,025  | 0,004 |
| 512                 | 0,055                                                                  | 0,056 | 0,053 | 0,043 | 0,036 | 0,025 | 0,017  | 0,000 |

Т а б л и ц а А.4 — Коэффициенты дифференциального энергетического спектра пиковых потоков протонов  $D_{\Psi, \langle n \rangle}$

| $\langle n \rangle$ | $D_{\Psi, \langle n \rangle}$ , (см <sup>2</sup> ·ср·с·МэВ) <sup>−1</sup> , при интегральной вероятности $\Psi$ |        |        |       |       |       |        |       |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
|                     | 0,9                                                                                                             | 0,842  | 0,5    | 0,158 | 0,1   | 0,05  | 0,0316 | 0,010 |
| 1                   | —                                                                                                               | —      | 0,0014 | 0,056 | 0,170 | 0,750 | 1,66   | 8,4   |
| 2                   | —                                                                                                               | —      | 0,0106 | 0,261 | 0,706 | 2,35  | 4,75   | 20,8  |
| 4                   | 0,00257                                                                                                         | 0,0041 | 0,0561 | 1     | 2,27  | 6,65  | 12     | 39,6  |
| 8                   | 0,0159                                                                                                          | 0,0237 | 0,258  | 3,24  | 6,75  | 16,7  | 26,8   | 77,5  |
| 16                  | 0,0866                                                                                                          | 0,123  | 1      | 8,56  | 15,9  | 32,7  | 50,6   | 126   |
| 32                  | 0,389                                                                                                           | 0,537  | 3,27   | 19,9  | 32,9  | 63,4  | 89,9   | 215   |
| 64                  | 1,48                                                                                                            | 1,94   | 8,86   | 40    | 60,3  | 104   | 145    | 300   |
| 128                 | 4,33                                                                                                            | 5,45   | 20,6   | 70,3  | 102   | 171   | 227    | 425   |
| 256                 | 11,3                                                                                                            | 13,8   | 41     | 116   | 169   | 264   | 332    | 540   |
| 512                 | 26,8                                                                                                            | 31,5   | 73,6   | 191   | 252   | 370   | 446    | 702   |

Т а б л и ц а А.5 — Индексы дифференциального энергетического спектра пиковых потоков протонов  $\lambda_{\Psi, \langle n \rangle}$

| $\langle n \rangle$ | $\lambda_{\Psi, \langle n \rangle}$ при интегральной вероятности $\Psi$ |       |       |       |       |       |        |       |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|                     | 0,9                                                                     | 0,842 | 0,5   | 0,158 | 0,1   | 0,05  | 0,0316 | 0,010 |
| 1                   | 6,779                                                                   | 6,581 | 6,434 | 5,09  | 4,765 | 4,413 | 4,247  | 4,06  |
| 2                   | 8,071                                                                   | 6,976 | 5,548 | 4,672 | 4,433 | 4,23  | 4,134  | 3,98  |
| 4                   | 6,065                                                                   | 5,872 | 5,083 | 4,348 | 4,24  | 4,131 | 4,05   | 3,889 |
| 8                   | 5,415                                                                   | 5,306 | 4,664 | 4,219 | 4,129 | 4,041 | 3,956  | 3,814 |
| 16                  | 4,943                                                                   | 4,841 | 4,369 | 4,11  | 4,052 | 3,961 | 3,9    | 3,765 |
| 32                  | 4,567                                                                   | 4,491 | 4,195 | 4,02  | 3,948 | 3,883 | 3,822  | 3,72  |
| 64                  | 4,296                                                                   | 4,262 | 4,107 | 3,935 | 3,87  | 3,81  | 3,756  | 3,649 |
| 128                 | 4,164                                                                   | 4,145 | 4,028 | 3,869 | 3,806 | 3,754 | 3,699  | 3,6   |
| 256                 | 4,098                                                                   | 4,092 | 3,962 | 3,82  | 3,773 | 3,704 | 3,63   | 3,52  |
| 512                 | 4,069                                                                   | 4,057 | 3,885 | 3,777 | 3,685 | 3,613 | 3,568  | 3,44  |

Т а б л и ц а А.6 — Индексы завала дифференциального энергетического спектра пиковых потоков протонов  $\delta_{\Psi, \langle n \rangle}$

| $\langle n \rangle$ | $\delta_{\Psi, \langle n \rangle}$ при интегральной вероятности $\Psi$ |       |       |       |       |       |        |       |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|                     | 0,9                                                                    | 0,842 | 0,5   | 0,158 | 0,1   | 0,05  | 0,0516 | 0,010 |
| 1                   | —                                                                      | —     | 0,167 | 0,065 | 0,064 | 0,080 | 0,089  | 0,121 |
| 2                   | —                                                                      | —     | 0,078 | 0,069 | 0,078 | 0,100 | 0,111  | 0,135 |
| 4                   | 0,12                                                                   | 0,095 | 0,064 | 0,083 | 0,095 | 0,122 | 0,132  | 0,147 |
| 8                   | 0,07                                                                   | 0,068 | 0,066 | 0,110 | 0,127 | 0,142 | 0,150  | 0,152 |
| 16                  | 0,064                                                                  | 0,063 | 0,084 | 0,132 | 0,145 | 0,155 | 0,158  | 0,155 |
| 32                  | 0,072                                                                  | 0,075 | 0,108 | 0,151 | 0,156 | 0,158 | 0,152  | 0,153 |
| 64                  | 0,093                                                                  | 0,099 | 0,134 | 0,163 | 0,154 | 0,152 | 0,145  | 0,137 |
| 128                 | 0,111                                                                  | 0,131 | 0,151 | 0,159 | 0,156 | 0,152 | 0,142  | 0,124 |
| 256                 | 0,156                                                                  | 0,168 | 0,170 | 0,156 | 0,159 | 0,155 | 0,140  | 0,107 |
| 512                 | 0,188                                                                  | 0,197 | 0,180 | 0,165 | 0,159 | 0,152 | 0,143  | 0,090 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
(справочное)

Методика расчета флюенсов и пиковых потоков протонов

Б.1 Значения флюенсов и пиковых потоков протонов, превышение которых ожидается с заданной вероятностью  $\Psi$ , для условий заданного уровня солнечной активности  $\langle W \rangle$  на временном интервале  $T$  вычисляют по расчету потоков протонов для большого количества вариантов полета  $N$  с последующим преобразованием вычисленных вероятностных кривых в энергетические спектры.

Разные варианты полетов отличаются:

- а) разным «случайным» количеством событий СКЛ (при заданном среднем  $\langle n \rangle$ );
- б) величина каждого из событий  $\Phi_{30}$  является «случайной» в рамках функции распределения;
- в) значения параметров энергетического спектра протонов (спектральный индекс  $\gamma$  и индекс завала спектра  $\alpha$ ) для каждого события при случайной величине  $\Phi_{30}$  также являются «случайными» и заданы средними значениями и их статистическими отклонениями.

Б.2 Расчет флюенсов и пиковых потоков протонов, превышение которых ожидается с заданной вероятностью  $\Psi$ , для условий заданного уровня солнечной активности  $\langle W \rangle$  на временном интервале  $T$ :

1. Вычисляют основной параметр модели — среднее ожидаемое количество событий СКЛ  $\Phi_{30} \geq 10^5 \text{ см}^{-2}$   $\langle n \rangle$  по формулам (5) или (6) настоящего стандарта.

2. Вычисляют флюенсы или пиковые потоки для  $N$  случайных вариантов полета при рекомендуемом значении  $N \geq 30000$ .

Б.2.1 Для каждого варианта вычисляют случайное количество событий СКЛ  $n$ .

Если  $\langle n \rangle$  мало ( $\langle n \rangle < 8$ ), то для определения случайного числа событий следует пользоваться распределением Пуассона, для которого при средней величине  $\langle n \rangle$  вероятность наблюдать  $n$  событий равна

$$p(n, \langle n \rangle) = \frac{\exp(-\langle n \rangle) \langle n \rangle^n}{n!}, \tag{Б.1}$$

т. е. вычисляют случайные значения флюенсов и пиковых потоков для  $K_n = N \cdot p(n, \langle n \rangle)$  вариантов полета с количеством событий  $n = 0, 1, 2, 3$  и т. д.

Если  $\langle n \rangle \geq 8$ , то для определения  $n$  (случайного числа событий для каждого очередного варианта полета) следует пользоваться методом Монте-Карло согласно нормальному (Гауссову) распределению

$$p(n, \langle n \rangle) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\langle n \rangle - n)^2}{2\sigma^2}\right). \tag{Б.2}$$

Б.2.2 Вычисляют случайную величину  $\Phi_{30}^{(i)}$  каждого события  $i$  ( $10^5 \leq \Phi_{30} \leq 10^{11}$ ) протонов/см<sup>2</sup> методом Монте-Карло из распределения

$$\frac{dN}{d\Phi_{30}} = \text{const} \cdot \frac{\Phi_{30}^{-1,41}}{\exp\left(\frac{\Phi_{30}}{3,0 \cdot 10^9}\right)}. \quad (\text{Б.3})$$

Б.2.3 Для каждого события  $i$  величиной  $\Phi_{30}^{(i)}$  вычисляют «случайные» параметры дифференциальных энергетических спектров (спектральный индекс  $\gamma_0$  и индекс завала спектра  $\alpha$ ), заданных в виде степенных спектров по жесткости с завалом в области низких энергий ( $E < 30$  МэВ)

$$F(E) dE = F(R) \frac{dR}{dE} dE = C \left(\frac{R}{239}\right)^{-\gamma} \frac{dR}{dE} dE = C \left(\frac{R}{239}\right)^{-\gamma} \frac{dE}{\beta}, \quad (\text{Б.4})$$

при  $E \geq 30$  МэВ  $\gamma = \gamma_0$ ,

а при  $E < 30$  МэВ  $\gamma = \gamma_0 \left(\frac{E}{30}\right)^{\alpha}$ ,

где  $R$  и  $\beta$  — жесткость и относительная скорость протона, определяемая по формулам (3) и (4) настоящего стандарта.

За исключением спектральных коэффициентов  $C$ , величины  $\gamma_0$  и  $\alpha$  как для дифференциальных энергетических спектров флюенсов ( $\Phi$ ), так и для пиковых потоков ( $f$ ) протонов принимают одинаковыми.

Б.2.3.1 Используя значение события  $\Phi_{30}^{(i)}$ , определяют среднее значение спектрального индекса дифференциального энергетического спектра протонов  $\langle \lambda_0^{(i)} \rangle$

$$\langle \lambda_0^{(i)} \rangle = 6,3 \quad \text{при } \Phi_{30}^{(i)} < 10^6 \text{ протонов/см}^2 \quad (\text{Б.5a})$$

$$\langle \lambda_0^{(i)} \rangle = 5,5 - 0,8 \sin \left[ \frac{\pi}{2} \left( \log \left( \Phi_{30}^{(i)} \right) - 7 \right) \right] \quad \text{при } 10^6 \leq \Phi_{30}^{(i)} \leq 10^8 \text{ протонов/см}^2 \quad (\text{Б.5b})$$

$$\langle \lambda_0^{(i)} \rangle = 4,7 \quad \text{при } \Phi_{30}^{(i)} > 10^8 \text{ протонов/см}^2. \quad (\text{Б.5c})$$

Находят стандартное отклонение логнормального распределения

$$\sigma_{\lg \gamma} = 0,023 \langle \gamma_0 \rangle \quad (\text{Б.6})$$

Методом Монте-Карло находят случайную величину спектрального индекса энергетического спектра флюенсов протонов в событии  $\lambda_0^{(i)}$  в предположении, что случайные величины спектрального индекса распределены логнормально вокруг среднего  $\langle \lambda_0^{(i)} \rangle$ .

Б.2.3.2 Используя величину события  $\Phi_{30}^{(i)}$  и спектрального индекса  $\lambda_0^{(i)}$ , определяют средний индекс завала  $\langle \alpha^{(i)} \rangle$

$$\langle \alpha^{(i)} \rangle = 0,16 \left( \frac{\Phi_{30}^{(i)}}{8,6 \cdot 10^6} \right)^{0,18} \cdot \left( \frac{\gamma_0^{(i)}}{4,5} \right)^{0,75}. \quad (\text{Б.7})$$

Стандартное отклонение индекса завала спектра протонов  $\sigma_{\lg \alpha}^{(i)}$  вычисляют по формуле

$$\sigma_{\lg \alpha}^{(i)} = 0,2 \cdot B \left( \frac{4,5}{\gamma_0^{(i)}} \right)^{1,42}, \quad (\text{Б.8})$$

где  $B = 1$  при  $\Phi_{30}^{(i)} \geq 3 \cdot 10^7$  протонов/см<sup>2</sup>

и  $B = \left( \frac{3 \cdot 10^7}{\Phi_{30}^{(i)}} \right)^{0,16}$  при  $\Phi_{30}^{(i)} < 3 \cdot 10^7$  протонов/см<sup>2</sup>.

Далее методом Монте-Карло находят случайное значение индекса завала  $\alpha^{(i)}$  дифференциального энергетического спектра протонов из логнормального распределения случайных величин;

Б.2.3.3 Спектральный коэффициент дифференциального энергетического спектра флюенсов протонов  $C_{\Phi}^{(i)}$  вычисляют по формуле

$$C_{\Phi}^{(i)} = \frac{\Phi_{30}^{(i)}}{\int_{30}^{\infty} \left(\frac{239}{R}\right)^{\gamma_0^{(i)}} \frac{dE}{\beta}} \text{ протонов / (см}^2 \cdot \text{МэВ)}. \quad (\text{Б.9})$$

Б.2.3.4 Среднее значение спектрального коэффициента дифференциального энергетического спектра пиковых потоков протонов  $C_f^{(i)}$  вычисляют по формуле

$$\langle C_f^{(i)} \rangle = 6,0 \cdot 10^{-9} \left( \Phi_{30}^{(i)} \right)^{1,08} \text{ протонов / (см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ)}. \quad (\text{Б.10})$$

Стандартное отклонение для логнормального распределения спектральных коэффициентов пиковых потоков протонов принимают равным

$$\sigma_{\lg C_f^{(i)}} = 0,5. \quad (\text{Б.11})$$

Далее методом Монте-Карло вычисляют случайное значение спектрального коэффициента дифференциального энергетического спектра пикового потока протонов  $C_f^{(i)}$ , следуя логнормальному распределению.

Б.2.4 По формулам (Б.4) и (Б.5) вычисляют энергетические спектры флюенсов или пиковых потоков для каждого случайного события.

Б.2.4.1 Параметры  $C_{\Phi}^{(i)}$ ,  $\gamma^{(i)}$ ,  $\alpha^{(i)}$  используют для вычисления дифференциального энергетического спектра флюенсов протонов СКЛ  $\Phi^{(i)}(E)$  для случайного события СКЛ  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ ).

Б.2.4.2 Параметры  $C_f^{(i)}$ ,  $\gamma^{(i)}$ ,  $\alpha^{(i)}$  используют для вычисления дифференциального энергетического спектра пиковых потоков протонов СКЛ  $f^{(i)}(E)$  для случайного события СКЛ  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ ).

Б.2.4.3 Для каждого события СКЛ вычисляют интегральные энергетические спектры флюенсов  $\Phi^{(i)}(\geq E)$  и пиковых потоков  $f^{(i)}(\geq E)$

$$\Phi^{(i)}(\geq E) = \int_E^{\infty} \Phi^{(i)}(E) dE \quad f^{(i)}(\geq E) = \int_E^{\infty} f^{(i)}(E) dE. \quad (\text{Б.12})$$

Б.2.5 Определив энергетические спектры для каждого из  $n$  случайных событий, вычисляют энергетические спектры флюенсов и пиковых потоков для каждого варианта полета.

Б.2.5.1 Вычисляют интегральный энергетический спектр флюенсов протонов  $\Phi_m(\geq E)$  для каждого варианта полета  $m$  ( $1 \leq m \leq N$ ), суммируя флюенсы  $\Phi^{(i)}(\geq E)$  всех  $n$  событий

$$\Phi_m(\geq E) = \sum_i^n \Phi^{(i)}(\geq E). \quad (\text{Б.13})$$

Б.2.5.2 Интегральный энергетический спектр пиковых потоков протонов для каждого варианта полета  $f(\geq E)$  находят, выбирая из пиковых потоков  $n$  событий максимальные потоки при каждой энергии  $E$ :

$$f(\geq E) \in \cdot \max [f^{(i)}(\geq E)] \cdot. \quad (\text{Б.14})$$

Б.3 Определяют энергетические спектры флюенсов и пиковых потоков протонов для всех  $N$  вариантов полета и вероятности иметь флюенс или пиковый поток протонов больше заданной энергии  $E$  в выбранном интервале  $\Phi_m(\geq E) \div \Phi_{m+1}(\geq E)$ , или  $f_m(\geq E) \div f_{m+1}(\geq E)$ , или интегральные вероятности иметь флюенс или пиковый поток протонов больше заданной энергии  $E$  выше заданного значения флюенса  $\Phi_m(\geq E)$  или пикового потока  $f_m(\geq E)$ .

Б.3.1 Для определения плотности вероятности находят относительное количество вариантов  $s_m$  из  $N$  вариантов полета, флюенс или пиковый поток которых для протонов энергии больше  $E$  находится в интервалах  $\Delta\Phi_m(\geq E)$  и  $\Delta f_m(\geq E)$  соответственно:

$$\Delta\Phi_m(\geq E) = \Phi_{m+1}(\geq E) - \Phi_m(\geq E) \quad \text{или} \quad \Delta f_m(\geq E) = f_{m+1}(\geq E) - f_m(\geq E) \quad (\text{Б.15})$$

$$\Delta\Psi(\Phi_m) = s_m/N \quad \text{или} \quad \Delta\Psi(f_m) = s_m/N. \quad (\text{Б.16})$$

или соответствующие плотности вероятности флюенсов  $\frac{d\Psi}{d\Phi(\geq E)}$ ,

или пиковых потоков  $\frac{d\Psi}{df(\geq E)}$ :

$$\frac{d\Psi}{d\Phi(\geq E)} = \frac{s}{N\Delta\Phi(\geq E)} \quad \text{или} \quad \frac{d\Psi}{df(\geq E)} = \frac{s}{N\Delta f(\geq E)}. \quad (\text{Б.17})$$

Формула (Б.17) является вероятностью иметь при заданных условиях полета флюенс или пиковый поток протонов с энергией больше  $E$  в интервале (Б.15).

Б.3.2 Интегрированием (Б.17) получим часто используемую вероятность наблюдать при данных условиях полета протоны с энергией больше  $E$  с флюенсом или пиковым потоком больше  $\Phi (\geq E) - \Psi [\geq \Phi (\geq E)]$  или  $f (\geq E) - \Psi [\geq f (\geq E)]$  соответственно

$$\Psi [\geq \Phi (\geq E)] = \int_{\Phi}^{\infty} \frac{d\Psi}{d\Phi} \cdot d\Phi \quad \text{или} \quad \Psi [\geq f (\geq E)] = \int_f^{\infty} \frac{d\Psi}{df} \cdot df. \tag{Б.18}$$

Распределения вероятности  $\Psi [\geq \Phi (\geq E)]$  или  $\Psi [\geq f (\geq E)]$  служат для определения флюенсов  $\Phi (\geq E)$  или пиковых потоков  $f (\geq E)$  протонов с энергией больше  $E$  для данного  $\langle n \rangle$ . Другими словами, большие, чем  $\Phi (\geq E)$  и  $f (\geq E)$ , флюенсы и пиковые потоки будут наблюдаться с вероятностью  $\Psi$ .

Б.4 Вычисляют дифференциальные энергетические спектры протонов для среднего ожидаемого числа событий  $\langle n \rangle$  и вероятности  $\Psi$ .

Для решения прикладных задач удобно пользоваться не семействами вероятностей  $\Psi [\geq \Phi (\geq E)]$  или  $\Psi [\geq f (\geq E)]$  для потоков протонов разных энергий, а энергетическими спектрами, относящимися к заданным  $\langle n \rangle$  и  $\Psi$ . Такие энергетические спектры определяются в два этапа.

Б.4.1 Для заданной вероятности  $\Psi [\geq \Phi (\geq E)] = \text{const}$  или  $\Psi [\geq f (\geq E)] = \text{const}$  из семейства кривых (Б.3.2) следует найти значения флюенсов  $\Phi_E$  или пиковых потоков  $f_E$  для некоторой последовательности значений энергии. Совокупности величин  $\Phi_E$  и  $f_E$  образуют интегральный энергетический спектр для заданных  $\Psi$  и  $\langle n \rangle$ .

Б.4.2 Далее вычисляют параметры  $D$ ,  $\lambda$  и  $\delta$  дифференциальных спектров  $\Phi (E)$  и  $F (E)$ , заданных в форме, приведенной в стандарте (формулы 1 и 2), которые после интегрирования аппроксимируют значения  $\Phi (\geq E)$  и  $f (\geq E)$ .

Дифференциальные энергетические спектры вычисляют по формуле (Б.4).

ПРИЛОЖЕНИЕ В  
(справочное)

Относительные ошибки расчета флюенса и пикового потока протонов

Таблица В.1 — Относительные ошибки расчета флюенса протонов

| $\langle n \rangle$ | Интегральная вероятность $\Psi$ |       |                |                |                |                |                |                |
|---------------------|---------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                     | 0,9                             | 0,842 | 0,5            | 0,158          | 0,1            | 0,05           | 0,0316         | 0,010          |
| 1                   | —                               | —     | <0,20          | <0,20          | <0,2           | <0,20          | 0,21           | 0,33           |
| 2                   | —                               | —     | <0,20          | <0,20          | <0,20          | 0,20           | 0,27           | 0,36           |
| 4                   | <0,20                           | <0,20 | 0,20           | 0,22           | 0,24           | 0,28           | 0,34           | 0,40           |
| 8                   | <0,20                           | <0,20 | 0,20           | 0,24           | 0,28           | 0,33           | 0,39           | 0,47           |
| 16                  | <0,20                           | <0,20 | 0,20           | 0,27           | 0,32           | 0,36           | 0,41           | 0,49           |
| 32                  | <0,20                           | 0,20  | 0,22           | 0,31           | 0,36           | 0,39           | 0,44           | 0,51           |
| 64                  | <0,20                           | 0,21  | 0,25           | 0,34           | 0,38           | 0,42           | 0,47           | 0,52           |
| 128                 | <0,20                           | 0,22  | 0,28           | 0,36           | 0,40           | 0,43           | 0,45           | 0,48<br>(0,54) |
| 256                 | 0,20                            | 0,24  | 0,33           | 0,38           | 0,42<br>(0,48) | 0,42<br>(0,50) | 0,42<br>(0,52) | 0,44<br>(0,58) |
| 512                 | 0,21                            | 0,28  | 0,32<br>(0,38) | 0,37<br>(0,44) | 0,39<br>(0,47) | 0,43<br>(0,49) | 0,45<br>(0,55) | 0,43<br>(0,58) |

Т а б л и ц а В.2 — Относительные ошибки расчета пиковых потоков протонов

| <n> | Интегральная вероятность $\Psi$ |       |       |       |                |                |                |                |
|-----|---------------------------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|     | 0,9                             | 0,842 | 0,5   | 0,158 | 0,1            | 0,05           | 0,0316         | 0,010          |
| 1   | —                               | —     | <0,20 | 0,20  | 0,26           | 0,29           | 0,33           | 0,40           |
| 2   | —                               | —     | 0,20  | 0,22  | 0,31           | 0,34           | 0,38           | 0,44           |
| 4   | 0,20                            | 0,20  | 0,25  | 0,25  | 0,35           | 0,38           | 0,43           | 0,48           |
| 8   | 0,20                            | 0,21  | 0,31  | 0,35  | 0,44           | 0,47           | 0,53           | 0,56           |
| 16  | 0,22                            | 0,24  | 0,33  | 0,43  | 0,47           | 0,47           | 0,48           | 0,58           |
| 32  | 0,23                            | 0,26  | 0,34  | 0,42  | 0,46           | 0,48           | 0,51           | 0,56           |
| 64  | 0,27                            | 0,30  | 0,35  | 0,44  | 0,47           | 0,49           | 0,51           | 0,55           |
| 128 | 0,27                            | 0,29  | 0,36  | 0,43  | 0,46           | 0,48           | 0,49           | 0,53           |
| 256 | 0,26                            | 0,27  | 0,35  | 0,42  | 0,46<br>(0,51) | 0,47<br>(0,53) | 0,49<br>(0,56) | 0,52<br>(0,60) |
| 512 | 0,32                            | 0,34  | 0,38  | 0,45  | 0,47<br>(0,53) | 0,48<br>(0,55) | 0,49<br>(0,59) | 0,51<br>(0,63) |

УДК 629.78:006.354

ОКС 17.240

T27

ОКСТУ 0080

Ключевые слова: околоземное космическое пространство, солнечные космические лучи, уровень солнечной активности, флюенс протонов, пиковый поток протонов

Редактор *Р.С. Федорова*  
Технический редактор *В.Н. Прусакова*  
Корректор *В.И. Варенцова*  
Компьютерная верстка *В.И. Грищенко*

Изд. лиц. № 02354 от 14.07.2000. Сдано в набор 18.05.2001. Подписано в печать 20.06.2001. Усл. печ. л. 1,40.  
Уч.-изд. л. 1,10. Тираж 180 экз. С 1291. Зак. 633.

ИПК Издательство стандартов, 107076, Москва, Колодезный пер., 14.  
Набрано в Издательстве на ПЭВМ  
Филиал ИПК Издательство стандартов — тип. “Московский печатник”, 103062, Москва, Лялин пер., 6.  
Плр № 080102