

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.018

ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ГЕЛИОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И МОДУЛЯЦИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

М.С. Калинин, М.Б. Крайнев, А.К. Свиржевская, Н.С. Свиржевский

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Аннотация. В работе предложена трёхкомпонентная модель гелиосферного магнитного поля, основанная на данных измерений дальних космических аппаратов. Широтная составляющая поля возникает при отказе от закона обратных квадратов для радиальной компоненты. При этом долготная компонента связана с радиальной классическим паркеровским соотношением. В целом модель соответствует данным измерений магнитного поля дальними космическими аппаратами и ориентирована на применение в задачах долговременной модуляции галактических космических лучей в 11-летних циклах солнечной активности.

Введение

Одной из первых работ, относящихся к описанию структуры гелиосферного магнитного поля (ГМП) является статья Паркера [1]. Эта работа, вышедшая из печати в 1958 году, когда не было даже околоземных измерений солнечного магнитного поля, оказалась удивительно прозорливой и не потеряла своей актуальности до настоящего времени.

Позднее, когда группой авторов было сформулировано уравнение модуляции космических лучей (КЛ) в современном виде [2, 3, 4], вопрос о координатной зависимости ГМП на больших пространственных масштабах приобрёл особую актуальность, поскольку в рамках уравнения потребовалось знание координатной зависимости напряжённости ГМП во всей гелиосфере. В последние годы появилось несколько работ, посвящённых анализу и обобщению данных измерений (см., например, [7]) на эту тему.

В данной работе рассмотрены модификации ГМП, которые применяются для описания потоков галактических КЛ в рамках решения уравнения модуляции, и предложена его новая модификация. Целью данного анализа является исследование структур ГМП, наиболее полно описывающих долговременные (среднемесячные) вариации потоков ГКЛ и основных их свойств в циклах солнечной активности.

Уравнение модуляции ГКЛ

Уравнение модуляции в современном виде [2, 3, 4] формулируется для функции плотности числа частиц $N(r, p, t)$, связанной с потоком (интенсивностью) $U(T, t)$ соотношением $U = p^2 N(\mathbf{r}, p, t)$, где T - кинетическая энергия, p - величина импульса частицы, t - время:

$$\partial N / \partial t - \nabla \cdot (\mathbf{K}_S \cdot \nabla N) + (\mathbf{V} + \mathbf{V}_d) \cdot \nabla N - (\nabla \cdot \mathbf{V} / 3) \cdot \partial N / \partial \ln p = 0. \quad (1)$$

Симметричный тензор диффузии \mathbf{K}_S в системе координат с ортом \mathbf{n}_1 вдоль вектора ГМП представляется тремя независимыми коэффициентами $K_{11} = K_{\parallel}$, $K_{22} = K_{\perp 0}$, $K_{33} = K_{\perp r}$. Скорость дрейфа, по определению, выражается равенством $\mathbf{V}_d = [\nabla, \mathfrak{Z}(S) K_T \mathbf{n}_1]$, где $\mathfrak{Z}(S)$ - знаковая функция, принимающая значение 1 при положительном аргументе и -1 при отрицательном, $K_T = \text{sign}(qA) \cdot (pv / 3qB)$ - дрейфовый (трансверсальный) коэффициент; $A = \pm 1$ - описывает полярность общего поля Солнца, v, q - скорость частицы и её заряд, B - величина напряжённости ГМП. Аргументом знаковой функции \mathfrak{Z} является функция S , где $S(\mathbf{r}, t) = 0$ - уравнение поверхности гелиосферного токового слоя (ГТС, трёхмерная поверхность, на которой ГМП меняет знак). В практических расчётах применяется модель ГТС, получившая название «модель наклонного токового слоя» (НТС) с одним модельным параметром - углом наклона α гелиосферного токового слоя к плоскости гелиоэкватора [4]. Коэффициенты уравнения (1) обычно являются осесимметричными функциями, но наличие трёхмерного ГТС приводит к зависимости решения (1) от всех трёх переменных r, θ, φ .

Гелиосферное магнитное поле

Магнитное поле является основным модулирующим фактором ГКЛ в гелиосфере. К 80-м годам прошлого века стало ясно, что классическое двухкомпонентное паркеровское поле с компонентами

$$B_r = \frac{B_r(r_0)r_0^2}{r^2}, \quad B_\theta = 0, \quad B_\varphi = -\frac{\omega(r-r_S)\sin\theta}{V} B_r, \quad (2)$$

$\omega = 2.7 \cdot 10^{-6}$ рад/с – угловая скорость солнечного вращения, r_S – радиус поверхности источника ГМП, V – радиальная скорость СВ, не описывает данные измерений модуляции потоков галактических КЛ в 11-летних солнечных циклах при положительной полярности $A=1$ общего магнитного поля Солнца. Требовалось некоторое усиление ГМП в приполярных областях гелиосферы таким образом, чтобы в остальной части гелиосферы компоненты магнитного поля описывались равенствами (2).

В настоящее время при описании долговременных вариаций интенсивности применяются две модификации ГМП:

1) модификация Джокипи – Кота [5]

$$B = \frac{B_r(r_0)r_0^2}{r^2} \sqrt{1 + \frac{\sigma_{JK}^2 r^2}{r_0^2} + \left[\frac{\omega(r-r_S)\sin\theta}{V} \right]^2}, \quad B_\theta = \frac{\sigma_{JK} B_r r}{r_0 \sin\theta}, \quad r_0 = 1 \text{ АЕ}, \quad \sigma_{JK} \approx 8.7 \cdot 10^{-5}, \quad (3)$$

$r_0 \approx 0.005$ АЕ, а две другие компоненты ГМП даются выражением (2);

и

2) Смита – Бибера [6] с компонентами

$$B_r = \frac{B_r(r_0)r_0^2}{r^2}, \quad B_\theta = 0, \quad B_\varphi = -B_r \cdot \left[\sigma_{SB} \frac{r}{r_S} + \frac{\omega(r-r_S)\sin\theta}{V} \right], \quad (4)$$

$$\sigma_{SB} = -\frac{B_\varphi(r_S)}{B_r(r_S)} \cdot \frac{V(r_S)}{V(r \gg r_S)} \approx 0.014.$$

Обе модификации удовлетворяют условию $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, а модификация Смита – Бибера отличается от паркеровской более сильной закрученностью спирали силовых линий ГМП. Применение трёхкомпонентной модификации Джокипи – Кота усложнено в силу расходимости B_θ на гелиополусах.

В последние годы вышли работы, в которых делается вывод об отклонении радиальной компоненты ГМП от закона обратных квадратов, по крайней мере, до гелиоцентрических расстояний ≈ 5 АЕ [7].

Если предположить, что радиальная компонента изменяется по закону $B_r = A \left[\frac{r_0}{r} \right]^{2-\delta}$, $A = B_r(r_0)$, $\delta > 0$,

то при условии сохранения кинематической связи между радиальной и долготной компонентами, для угловых компонент ГМП получим:

$$B_\varphi = -\frac{\omega(r-r_S)\sin\theta}{V} B_r, \quad B_\theta = \delta \cdot B_r \cdot V / \frac{\partial V}{\partial \theta}. \quad (5)$$

Трёхкомпонентное ГМП (5) удовлетворяет условию $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, но следующее из соображений симметрии требование $B_\theta = 0$, $\delta = 0$ на гелиополусах приводит к зависимости параметра δ от гелиошироты. Согласно данным измерений $|B_\theta| \leq |B_r|$ до расстояний в несколько АЕ, поэтому из (5) для δ получаем ограничение

$$\delta \leq \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial \theta}.$$

Результаты расчётов с трёхкомпонентным ГМП

Решение задачи (1) в рамках трёхкомпонентной модели (5) проводилось при упрощённой зависимости скорости СВ от полярного угла $V = V_0(1 + |\cos\theta|)$, $V_0 = 400$ км/с – скорость на гелиоэкваторе. Модельный параметр δ выбирался таким, чтобы во всей гелиосфере выполнялось условие $|B_\theta| < |B_r|/2$ при заданной скорости СВ. Другие параметры модели кратко описаны в статьях [8, 9], а немодулированный спектр протонов был взят из работы [10]. Постоянный коэффициент, определяющий величину компонент тензора диффузии, подбирался для лучшего согласия с протонными спектрами в минимуме СА 2009 года [11]. С учётом того, что 2009 год относится к минимуму с $A = -1$, дрейфовый коэффициент был выбран равным единице (эффекты дрейфа максимальны).

Заключение

Результаты расчётов, приведенные на рисунке 1, показывают, что трёхкомпонентная модель ГМП (5) удовлетворительно описывает измеренные энергетические спектры из [11]. Тем не менее, в области малых энергий $T < 200$ МэВ расчётные точки выходят за пределы ошибок измерений. Этот факт связан с очень малыми широтными градиентами, возникающими при включении слабого по величине B_0 . Малость градиентов приводит к ослаблению дрейфового механизма модуляции и относительному усилению диффузионного, препятствующего проникновению частиц из приэкваториальных областей гелиосферы к приполярным. В целом это приводит к избытку частиц малых энергий на орбите Земли.

Рисунок 2 показывает, что амплитуда модуляции ГКЛ в модели ГМП (5) пригодна для описания интегральной интенсивности в последовательных 11-летних циклах СА, поскольку вариации спектров ГКЛ в 2006-2010 годах по расчётной модели соответствуют их вариациям при расчётах по двухкомпонентной модификации Смита-Бибера (4), хорошо описывающей вариации интегральной интенсивности в минимумах солнечных циклов.

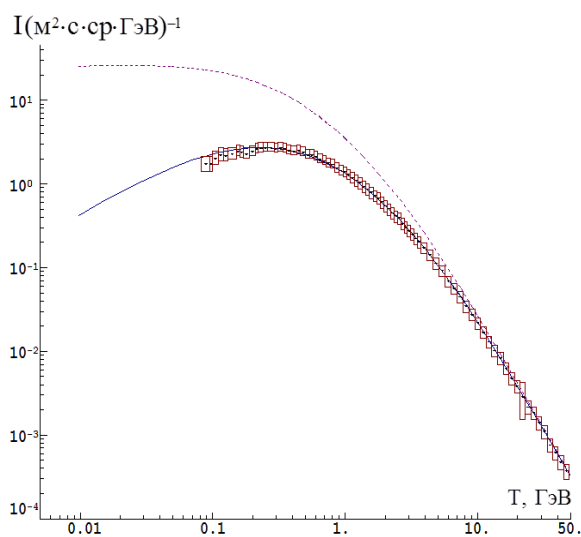


Рисунок 1. Пунктирная линия – немодулированный спектр протонов [10]. Светлые прямоугольники – данные по протонам в минимуме 2009 года [11]. Тёмная сплошная линия – расчёт для протонов в минимуме 2009 года.

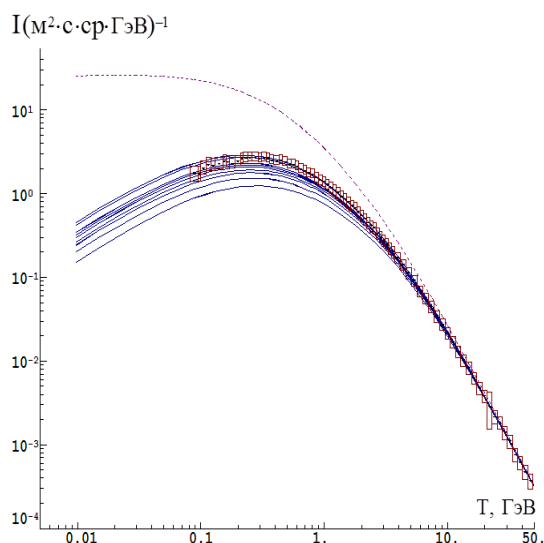


Рисунок 2. Светлые прямоугольники – данные по протонам в минимуме 2009 года [11]. Тёмные сплошные кривые – расчёт с полугодовой скважностью за 2006-2010 годы.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 18-02-00582_a).

Литература

1. Parker E.N. // *Astrophys. J.* 1958. V. 128. P. 664–676.
2. Крымский Г.Ф. // *Геомаг. и аэрон.* 1964. Т. 4. № 6. С. 977–986; *Geomag. Aeron.* 1964. V. 4. N. 6. P. 977–986.
3. Parker E.N. // *Planet. Space Sci.* 1965. V. 13, P. 9–49.
4. Jokipii J.R., Levy E.H. and Hubbard W.B. // *Astroph. J.* 1977. V. 213. P. 861–868.
5. Jokipii J.R., Kota J. // *J. Geophys. Res. Lett.* 1989. V. 16. N. 1. P. 1–4.
6. Smith C.W., Bieber J.W. // *Astrophys. J.* 1991. V. 370. P. 435–441.
7. Khabarova O., Obridko V. // *Astrophys. J.* 2012. V. 761:82 (10pp).
8. Калинин М.С., Базилевская Г.А., Крайнев М.Б. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 5. С. 663–666; *Kalinin M.S., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. V. 79. № 5. P. 606–609.
9. Калинин М.С., Базилевская Г.А., Крайнев М.Б. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83, № 5, С. 610–613; *Kalinin M.S., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. № 5. P. 551–554.
10. Bisschoff D., Potgieter M.S., and Aslam O.P.M. // *Astrophys. J.* 2019. 878:59 (8pp).
11. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // *Astrophys. J.* 2013. V. 765:91 (8pp).