

УДК 524.1-352

СТРУКТУРА ГЕЛИОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И МОДУЛЯЦИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2021 г. М. С. Калинин¹, *, Г. А. Базилевская¹, М. Б. Крайнев¹,
А. К. Свиржевская¹, Н. С. Свиржевский¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: kalininms@lebedev.ru

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Рассмотрено влияние трехкомпонентности гелиосферного магнитного поля на модуляцию галактических космических лучей. Радиальная и долготная компоненты модели связаны известным соотношением Паркера, а широтная компонента пропорциональна радиальной и возникает при отклонении зависимости радиальной компоненты от закона обратных квадратов. Модель апробирована в задаче модуляции галактических протонов.

DOI: 10.31857/S0367676521100185

ВВЕДЕНИЕ

Одной из первых работ, в которой была предложена модель гелиосферного магнитного поля (ГМП) является статья Паркера [1]. В этой статье на основании предположения о постоянстве скорости солнечного ветра (СВ) было предложено двухкомпонентное ГМП, в которой компоненты B_r , B_ϕ связаны соотношением

$$B_\phi = -\frac{\omega(r - r_s) \sin \theta}{V} \cdot B_r, \quad B_r = B_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2, \quad (1)$$

где r_s – радиус поверхности источника ГМП, ω – угловая скорость вращения Солнца, B_0 – значение напряженности на расстоянии r_0 . Второе из равенств (1) следует из условия $\nabla \cdot \vec{B} = 0$. Широтная компонента B_θ в паркеровской модели отсутствует.

Позднее структура ГМП была изучена по данным измерений до расстояний ≈ 5.4 астрономических единиц (АЕ). Измерения высокоширотного космического аппарата (к. а.) Улиссис [2, 3] подтвердили сильную широтную зависимость скорости СВ за пределами секторной зоны. Другим важным фактом, установленным миссией Улиссис, явилась независимость радиальной компоненты ГМП от широты [3]. За пределами 10 АЕ ГМП до настоящего времени мало изучено. Данные дальних к. а. Вояджер 1, 2 по компонентам ГМП противоречивы вследствие недостаточной точности измерительных приборов для измере-

ния слабых магнитных полей на больших расстояниях от Солнца [4, 5].

УРАВНЕНИЕ МОДУЛЯЦИИ ГКЛ И ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Уравнение модуляции [6] в современном виде формулируется для функции плотности числа частиц $N(\vec{r}, p, t)$, связанной с интенсивностью (поток частиц) $U(T, t)$ соотношением $U = p^2 N(\vec{r}, p, t)$, где p – величина импульса частицы, t – время, T – кинетическая энергия,

$$\begin{aligned} & \partial N / \partial t - \nabla \cdot (K_{ij}^{(S)} \cdot \nabla N) + \\ & + (V_i + V_{di}) \cdot \nabla_i N - (\nabla \cdot \vec{V} / 3) (\partial N / \partial \ln p) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Симметричный тензор диффузии $K_{ij}^{(S)}$ в системе координат с ортом \vec{n}_i , направленным вдоль вектора ГМП представляется тремя диагональными коэффициентами $K_{11} = K_{\parallel}$, $K_{22} = K_{\perp\theta}$, $K_{33} = K_{\perp r}$. Скорость СВ \vec{V} радиальна, скорость дрейфа, по определению, выражается равенством $\vec{V}_d = \nabla \times [\mathfrak{Z}(S) K_T \vec{n}_i]$, где $\mathfrak{Z}(S)$ – знаковая функция, принимающая значение +1 при положительном аргументе и –1 при отрицательном, $K_T = \text{sign}(qA) \cdot (p\nu/3qB)$ – дрейфовый коэффициент; $A = \pm 1$ – описывает знак радиальной компоненты ГМП в северном полушарии гелиосферы, ν , q – скорость частицы и ее заряд, B – величина напряженности ГМП. Аргументом знаковой

функции \mathcal{S} является S , где $S(\vec{r}, t) = 0$ – уравнение поверхности гелиосферного токового слоя (пространственная поверхность, на которой ГМП меняет знак). В расчетах применяется простая “модель наклонного токового слоя” (НТС) с одним модельным параметром – углом наклона α гелиосферного токового слоя к плоскости гелиоэкватора [14].

ГЕЛИОСФЕРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

К 1980-м годам было установлено, что уравнение модуляции (2) в рамках двухкомпонентного паркеровского магнитного поля (1) неудовлетворительно описывает данные измерений потоков галактических ГКЛ в 11-летних солнечных циклах. Требовалось усиление ГМП в приполярных областях гелиосферы таким образом, чтобы в остальной части гелиосферы магнитное поле примерно описывалось равенствами (1).

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

1) модификация Джокипи–Кота [7] с компонентами (1), дополненное широтной компонентой

$$B_\theta = \frac{\sigma_{JK} B_r r}{r_0 \sin \theta}, \quad \sigma_{JK} \approx 8.7 \cdot 10^{-5}, \quad r_0 = 0.005 \text{ АЕ.} \quad (3)$$

2) Смита–Бибера [8] с компонентами

$$B_r = \frac{B_r(r_0) r_0^2}{r^2}, \quad B_\theta = 0, \quad (4)$$

$$B_\phi = -B_r \left[\sigma_{SB} \frac{r}{r_0} + \frac{\omega(r - r_s) \sin \theta}{V} \right].$$

Обе модификации (3), (4) удовлетворяют условию $\nabla \cdot \vec{B} = 0$, применение модификации Джокипи–Кота технически более сложно в силу трехкомпонентности ГМП и расходимости B_θ на гелиополюсах.

В работе [9], на основании анализа измерительных данных по ГМП в плоскости эклиптики, делается вывод об отклонении зависимости B_r от r от закона обратных квадратов. В предположении, что радиальная компонента изменяется по закону $B_r = B_0 \left[\frac{r_0}{r} \right]^{2-\delta}$, $B_\theta = B_r(r_0)$, $\delta > 0$, то при условии сохранения связи (1) между радиальной и долготной компонентами, для угловых компонент ГМП получим:

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

Трехкомпонентное ГМП (5) удовлетворяет уравнению $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ при дополнительном усло-

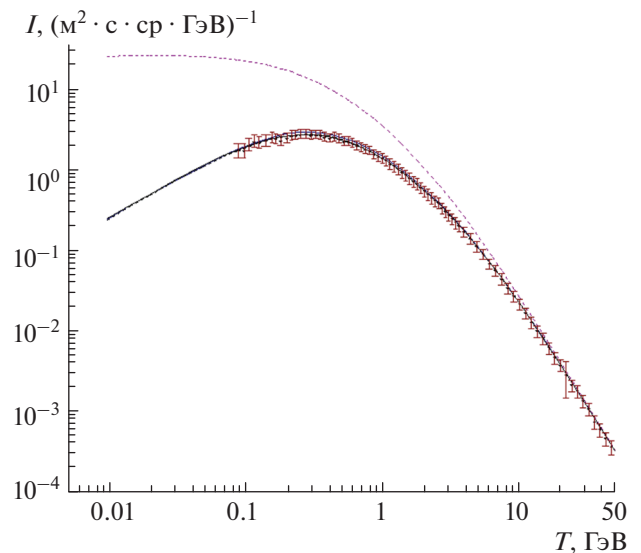


Рис. 1. Верхняя пунктирная линия – немодулированный спектр протонов [10]. Светлые отрезки – данные измерений по протонам в минимуме 07.2009 [13]. Толстая сплошная линия – расчет спектра протонов в минимуме 07.2009, $A = -1$, тонкая сплошная линия – расчет спектра протонов в 07.2009 при $A = 1$, темная пунктирная линия, почти сливающаяся со сплошной, – расчет без дрейфов.

вию $\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta B_\theta) = -\frac{B_\theta}{V} \frac{\partial V}{\partial \theta}$, которое выполняется для широкого класса поля скоростей.

Из физических соображений следует, что на гелиополюсах B_θ должно быть ограничено, т.е. показатель δ в рамках осесимметричных моделей будет функцией гелиошироты. Зависимость $\delta \sim \sin \theta$ является удовлетворительной, но условие $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ при этом нарушается (см. также [10]).

Согласно данным измерений вблизи гелиоэкватора $|B_\theta| \leq |B_r|$, поэтому из (5) для δ получается ограничение

$$\delta \leq \left| \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial \theta} \right|. \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ВЫВОДЫ

Решение задачи (1) в рамках трехкомпонентной модели (5) проводилось при упрощенной зависимости скорости СВ от полярного угла $V = V_0(1 + |\cos \theta|)$, $V_0 = 400$ км/с – скорость на гелиоэкваторе. Параметр δ был выбран равным 0.3 в соответствии с [9]. Зависимость коэффициентов от жесткости и немодулированный спектр протонов был взят из работы [11], другие параметры модели кратко описаны в статье [12], Коэффициент K_T соответствовал 100% вкладу дрейфов в модуляцию.

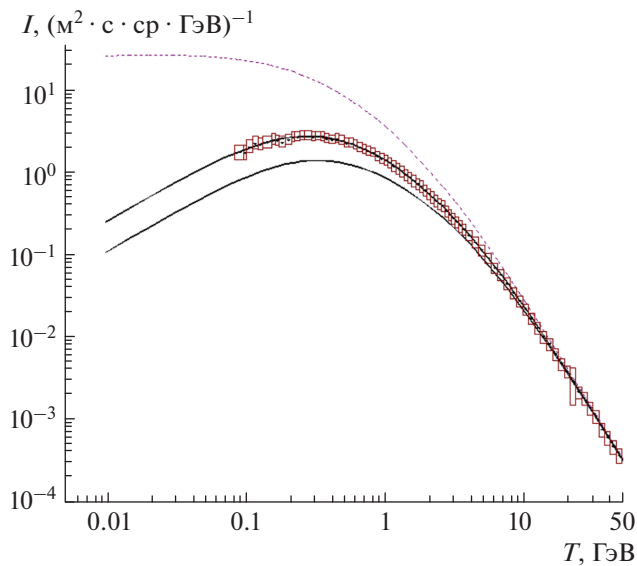


Рис. 2. Светлые прямоугольники — данные по протонам в минимуме 07.2009 [13]. Темные сплошные кривые: нижняя — расчет для 07.2006 г., верхняя — расчет для 07.2009.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов, представленные на рис. 1, показывают, что трехкомпонентная модель ГМП (5) хорошо описывает измеренные спектры протонов в минимуме 2009.7 г. ($A = -1$) из работы [13] при увеличенных в 2–3 раза величинами компонент тензора диффузии (классическое значение $K_{\parallel} = (1.5-1.7) \cdot 10^{22} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$). При этом относительный вклад дрейфового механизма модуляции становится малым, модель в целом становится диффузионно — доминирующей. На рис. 1 тонкая линия, заметная в интервале энергий $0.1 \leq T \leq 7-8$ ГэВ соответствует гипотетическому случаю $A = 1$, указывая, что в минимумах положительных Π — летних циклов интенсивность ГКЛ несколько выше, чем в минимумах отрицательных циклов. Бездрейфовый вариант —

пунктирная кривая, — слабо отличается от расчетной с дрейфами.

На рис. 2 разность между верхней (07.2009) и нижней (07.2006) кривыми — амплитуда модуляции спектров ГКЛ при $A = -1$, — составляет приблизительно 60% в максимумах спектральных кривых. Интегральная интенсивность варьируется в пределах 40% за 07.2006–07.2009.7, т.е. в целом модель достаточно чувствительна к используемым модельным параметрам, взятым из баз данных [14, 15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parker E.N. // *Astrophys. J.* 1958. V. 128. № 4. P. 664.
2. Thomas B.T., Smith E.J. // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 1980. V. 85. № 12. P. 6861.
3. Smith E.J., Balogh A. // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. No. 23. P. 3317.
4. Burlaga L.F., Ness N.F., Belcher J.W. et al. // *Space Sci. Rev.* 1996. V. 78. Nos. 1–2. P. 34.
5. Burlaga L.F., Ness N.F., Richardson J.D. // *Astrophys. J.* 2017. V. 841. P. 47.
6. Parker E.N. // *Planet. Space Sci.* 1965. V. 13. P. 9.
7. Jokipii J.R., Kota J. // *J. Geophys. Res. Lett.* 1989. V. 16. No. 1. P. 1.
8. Smith C.W., Bieber J.W. // *Astrophys. J.* 1991. V. 370. P. 435.
9. Khabarova O., Obridko V. // *Astrophys. J.* 2012. V. 761. P. 82.
10. Калинин М.С., Крайнев М.Б., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С. // *Proc. XLIII Annual Seminar. (Apatity, 2020)*. P. 77.
11. Bisschoff D., Potgieter M.S., Aslam O.P.M. // *Astrophys. J.* 2019. V. 878. P. 59.
12. Калинин М.С., Базилевская Г. А., Крайнев М. Б. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 5. С. 663; Kalinin M.S., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. V. 79. No. 5. P. 606.
13. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // *Astrophys. J.* 2013. V. 765. P. 91.
14. <http://wso.stanford.edu>.
15. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>.

Structure of the heliosphere magnetic field and modulation of galactic cosmic rays

M. S. Kalinin^{a,*}, G. A. Bazilevskaya^a, M. B. Krainev^a, A. K. Svirzhevskaya^a, N. S. Svirzhevsky^a

^a*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: kalininms@lebedev.ru

We examine the effect of the three-component heliosphere magnetic field on the modulation of galactic cosmic rays. The radial and longitude components of the model are linked by Parker's known ratio, and the latitude component is proportional to the radial component and occurs when the radial component's dependence on the law of reverse squares deviates. The model is tested in the task of modulating galactic protons.