

УДК 523.745+539.163

УСКОРЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ

В.М. Дворников, М.В. Кравцова, В.Е. Сдобнов

ACCELERATION OF COSMIC RAY IN HELIOSPHERE

V.M. Dvornikov, M.V. Kravtsova, V.E. Sdobnov

В рамках модели модуляции космических лучей (КЛ) регулярными электромагнитными полями гелиосферы по данным о вариациях жесткостного спектра КЛ определены изменения энергии частиц в зависимости от их жесткости. Получено аналитическое выражение для описания этой зависимости на основе решения уравнения движения частиц в дрейфовом приближении и выражение для жесткостного спектра КЛ в широком диапазоне энергий. Выражение для спектра содержит четыре параметра, характеризующих изменения энергии КЛ за счет потенциальной, вихревой и поляризованной составляющих электрического поля гелиосферы, а также размер областей с нестационарными электромагнитными полями.

С учетом полученного выражения определены мгновенные значения параметров жесткостного спектра протонов по данным наземных и спутниковых измерений интенсивности КЛ в октябре–ноябре 2003 г. и на основе полученной информации произведены оценки характеристик электромагнитных полей гелиосферы за исследуемый период.

Within the context of the model of cosmic ray (CR) modulation by regular electromagnetic fields of heliosphere under the data about rigidity spectrum of CR variations changes are determined of energy of particles depending on their rigidity. The analytical expression for the description of this relation is obtained on the basis of the solution of an equation of motion of particles in a drift approaching and expression for rigidity spectrum of CR in broad range of energies. The expression for a spectrum contains four parameters describing change of CR energy caused by potential, rotational and polarization components of an electrical field of the heliosphere, and also size of areas with non-steady electromagnetic fields.

Taking into consideration the obtained momentary values of the parameters of the rigidity spectrum of protons using the data of ground-based and satellite measurements of the CR intensity in October–November, 2003 and on the base of obtained information we have estimated the characteristics of electromagnetic fields of the heliosphere for investigated period.

В работе рассматривается альтернативный подход к проблеме модуляции КЛ в межпланетном пространстве за счет изменения их энергии в электромагнитных полях гелиосферы при условии постоянства плотности частиц.

Для анализа использовались данные наблюдений интенсивности частиц в энергетических диапазонах 15–40, 40–80, 80–165 и 165–500 МэВ, полученных на спутнике GOES-10 [1], и данные о вариациях интенсивности КЛ различных жесткостей, полученные методом спектрографической съемки (СГС) по наземным измерениям на мировой станции нейтронных мониторов (38 станций) в период экстремальных событий в октябре–ноябре 2003 г.

Если жесткостной спектр в Галактике описывается степенной функцией от жесткости частиц R , то в соответствии с предлагаемой концепцией жесткостной спектр в гелиосфере будет иметь следующий вид:

$$J(R) = A \left[\frac{(\varepsilon^2 - \varepsilon_0^2)}{(\varepsilon + \Delta\varepsilon)^2 - \varepsilon_0^2} \right]^{3/2} \times \left[\frac{\varepsilon + \Delta\varepsilon}{\varepsilon} \frac{2\sqrt{(\varepsilon + \Delta\varepsilon)^2 - \varepsilon_0^2} - \sqrt{(\varepsilon^2 - \varepsilon_0^2)}}{\sqrt{(\varepsilon^2 - \varepsilon_0^2)}} \right]^{-\gamma}, \quad (1)$$

где ε – полная энергия частиц; $\Delta\varepsilon$ – ее изменения в электромагнитных полях гелиосферы; ε_0 – энергия покоя; A и γ – спектральные индексы галактического спектра.

Выражение (1) получено в предположении, что интенсивность КЛ с жесткостью R изменяется пропорционально изменениям произведения скорости частицы v на квадрат модуля ее импульса p , т.е. в соответствии с теоремой Лиувилля

$$\frac{J(R)}{vp^2} = const. \quad (2)$$

Данное предположение справедливо в том случае, когда можно пренебречь эффектами рассеяния частиц на магнитных неоднородностях и при отсутствии СКЛ в рассматриваемом диапазоне энергий.

Подставляя наблюдаемые значения интенсивности частиц различных жесткостей в левую часть уравнения (1), можно получить значения $\Delta\varepsilon$ в зависимости от жесткости частиц, т.е. $\Delta\varepsilon(R)$.

Для интерпретации полученных результатов рассмотрим эффекты изменения энергии частиц на основе решения уравнения движения в электромагнитных полях гелиосферы. В рамках дрейфового приближения, изменения энергии частиц может быть получено интегрированием уравнения [2]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \vec{E} \left\{ \frac{m v_{\perp}^2}{2B^3} \vec{B} \times \nabla \vec{B} - \frac{mc}{B^2} \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{B} \right] \right\} + \frac{m v_{\perp}^2}{2B} \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (3)$$

Здесь $\varepsilon = \frac{m}{2}(v_c^2 + v_{\perp}^2 + v_E^2)$; $\vec{V} = v_c \frac{\vec{B}}{B} + \vec{v}_E$; m – масса частицы; v_{\perp} и v_{\parallel} – продольная и поперечная относительно \vec{B} межпланетного магнитного поля (ММП) составляющие скорости; B – напряженность ММП; \vec{E} – напряженность электрического поля, $\vec{v}_E = \frac{c}{B^2} \vec{E} \times \vec{B}$; c – скорость света.

Для наглядности уравнение (3) используется в упрощенном виде и описывает изменения энергии низкоэнергичных ($\frac{v}{c} \ll 1$) частиц с большими питч-углами (v_{\parallel} – малая величина). Первый член в уравнении

(3) описывает изменение энергии за счет магнитного дрейфа частиц вдоль или против (в зависимости от градиента ММП) электрического поля; второй член описывает ускорение частиц за счет дрейфа под действием силы инерции $-m \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} \right]$ вдоль

электрического поля при его возрастании во времени, третий – вследствие переменности во времени магнитных полей.

Для спирального ММП и индуцированного электрического поля $\vec{E} = -\frac{1}{c} \vec{u} \times \vec{B}$ однородного стационарного СВ из решения уравнения (3) получим [3]:

$$\Delta \varepsilon_{pl} = \frac{z_e \Omega B_0 r_0^2}{c} (1 - \cos \lambda_E), \quad (4)$$

где Ω – угловая скорость вращения Солнца; B_0 – напряженность радиальной составляющей ММП на расстоянии r_0 , а λ_E – гелиоширота Земли.

Из уравнения (4) следует, что потери энергии частиц при потенциальном электрическом поле не зависят от жесткости частиц и при характерной напряженности ММП составляют ~200 МэВ.

В том случае, когда электромагнитные поля гелиосферы не являются стационарными, следует учитывать изменения энергии частиц, описываемые вторым и третьим членами уравнения (3). Соответствующие изменения энергии определяются выражениями:

$$\Delta \varepsilon_{pl} = \varepsilon (1 - e^{-\alpha/2}), \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{E_{pl}^2}{B^2}$, E_{pl} – поляризационное электрическое поле [4], и

$$\Delta \varepsilon_{rot} = \varepsilon - \sqrt{\beta(\varepsilon^2 - \varepsilon_0^2) + \varepsilon_0^2}, \quad (6)$$

где $\beta = \frac{B}{\langle B \rangle}$, $\langle B \rangle$ – напряженность фонового, а B – переменного магнитного поля.

Для описания полученной зависимости $\Delta \varepsilon(R)$ (рис. 1), следует предположить, что указанные механизмы имеют различную эффективность для частиц различных жесткостей. Изменения энергии высокоэнергичных частиц происходят в соответствии с выражением (4) и зависят от напряженности крупномасштабного ММП. При попадании Земли в «магнитное облако» изменения интенсивности КЛ будут определяться суперпозицией фонового ММП и поля магнитного облака, а также скоростью СВ [3]. Этот эффект должен наблюдаться для частиц, ларморовский радиус которых меньше размеров магнитного облака (единицы ГВ). В области меньших энергий доминируют эффекты, описываемые выражениями (5), (6), т.к. скорость магнитного дрейфа этих частиц значительно меньше, чем высокоэнергичных КЛ.

В связи с этим $\Delta \varepsilon(R)$ может быть описано следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon(R) = & \Delta \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon_1 [1 - f(R, bR_0)] + \\ & + \Delta \varepsilon_2 [1 - f(R, bR_0)] f(R, R_0) + \\ & + \left[\varepsilon (1 - e^{\alpha/2}) + \varepsilon - \sqrt{\beta(\varepsilon^2 - \varepsilon_0^2) + \varepsilon_0^2} \right] f(R, R_0), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Delta \varepsilon_0 = 0.1$ ГэВ; R_0 – параметр, характеризующий масштаб структурных образований в гелиосфере с нестационарными электромагнитными полями; $f(R, R_0) = \left[\exp\left(\frac{R - R_0}{aR_0}\right) + 1 \right]^{-1}$ – квазиступенчатая функция, стремящаяся к 1 при $R < R_0$ и к нулю при $R > R_0$ ($a < 1$); $\Delta \varepsilon_1, \Delta \varepsilon_2$ – параметры, характеризующие изменения энергии высокоэнергичных частиц ($\Delta \varepsilon_1$ при $R > bR_0$, $b = 2.5$, а $\Delta \varepsilon_2$ в жестком интервале $[R_0, bR_0]$ при попадании Земли в магнитное облако).

Величина $\Delta \varepsilon(R)$ показывает, насколько изменится энергия частицы с жесткостью R на ее траектории в гелиосфере при движении из Галактики до точки наблюдения. Основной особенностью представленных результатов является то, что потери энергии частиц релятивистских энергий ($R > 2$ ГВ) значительно больше, чем частиц меньших энергий. В отдельные моменты максимальные потери энергии ($\Delta \varepsilon(R) \sim 1.6$ ГэВ) наблюдаются у частиц с жесткостью в единицы ГВ. В области малых энергий, наряду с эффектами потерь энергии частиц, зачастую наблюдаются и эффекты их ускорения ($\Delta \varepsilon(R) < 0$).

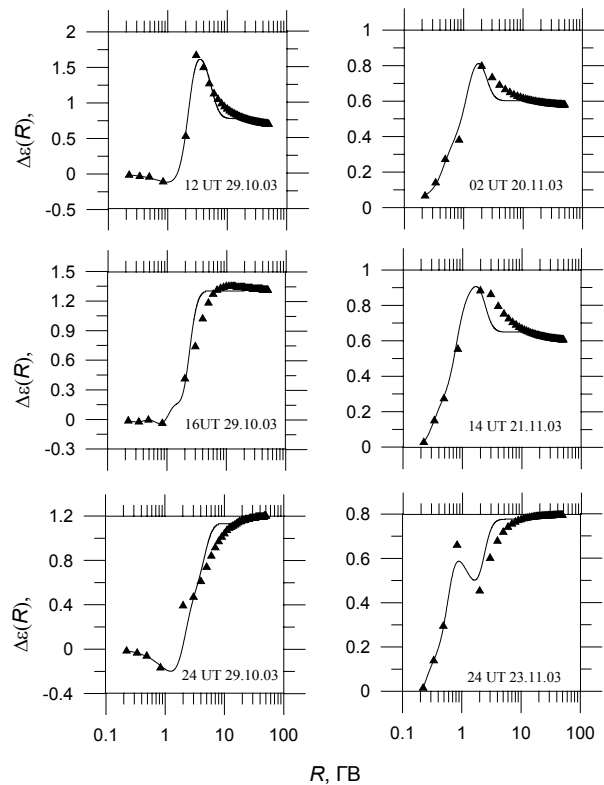


Рис. 1. Результаты расчетов $\Delta \varepsilon(R)$ для различных моментов наблюдений при экстремальных событиях в гелиосфере в октябре–ноябре 2003 г. Кривая – расчет по формуле (7), треугольники – исходные данные.

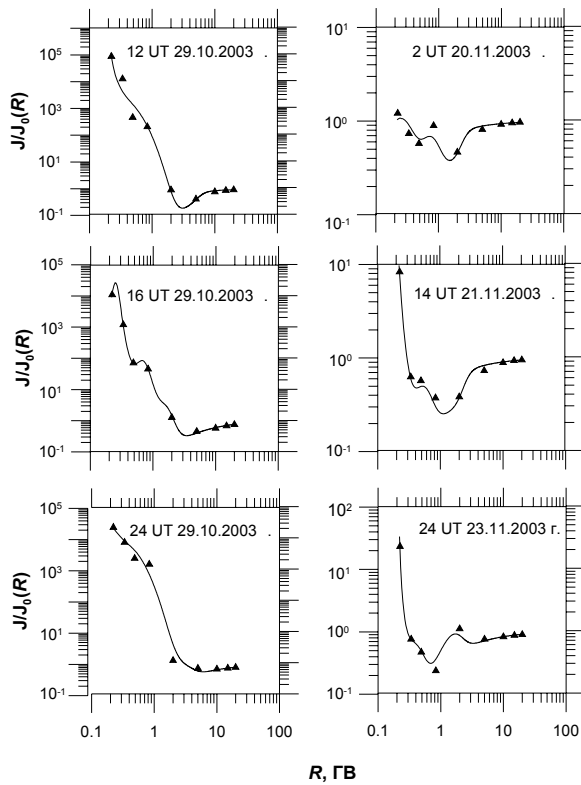


Рис. 2. Результаты расчетов жестких спектров относительных изменений интенсивности КЛ по формуле (1) с учетом (7) (кривые), и наблюдаемые спектры (треугольники).

На основании приведенных результатов следует заключить, что в рамках развиваемой концепции по вариациям параметров жесткого спектра КЛ можно получать информацию о крупномасштабном ММП, о магнитных облаках и о мелкомасштабных структурах гелиосферы с нестационарными электромагнитными полями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://spidr.ngdc.gov/spidr/index.html>.
2. Вопросы теории плазмы. Вып. 2 / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1963. 264 с.
3. Dvornikov, V.M., Sdobnov, V.E. // IJGA. 2002. V. 3, N 3. P. 217.
4. Альвен Х. Космическая плазма. М.: Мир, 1983. 213 с.