

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова

РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Под редакцией
профессора М.И. Панасюка

Москва

2006

ББК 22.38я7
УДК 551.5:539.104 (078)

Авторский коллектив

М.И. Панасюк, Н.Н. Калмыков, А.С. Ковтюх, Н.В. Кузнецов,
Г.В. Куликов, В.Г. Курт, Р.А. Ныммик, Т.М. Роганова

Научный редактор профессор М.И. Панасюк

Редакция благодарит А.С. Ковтюха за помощь в работе над пособием

Р 15 **Радиационные условия в космическом пространстве: Учебное пособие.** Под ред. М.И. Панасюка. – М.: Библион – Русская книга, 2006. – 132 с.

ISBN 978-5-902005-06-3

В учебном пособии представлены основные сведения о радиационных полях в околоземном космическом пространстве. Авторский коллектив ученых НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына изложил современные знания о космической радиации, включая как физическое описание явлений, так и изложение современных моделей радиационных полей, предназначенных для инженерных расчетов, которые связаны с конструированием космических аппаратов и обеспечением безопасности пилотируемых полетов.

Книга представляет собой учебное пособие, предназначенное для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений, специализирующихся в области космических исследований. Она может оказаться полезной и для инженеров космической отрасли промышленности, непосредственной сферой деятельности которых является создание космических аппаратов и систем.

Книга создана в рамках реализации национального проекта «Формирование системы инновационного образования МГУ им. М.В. Ломоносова».

978-5-902005-06-3
5-902005-06-X

© Научно-исследовательский институт
ядерной физики МГУ, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ	9
<i>А.С. Ковтюх, М.И. Панасюк</i>	
2.1. Введение	9
2.2. Кинематика частиц радиационных поясов	10
2.3. Феноменология радиационных поясов Земли	14
2.3.1. Радиационные пояса протонов и ионов с $Z > 1$	14
2.3.2. Радиационные пояса электронов	19
2.4. Основные физические процессы в радиационных поясах Земли и их моделирование	23
2.4.1. Источники частиц	23
2.4.2. Механизмы потерь частиц	23
2.4.3. Радиальная диффузия частиц	27
2.4.4. Адиабатические вариации поясов во время бурь	32
2.5. Инвариантные параметры ионных радиационных поясов	34
2.6. Проблема динамики пояса релятивистских электронов	38
2.7. Заключение	41
3. СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ	46
<i>В.Г. Курт</i>	
3.1. Введение	46
3.2. Выход частиц в межпланетное пространство	47
3.3. Распространение частиц СКЛ в межпланетном пространстве	50
3.4. Состав СКЛ, распределение СКЛ по энергиям (энергетические спектры частиц)	56
3.5. Космическая погода и СКЛ	61
3.5.1. Распределение протонных возрастных по величине	65
3.5.2. Временная зависимость появления СПС	66
3.5.3. Мощность вспышки и вероятность протонного события	67
3.5.4. Гелиоширотная и гелиодолготная зависимости регистрации СКЛ	68
3.6. Заключение	70
4. ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ	72
<i>Н.Н. Калмыков, Г.В. Куликов, Т.М. Роганова</i>	

5. МОДЕЛЬ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ	78
<i>Р.А. Ныммик</i>	
5.1. Введение	78
5.2. Общий принцип построения модели	81
5.3. Спектры частиц в ближнем межзвездном пространстве и общий вид модуляционной функции	81
5.4. Структура модуляционной функции	84
5.4.1. Модуляционный потенциал	85
5.4.2. Эффект модуляции зависимых от знака заряда дрейфов	86
5.5. Потоки частиц ГКЛ вне пределов орбиты Земли	88
5.6. Точность модели	88
5.7. Реализация расчетной модели	89
6. МОДЕЛЬ ПИКОВЫХ ПОТОКОВ И ФЛЮЕНСОВ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ	92
<i>Р.А. Ныммик</i>	
6.1. Введение	92
6.2. Общие характеристики модели	94
6.2.1. Ожидаемое за заданное время количество событий СКЛ	94
6.2.2. Функции распределения событий СКЛ по их величине	95
6.2.3. Энергетические спектры событий СКЛ	98
6.2.4. Случайные потоки частиц в заданный период времени (вероятностный прогноз флюенсов и пиковых потоков протонов СКЛ)	101
6.2.5. Некоторые примеры применения модели	102
6.3. Потоки частиц СКЛ вне пределов орбиты Земли	105
6.4. Приложения	106
7. РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ НА ОРБИТАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	111
<i>Н.В. Кузнецов</i>	
7.1. Характеристики радиационного воздействия	111
7.2. Модели и моделирование радиационных условий	114
7.2.1. О точности расчетных моделей	114
7.2.2. Реализация модельных расчетов	116
7.3. Радиационные условия на орбитах и факторы космического полета	118
7.3.1. Влияние солнечной активности	118
7.3.2. Вековой дрейф магнитного поля Земли	121
7.3.3. Геомагнитная активность	122
7.3.4. Движение космического аппарата по орбите	123
7.3.5. Радиационные условия за защитными экранами	124
7.4. Характеристики радиационного воздействия на орбитах космических аппаратов	125
7.4.1. Спектры линейной передачи энергии	125
7.4.2. Поглощенная доза	126
7.4.3. Частота одиночных сбоев в микросхемах памяти	127
7.5. Заключение	128
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	130

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, потоки заряженных частиц высокой энергии (от десятков кэВ и выше), существующие в космическом пространстве, представляют серьезную опасность для нормального функционирования космических аппаратов (КА) – в первую очередь для радиоэлектронной аппаратуры и поверхностных конструктивных элементов, – а также для здоровья космонавтов в пилотируемых полетах.

Радиационные поля в космосе разнообразны по своей природе. Их происхождение связано с различными источниками – звездами, включая наше Солнце, а также с атмосферой и ионосферой Земли. Диапазон энергий корпускулярной радиации в ближнем космосе велик – от частиц с энергиями горячей плазмы – десятки килоэлектронвольт ($1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}$) до десятков-сотен гигаэлектронвольт ($1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$). Химический состав этих частиц также разнообразен и зависит от их источников и процессов распространения и ускорения в среде.

В околоземном космическом пространстве можно выделить как основные три радиационных поля (рис. 1.1): радиационные пояса Земли (РПЗ), галактические космические лучи (ГКЛ) и солнечные космические лучи (СКЛ). Эти радиационные компоненты состоят из различных частиц, среди которых:

- ♦ протоны и ядра химических элементов ГКЛ, потоки которых проникают в Солнечную систему из нашей и других галактик;
- ♦ протоны, электроны и ионы химических элементов СКЛ, которые эпизодически появляются в Солнечной системе в результате хромосферных вспышек на Солнце;

5. МОДЕЛЬ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

5.1. Введение

В практике планирования полетов и конструирования космических аппаратов, орбитальных и межпланетных станций особое место занимают вопросы радиационного воздействия высокоэнергетических частиц космической радиации – галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ), а на околоземных орбитах – частиц радиационных поясов Земли (РПЗ).

Частицы ГКЛ образуют в межпланетном пространстве медленно меняющееся с изменением солнечной активности (СА) радиационное поле, которое лишь изредка и на короткое время (до суток) уменьшается (до 50% в межпланетном пространстве) вследствие Форбуш-эффектов. В соответствии со своей жесткостью частицы ГКЛ проникают также в околоземное пространство на орбиты спутников Земли.

Разработанные на начальном этапе исследований космических лучей эмпирические модели ГКЛ – ГОСТ 25645.(122, 123, 124, 125)-85; ГОСТ 25645.144-88; ГОСТ 25645.150-90 и CREME-81 (Adams et al., 1981), в основу которых были заложены величины потоков частиц во время максимума и минимума СА, а также синусоидальная зависимость потоков частиц с 11-летним периодом СА, к настоящему времени полностью исчерпали себя. С другой стороны, разработанные к настоящему времени транспортные модели, описывающие солнечную модуляцию частиц ГКЛ, проникающих из галактического космиче-

ского пространства в гелиосферу (Adams et al., 1991; Badhwar and O'Neill, 1992, 1994, 1996; Davis et al., 2000, 2001a, b), по большей части в своей основе в качестве исходного параметра используют изменяющуюся с СА величину диффузионного коэффициента, величина которого вычисляется из наблюдательных данных, как правило, относящихся к нейтронным мониторам (Climax). Это означает, что такие модели позволяют описать уже зарегистрированные потоки частиц и не обладают способностью прогнозировать поведение потоков в будущем. Более того, авторы этих моделей демонстрируют точность своих моделей на экспериментальных данных, относящихся к минимуму СА, и избегают это демонстрировать на данных, относящихся к максимуму СА, когда результаты модельных расчетов намного хуже согласуются с экспериментом. Два перечисленных обстоятельства: отсутствие возможности прогноза и неудовлетворительное описание моделью экспериментальных данных при максимуме СА – являются причиной того, что в качестве международного стандарта была принята не теоретическая, а полуэмпирическая модель ГКЛ. Эта модель была в течение ряда лет разработана в МГУ (Суслов и Ныммик, 1988, 1989; Suslov and Nymmik, 1989; Nymmik and Suslov 1989, 1995, 1996; ГОСТ 25645.150-90; Ныммик и др., 1991; Nymmik et al., 1992, 1994, 1995; Beliaev et al., 1996; Nymmik, 1998a, b, 1999a, b, c; ISO 15390-2004). Следует особо подчеркнуть, что в той части модели CREME-96 (Tylka et al., 1997), которая относится к ГКЛ, модель является однозначной копией работы (Nymmik et al., 1995). Все перечисленные публикации в разной степени раскрывают методологию одной и той же полуэмпирической модели в ее развитии, разные варианты которой имеют и некоторые различия.

Основное различие вариантов модели имеет в основе спорную точку зрения о природе низкоэнергетической компоненты космических лучей. Под этим определением мы имеем в виду потоки частиц с жесткостью $R < 0,25A/Z$ ГВ (A – массовое число; Z – заряд ядра), общая величина которых растет с усилением СА и уменьшается с ее ослаблением. Потоки этих частиц резко возрастают с уменьшением энергии частиц. В ГОСТ 25645.150-90 эти потоки были включены в состав модели ГКЛ, а в стандарте ISO-15390 (2002) и CREME-96 (Tylka et al., 1997) из модели ГКЛ они исключены. Основанием является то, что данные частицы имеют солнечное происхождение и их динамика противоположна изменению величины потоков ГКЛ в их зависимости от СА.

Низкоэнергетическая компонента, очевидно, является фоновым излучением большого числа очень малых событий СКЛ, описание которых требует других методов, не тех, которые применяются в вероятностной модели СКЛ. Поскольку модели, описывающие вариации низкоэнергетических частиц, пока не разработаны, в случаях, когда необходимо оценить радиационные эффекты в поверхностном слое вещества ($d < 1$ мм), мы допускаем использование для описания потоков этих частиц модели, заложенной в основу ГОСТ 25645.150-90.

Модель предназначена для количественного описания потоков частиц ГКЛ на орбите Земли за ее магнитосферой в ходе модуляции, обусловленной 11-летней вариацией солнечной активности и 22-летним циклом изменения крупномасштабного магнитного поля Солнца.

Моделью описываются потоки частиц с зарядом от 1 до 92 (включая электроны) в диапазоне энергии от 5 до 10^5 МэВ-нуклон⁻¹.

В модели обобщены имеющиеся современные экспериментальные данные о потоках частиц на орбите Земли в их зависимости:

- ♦ от уровня солнечной активности, определяемого как усредненное по 12 месяцам число солнечных пятен (число Вольфа);
- ♦ от величины и направления крупномасштабного магнитного поля гелиосферы (отождествляемого как полярное магнитное поле Солнца).

В модели учтены эффекты запаздывания изменения потоков частиц при изменении уровня солнечной активности, как зависящие от жесткости частиц, так и обусловленные разницей путей (и времени) диффузии частиц при разном направлении гелиосферного магнитного поля.

Приведены формулы и численные параметры, позволяющие проводить расчеты потоков частиц для периода с 1954 до 2010 гг.

Точность долгосрочного прогноза величин потоков частиц зависит главным образом от точности прогноза числа солнечных пятен на прогнозируемый период солнечной активности.

В основе модели лежат принципы полуэмпирической динамической модели потоков частиц ГКЛ, целиком разработанной в НИИЯФ МГУ (публикации перечислены выше). Один из вариантов этой модели был утвержден в виде ГОСТ 25645.150-90.

Одна из последних версий модели утверждена международным стандартом ISO-15390. Нижеприведенное описание модели отражает как раз методологию этого стандарта.

5.2. Общий принцип построения модели

Модель устанавливает величину потоков $F_{\bar{w},n}^{(i)}(E,t)$, [частиц·м⁻²·с⁻¹·ср⁻¹·(МэВ/нуклон)⁻¹], частиц сорта i на орбите Земли за ее магнитосферой в n -ом 11-летнем цикле солнечной активности при усредненном числе Вольфа \bar{W} , исходя из величины потоков частиц в ближнем межзвездном пространстве (БМП) – $F_0^{(i)}(E)$:

$$F_{\bar{w},n}^{(i)}(E,t) = \Psi_{\bar{w},n}(R,t) F_0^{(i)}(E), \quad (5.1)$$

где $\Psi_{\bar{w},n}(R,t)$ – единая для всех частиц полуэмпирическая модуляционная функция, зависящая от магнитной жесткости частиц R , уровня солнечной активности и четности–нечетности солнечного цикла. Вид модуляционной функции определен из требования наиболее точного описания имеющейся совокупности экспериментальных данных о потоках ядер ГКЛ на орбите Земли. Одновременно вид используемой модуляционной функции позволяет описывать и изменения потоков электронов на орбите Земли, исходя из известной формы энергетического спектра электронов в Галактике, определенной по радиоастрономическим данным согласно (Webber et al., 1980):

$$\gamma_e = 3,0 - 1,4 \exp(-R/R_e), \quad (5.2)$$

где $R_e = 1$ ГВ.

5.3. Спектры частиц в БМП и общий вид модуляционной функции

Энергетические спектры всех частиц (кроме электронов) в БМП в модели представлены через жесткостные спектры $\Phi_0^{(i)}(R)$ частиц в виде:

$$F_0^{(i)}(E) dE = \Phi_0^{(i)}(R) \frac{dR}{dE} dE = \frac{C^{(i)} \beta^{\alpha_i}}{R^{\gamma_i}} \frac{dE}{\beta}, \quad (5.3)$$

где $C^{(i)}$, α_i , γ_i – постоянные, приведенные в стандарте. Указанная единая форма представления данных о потоках частиц БМП (при определенных ниже параметрах $C^{(i)}$, α_i и γ_i) не расходится с резуль-

татами большинства исследований, в которых, однако, не ставился вопрос аппроксимации спектра аналитической функцией энергии-жесткости.

Из выражения (5.3) видно, что при релятивистских энергиях ($\beta = 1$) коэффициент $C^{(i)}$ и спектральный индекс γ_i однозначно определяются из экспериментальных данных.

Для модуляционной функции мы нашли следующее функциональное выражение, которое вместе со спектром (5.3) хорошо описывает энергетические спектры частиц при любом уровне солнечной активности ($\bar{W}(\Delta T)$ с учетом запаздывания ΔT изменения потока частиц относительно хода СА) и направления и величины общего гелиосферного магнитного поля δ :

$$\Psi_{\bar{W},n}(R,t) = \left(\frac{R}{R + R_0[\bar{W}(\Delta T)]} \right)^{\Delta \pm \delta} \quad (5.4)$$

Условно мы имеем три энергетических спектра для каждого сорта частиц для трех экстремальных состояний СА: максимум, четный (+) и нечетный (-) минимумы. Легко показать, что, используя эти спектры для протонов, ядер гелия и электронов, мы получаем 9 уравнений – по 3 уравнения для каждого сорта частиц i :

$$\begin{aligned} F_i^{\text{min-}}(R) &= C^{(i)} \frac{\beta^{\alpha_i}}{R^{\gamma_i}} \left(\frac{R}{R_0^{\text{min}} + R} \right)^{\Delta + g\delta} \\ F_i^{\text{min+}}(R) &= C^{(i)} \frac{\beta^{\alpha_i}}{R^{\gamma_i}} \left(\frac{R}{R_0^{\text{min}} + R} \right)^{\Delta - g\delta} \\ F_i^{\text{max}}(R) &= C^{(i)} \frac{\beta^{\alpha_i}}{R^{\gamma_i}} \left(\frac{R}{R_0^{\text{max}} + R} \right)^{\Delta} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Из девяти уравнений с избыточной точностью определяются некоторые из основных параметров модели – $R^{\text{max}}, R_0^{\text{min}} = 0,375, \alpha_{\text{прот}} = 2,85, \alpha_{\text{He}} = 3,12, \Delta = 5,5$ и $\delta = 1,13$.

На рис. 5.1 приведен вычисленный нами энергетический спектр протонов в БМП, который совпадает или близок к спектрам, определенным в работах (Garcia-Munoz et al., 1991; Webber et al., 1987), но значительно отличается от спектра, предложенного в работе (Badhwar and O'Neil, 1992) (на рис. 5.1 не приведен).

Третий параметр энергетических спектров остальных ядер ($3 \leq Z \leq 96$) – α_i – в БМП был определен из требования, чтобы функция (5.1) описывала все экспериментальные данные о потоках частиц на орбите Земли при одинаковых параметрах модуляционной функции (5.4):

$$F_0^{(i)}(R) = \frac{F_{\bar{W},n}^{(i)}(R,t)}{\Psi_{\bar{W}(\Delta T),n}^{(i)}(R,t)} \quad (5.6)$$

При этом полученные ряды $F_0^{(i)}(R)$ данных, относящиеся к разным экспериментам, были аппроксимированы функцией (5.3) с

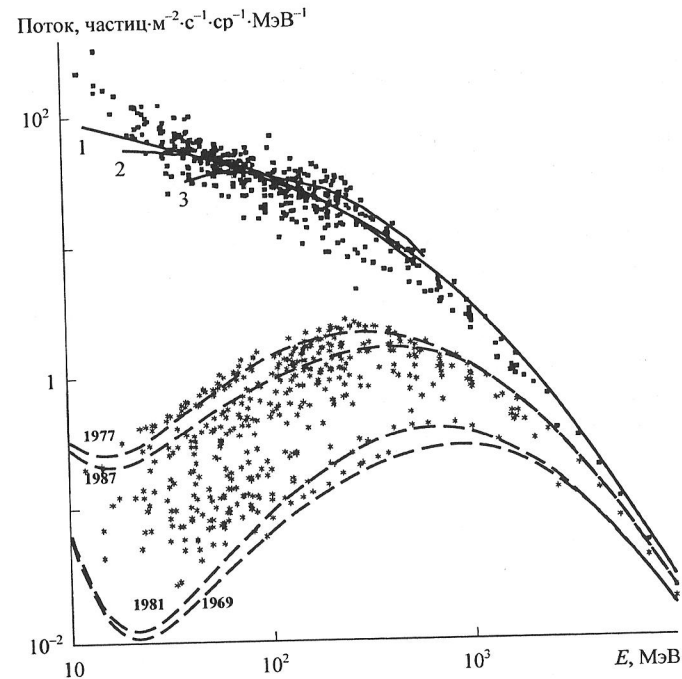


Рис. 5.1. Результаты измерения потоков протонов на орбите Земли (крестики) и пересчитанные по формуле (5.6) к условиям БМП (точки). Пунктирные линии – расчет по настоящей модели для условий 1977, 1987, 1981 и 1969 гг. для орбиты Земли. Сплошные кривые – спектры для условий БМП согласно: 1 – настоящей модели; 2 – Garcia-Munoz (1991); 3 – Webber (1987)

помощью метода наименьших квадратов, и в результате были получены параметры спектров ядер сорта i в БМП.

Нередки случаи, когда в экспериментах определяют не величины потоков ядер одного сорта, а отношения двух сортов ядер, потоки одного из которых (сорта i) известны лучше, чем потоки другого (например He, O, Si, Fe). В этом случае методом наименьших квадратов вычислялась функция:

$$\Psi_{i,j} = \frac{C^{(i)}}{C^{(j)}} R^{(\gamma_j - \gamma_i)} \beta^{(\alpha_i - \alpha_j)}, \quad (5.7)$$

с помощью которой определялись параметры спектра частиц сорта j в БМП.

5.4. Структура модуляционной функции

Вид модуляционной функции в модели не соответствует традиционной диффузионно-конвекционной модели, так как решение той модели в виде экспоненциальной зависимости от жесткости частиц при энергиях ≤ 300 МэВ·нуклон⁻¹ не позволяет согласовать имеющиеся данные о спектрах частиц в БМП и совокупность экспериментальных данных о потоках частиц на орбите Земли. Модуляционная функция в настоящей модели $\Psi_{\bar{W},n}(R,t)$ является результатом произведения двух полуэмпирических функций модуляционного параметра R_0 , одна из которых описывает результат независимых, а другая – зависимость от знака заряда частицы модуляционных эффектов:

$$\Psi_{\bar{W},n}(R,t) = \left(\frac{R}{R + R_0 [\bar{W}(t - \Delta T(R,n))]} \right)^{\Delta_i(R,t)}, \quad (5.8)$$

где

$$\Delta_i(R,t) = 5,5 + 1,13 \frac{Z_i}{|Z_i|} M(W(t),n) \varphi(Z,R,\beta), \quad (5.9)$$

а $M(W,n)$ – величина полярного (общего) магнитного поля Солнца; $\varphi(Z,R,\beta)$ – функция, описывающая зависимость величины модуляционного эффекта от знака заряда частицы.

5.4.1. Модуляционный потенциал

Модуляционный потенциал гелиосферы в модели является функцией общего уровня солнечной активности, характеризуемым усредненным (по 12 месяцам) количеством солнечных пятен \bar{W} :

$$R_0 (\bar{W}[t - \Delta T(n,R,t)]) = 0,375 + 3 \cdot 10^{-4} (\bar{W}[t - \Delta T(n,R,t)])^{1,45} \quad (5.10)$$

При этом сопоставление изменения потоков частиц различной магнитной жесткости с изменением количества солнечных пятен обнаруживает эффект меняющейся со временем и зависящей от жесткости частиц задержки $\Delta T [T - \Delta T(n,R,t)]$ (Garcia-Munoz et al., 1991; Badhwar and O'Neil, 1993; Suslov and Nymmik, 1995; Nymmik, 2000):

$$\Delta T(R,n,t) = 0,5(T_+ + T_-(R)) + 0,5(T_+ - T_-(R)) \tau(\bar{W}) [\text{мес.}], \quad (5.11)$$

где амплитуды задержки в четных циклах (n), согласно (Nymmik and Suslov, 1996), не зависят от солнечной активности:

$$T_+ = 15 [\text{мес.}]; \quad (5.12a)$$

и практически не зависят от жесткости частиц в нечетных циклах:

$$T_-(R) = 7,5 R^{-0,45} [\text{мес.}]. \quad (5.12b)$$

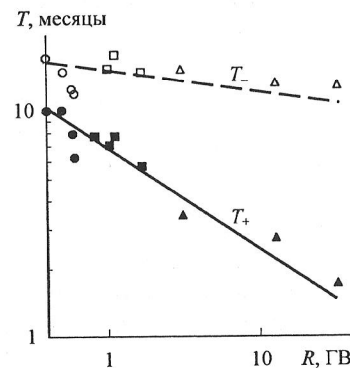


Рис. 5.2. Амплитуды запаздывания T_+ и T_- изменения потоков частиц ГКЛ по сравнению с изменением солнечной активности как функции жесткости частиц. Данные из анализа временных рядов потоков: ● – протонов, ■ – ядер гелия, ▲ – нейтронных мониторов

Эти величины заложены в стандарт ISO-15390.

Более новые экспериментальные данные о зависимости амплитуд задержки $T_+(R)$ и $T_-(R)$ от жесткости приведены на рис. 5.2 (Nytmik, 2000) – эти данные целесообразно включить в новую версию модели.

Временная составляющая величины задержки $\tau(\bar{W})$ в (5.11) выражается в виде функции количества солнечных пятен:

$$\tau(\bar{W}) [c] = (-1)^n \left(\frac{\bar{W}(t - \delta_w t) - W_n^{\min}}{W_n^{\max}} \right)^{0.2}, \quad (5.13)$$

где W_n^{\min}, W_n^{\max} есть минимальное и максимальное количество солнечных пятен в n -ом цикле солнечной активности; $\delta_w t = 16$ месяцев.

Модуляционный потенциал является единственным аргументом первого слагаемого модуляционной функции, описывающего результат процессов конвекции, адиабатического замедления и независимых от знака заряда дрейфов.

5.4.2. Эффект модуляции зависимых от знака заряда дрейфов

Величина эффекта модуляции зависимых от знака заряда частицы дрейфов определяется показателем степени модуляционной функции, который зависит от двух слагаемых:

- ♦ от величины общего магнитного поля гелиосферы (или, другими словами, величины полярного магнитного поля Солнца) – $M(\bar{W}(t), n)$ (5.14);
- ♦ является функцией скорости дрейфа частиц в магнитном поле, которая пропорциональна произведению относительной скорости частицы на ее магнитную жесткость $\phi(Z, R, \beta)$ (5.15).

Анализ временных рядов экспериментальных данных потоков частиц ГКЛ приводит к выводу, что наблюдаемые изменения потоков могут быть описаны, если изменения общего (эффективного) магнитного поля гелиосферы имеют вид следующей функции сглаженного числа солнечных пятен:

$$M(\bar{W}(t), n) = (-1)^{n-1} S \left[1 - \left(\frac{\bar{W}(t) - W_n^{\max}}{W_n^{\max} - W_n^{\min}} \right)^{2.7} \right], \quad (5.14)$$

где $S = 1$ при $t - t_n^\pm \geq 0$ (иначе $S = -1$); t_n^\pm есть момент перемены знака полярного магнитного поля в n -ом цикле солнечной активности. Действительно, именно такой и является временная зависимость полярного магнитного поля Солнца, согласно работе (Hoeksema, 1996) (см. рис. 5.3).

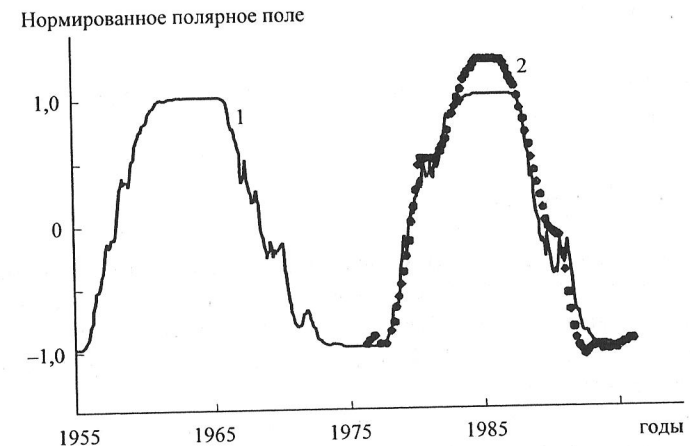


Рис. 5.3. Нормированная к единице зависимость от времени общего магнитного поля гелиосферы согласно настоящей модели (сплошная линия) и работе (Hoeksema, 1996) (кружки)

Вид функции скорости дрейфа в показателе второго слагаемого модуляционной функции (5.4) определен из условия наилучшего согласия результатов расчетов по модели с экспериментальными данными о форме спектров частиц. Он был найден в следующем виде:

$$\phi(Z, R, \beta) = \frac{R\beta}{R_0 [t - \Delta T(R, n, t)]} \exp \left(- \frac{R\beta}{R_0 [t - \Delta T(R, n, t)]} \right). \quad (5.15)$$

В итоге показатель второго слагаемого модуляционной функции имеет вид произведения сомножителей (5.14) и (5.15) с нормировочным коэффициентом 1,13 см (5.9).

5.5. Потоки частиц ГКЛ вне пределов орбиты Земли

В рамках вышеизложенной модели имеется возможность оценить потоки частиц ГКЛ и вне области орбиты Земли в межпланетном пространстве в плоскости эклиптики. Такая оценка была приведена в работе (Nymmik and Suslov, 1992). С учетом современных данных об условных размерах гелиосферы потоки частиц ГКЛ могут быть вычислены при помощи вышеприведенных формул при изменении величины потенциала согласно формуле (5.16):

$$R'_0(r, t) = R_0(t) \left(1 - \frac{r}{r_0} \right), \quad (5.16)$$

где r – расстояние от Солнца в астрономических единицах; r_0 – радиус области модуляции ($r_0 \approx 90$ а. е.).

5.6. Точность модели

Относительная погрешность модели при описании изменений потоков частиц ГКЛ с $E \geq 10$ МэВ-нуклон⁻¹ в ходе изменения параметров солнечной активности не превосходит 15%, что в 3 раза ниже погрешности для модели CREME (Adams et al., 1981), что наглядно демонстрирует рис. 5.4.

Анализ других экспериментальных рядов данных для частиц различной жесткости и природы показывает, что стандартное отклонение результатов расчета не превосходит 20%.



Рис. 5.4. Описание экспериментальных данных *IMP-8* об изменении потоков ядер гелия ГКЛ во времени (кружки) и результаты расчета потоков частиц согласно моделям: 1 – CREME (Adams et al., 1981); 2 – модель НИИЯФ

Следует отметить, что объявленная для модели ГКЛ, разработанной в работах (Davis et al., 2000, 2001a, b), точность 10% относится к случаю, когда величины потоков частиц ГКЛ определяются не по параметрам солнечной активности, а по результатам анализа уже зарегистрированного потока частиц ГКЛ (нейтронного монитора), и не относится к прогнозу потоков частиц.

5.7. Реализация расчетной модели

Расчетная модель потоков частиц ГКЛ будет выставлена для пользователей в сети ИНТЕРНЕТ на период апробации модели по адресу: <http://www.npi.msu.ru/gcrf/form.html> и допускает расчет потоков частиц на период с 1954 г. по настоящее время, а также прогноз потоков на шесть лет в соответствии с прогнозом числа солнечных пятен по справочным изданиям (ГОСТ 25645.302-83; Niehuss, 1966; [www/sec.noaa.gov](http://www.sec.noaa.gov)).

Расчетная модель ГКЛ в сети ИНТЕРНЕТ допускает расчет энергетических спектров выбираемых пользователем частиц в указанном интервале энергии в заданный период времени (год, месяц). Результат расчета выдается пользователю в виде таблицы или графика.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 25645.302-83. Расчеты баллистические искусственных спутников Земли. Методика расчета индексов солнечной активности. М.: Издательство стандартов, 1984.
- ГОСТ 25645.122, 123, 124, 125)-85. Галактические космические лучи, энергетические спектры (протоны, ядра He, группа средних ядер, группа легких, тяжелых и очень тяжелых ядер. М.: Издательство стандартов, 1985.
- ГОСТ 25645.150-90. Лучи космические галактические. Модель изменения потоков частиц. М.: Издательство стандартов, 1991.
- Ныммик Р.А. Панасюк М.И., Первая Т.И., Суслов А.А. Галактические космические лучи. Новый государственный стандарт. В сб.: Радиационная стойкость бортовой аппаратуры и элементов космических аппаратов. Томск, 9, 1991.
- Суслов А.А. и Ныммик Р.А. Крупномасштабная модуляция галактических космических лучей. Энергетические (жесткостные) спектров протонов и ядер гелия вне области модуляции. Изв. АН СССР, 52(12), с. 2330–2333, 1988.
- Суслов А.А. и Ныммик Р.А. Математическая модель, описывающая фоновые потоки частиц галактического происхождения. В сб.: Математические модели ближнего космоса. М.: Изд-во МГУ, с. 147–151, 1989.

- Adams J., Silberberg R., Tsao C.H. Cosmic Ray Effects on Microelectronics. Part I (CREME-1): The Near-Earth Particle Environment. Naval Research Laboratory Memorandum Report 4506, 1981.
- Badhwar G.D. and O'Neil P.M. An improved model of galactic cosmic radiation for space exploration missions. *Nucl. Tracks & Radiat. Meas.*, 20(3), pp. 403–410, 1992.
- Badhwar G.D. and O'Neil P.M. Time lag of twenty two year solar modulation. *Proc. 23rd ICRC (Calgary)*, 3, pp. 535–539, 1993.
- Badhwar G.D. and O'Neil. Long-term modulation of galactic cosmic radiation and its model exploration. *Adv. Space Res.*, 14, pp. 749–757, 1994.
- Badhwar G.D. and O'Neil P.M. Galactic cosmic radiation model and its applications. *Adv. Space Res.*, 17(2), pp. 7–17, 1996.
- Beliaev A.A., Nymmik R.A., Panasyuk M.I. et al. Generalization of the data on galactic cosmic ray particle fluxes in terms of dynamic model. *Radiation Measurements*, 26(3), pp. 481–486, 1966.
- Davis A.J., Mewaldt R.A., Binns W.R. et al. On the low energy decrease in Galactic Cosmic Ray secondary/primary ratios. In *ACE Workshop Palm Springs*. CA, January 2000.
- Davis A.J., Mewaldt R.A., Binns W.R. et al. The evolution of galactic cosmic ray element spectra from solar minimum to solar maximum. *ACE measurements. Proc. of ICRC*, 3971, 2001a.
- Davis A.J., Mewaldt R.A., Cohen C.M.S. et al. Solar minimum spectra of galactic cosmic rays and their implications for models of near-earth radiation environment. *JGR*, 1069A12, pp. 29979–29987, 2001b.
- Garcia-Munoz M., Pyle K.R. and Simpson J.A. Solar modulation in the heliosphere: time and space variations of anomalous He and GCR. *Proc. 21st ICRC*, 6, pp. 194–197, 1991.
- Hoeksema J.T. Solar large scale magnetic fields. From the report on 31st Scientific Assembly of COSPAR, 14–21 July, 1996.
- International Standard. ISO-15390., Space environment (natural and artificial). Galactic cosmic ray model (First edition 01.06.2004), @ ISO 2004.
- NASA Technical Report, 4759, Sept. 1996.
- Niehuss K.O. Euler H.C. and Vaughan W.W. Statistical technique for intermediate and long-range estimation of 13-month smoothed solar flux and geomagnetic index. *NASA Technical Memorandum*, p. 4759, 1996.
- Nymmik R.A. Radiation Environment Induced by Cosmic Ray Particle Fluxes in International Space Station Orbit According to Recent Solar and Galactic Cosmic Ray Models. *Adv. Space Res.*, 21(2), pp. 1689–1698, 1998a.
- Nymmik R.A. Predicting the Solar and Galactic Cosmic Ray Fluxes Influencing the Upper Atmosphere in Dependence on Solar Activity Level. *Adv. Space Res.*, 22(1), pp. 143–146, 1998b.
- Nymmik R.A. Probabilistic model for fluences and peak fluxes of solar energetic particles. *Radiation Measurements*, 30, pp. 287–296, 1999a.
- Nymmik R.A. Solar energetic particle event distribution function, as inferred from spaceborne measurements and lunar rock isotopic data. *Proc. of the 25th ICRC*, 6, pp. 268–271, 1999b.
- Nymmik R.A. Relationships among solar activity, SEP occurrence frequency, and solar energetic particle event distribution function. *Proc. of the 25th ICRC*, 6, pp. 280–283, 1999c.
- Nymmik R.A. Time lag of galactic cosmic ray modulation: conformity of general regularities and influence of particle energy spectra. *Adv. Space Res.*, 26(11), pp. 1875–1878, 2000.
- Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Pervaya T.I., and Suslov A.A. A model of galactic cosmic ray fluxes. *Nucl. Tracks & Rad. Meas.*, 20(6), p. 427, 1992.
- Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Pervaya T.I., Suslov A.A. An analytical model, describing dynamics of galactic cosmic ray heavy particles. *Adv. Space Res.*, 14, 10, pp. (10)750–(10)763, 1994.
- Nymmik R.A., Panasyuk M.I., and Suslov A.A. Galactic Cosmic Ray Flux Simulation and Prediction. *Adv. Space Res.*, 17(2), 19, 1995.
- Nymmik R.A., Suslov A.A. On the effect of some characteristics of the Sun's magnetic field on the modulation of galactic cosmic ray energy spectra. *Proc. of the XIII Consultation meeting on solar physics*, Odessa, 26 Sept.–2 Oct., 1988. *Publ. Novosibirsk, Nauka, Siberian Division*, 1, 310–312, 1989.
- Nymmik R.A., Suslov A.A. Model representations of large-scale galactic cosmic ray modulations. *Preprint INP MSU-92-5/254*, Moscow, 1992.
- Nymmik R.A., Suslov A.A. Characteristics of Galactic cosmic ray flux lag times in the course of solar modulation. *Adv. Space Res.*, 16(9), pp. 217–220, 1995.
- Nymmik R.A. and Suslov A.A. Some trends in perfecting the dynamic models of cosmic ray modulation. *Radiation Measurements*, 26(3), pp. 477–480, 1996.
- Solar-Geophysical Data. *Prompt Reports*. National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.
- Suslov A.A. and Nymmik R.A. A semi-empirical model for large scale modulation of galactic cosmic ray energy spectra. *Proc. 21 ICRC (Adelaide)*, 6, pp. 33–36, 1989.
- Tylka A.J., Adams J. H., Boberg P.R. et al. CREME96: A revision of the Cosmic ray effects on micro-electronics code. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 44(6), pp. 2150–2160, 1997.
- Webber W.R., Simpson G.A. and Cane H.V. Radio emission, cosmic ray electrons, and the production of γ -rays in the Galaxy. *ApJ.*, 236, pp. 448–459, 1980.
- Webber W.R. The interstellar cosmic ray spectrum and energy density. *Interplanetary cosmic ray gradients and new estimate of the boundary of the heliosphere. Astron. Astrophys.* 179, 277, 1987.
- www.sec.noaa.gov/ftpdir/weekly/predict.txt