

ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ВЕКТОРНОЙ И ТЕНЗОРНОЙ АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МАГНИТНОЙ ПРОБКИ

П.Ю. Гололобов, П.А. Кривошапкин, Г.Ф. Крымский

Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
gpeter@ikfia.sbras.ru

INVESTIGATION INTO SHORT-TERM VARIATIONS OF VECTOR AND TENSOR ANISOTROPIES OF COSMIC RAYS, USING MAGNETIC MIRROR MODEL

P.Yu. Gololobov, P.A. Krivoshapkin, G.F. Krymsky

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia

Аннотация. В работе исследуются вариации плотности, векторной и тензорной анизотропий космических лучей во время форбуш-понижений. Информация об угловом распределении космических лучей получена на основе данных мировой сети нейтронных мониторов с помощью метода глобальной съемки. Обнаружены резкие амплитудно-фазовые колебания анизотропии космических лучей наблюдаемые во время форбуш-понижений неизвестного происхождения. Для объяснения полученных результатов разработана модель магнитной пробки, которая основана на кинетическом рассмотрении процесса модуляции и позволяет учитывать первые две сферические гармоники углового распределения космических лучей. Проведено сопоставление ожидаемой от модели функции распределения космических лучей с экспериментальными данными.

Ключевые слова: космические лучи, магнитная пробка, тензорная анизотропия

Abstract. In the work variations of density, vector and tensor anisotropies of cosmic rays in the periods of Forbush decreases are investigated. The information about angular distribution of cosmic rays is obtained on the basis of the data of worldwide network of neutron monitors using the global survey method. Abrupt amplitude-phase oscillations of cosmic ray anisotropy during Forbush decreases of unknown origin are found. In order to explain the obtained results the model of magnetic mirror is proposed. The model is based on kinetic consideration of the modulation process and allows us to count the first two spherical harmonics of cosmic ray angular distribution. A comparison of the model calculations and the experimental data is carried out.

Keywords: cosmic rays, magnetic mirror, tensor anisotropy

Введение

Поток КЛ, регистрируемый наземными детекторами, характеризуется наличием изотропной и анизотропной составляющих. Последняя наблюдается отдельным детектором КЛ в виде суточных и полусуточных вариаций, возникающих вследствие вращения Земли вокруг своей оси. В среднем суточные колебания КЛ имеют амплитуду $\sim 0.6\%$ и фазу 18 ч местного времени, а полусуточные — амплитуду $\sim 0.2\%$ и фазу 3 ч местного времени. Однако, в периоды возмущений солнечного ветра (СВ) указанная анизотропия КЛ может сильно изменяться.

В данной работе используется оригинальный метод глобальной съемки, разработанный в ИКФИА СО РАН, позволяющий рассматривать всю сеть нейтронных мониторов [www.nmdb.eu] в виде единого многонаправленного прибора. Метод позволяет выделять первые две сферические гармоники углового распределения КЛ. Первая сферическая гармоника состоит из 3-х компонент: первой зональной гармоники R_1^0 и компонент суточной вариации a_1^1 и b_1^1 и может быть представлена в пространстве в виде некоего вектора, из-за чего носит название векторной анизотропии. Вторая сферическая гармоника состоит из: второй зональной гармоники R_2^0 , антисимметричной суточной вариации R_2^1 и полусуточной вари-

ации R_2^2 . В пространстве наиболее адекватным представлением второй сферической гармоники является тензорный эллипсоид, из-за чего ее называют тензорной анизотропией.

Наши последние исследования крупномасштабных динамических процессов СВ [Gololobov et al., 2015] привели к заключению, что во время больших форбуш-понижений тензорная анизотропия обнаруживает чрезвычайно сложное поведение, характеризующееся резкими амплитудно-фазовыми колебаниями. В данной работе проведена попытка теоретической интерпретации полученных результатов.

Модель модуляции КЛ магнитной пробкой

Форбуш-понижения КЛ обусловлены выбросами от Солнца замагниченной плазмы. В случае, когда поле в плазме хаотическое, понижение обусловлено рассеяниями частиц и их диффузией вдоль расширяющегося объема. Регулярное магнитное поле воздействует на космические лучи таким образом, что часть траекторий частиц оказывается запрещенной. Случай, когда запрет вызван магнитной пробкой рассмотрен в [Крымский и др., 2009]. При этом предполагалось, что рассеяния частиц в таком поле не происходят. Представляет интерес рассмотреть совместное действие магнитной пробки и рассеяния частиц в простейшей одномерной модели.

Идеализированная постановка задачи предполагает однородное магнитное поле H , в котором имеется сгущение поля $H(x)$ в виде магнитной пробки. Существует направленный поток КЛ, пересекающий пробку вдоль поля и подвергающихся рассеяниям, которые будем считать точечными и изотропными. Рассеивающие центры неподвижны в системе отсчета, связанной с пробкой.

Напишем уравнение для функции распределения КЛ $f(x, \mu)$, где x — положение частицы относительно пробки, а μ — косинус питч-угла. Поскольку все элементы магнитного поля неподвижны, энергия частиц сохраняется и можно следить за частицами одной фиксированной энергии. Поэтому зависимость от энергии не входит в функцию распределения.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial f}{\partial x} \dot{x} - \frac{\partial f}{\partial \mu} \dot{\mu} - \frac{1}{\tau} \left(f - \frac{1}{2} \int_{-1}^1 f \partial \mu \right).$$

Первые два члена в правой части описывают воздействие магнитной пробки при условии, что $\partial f / \partial t = 0$, а последний член — рассеяния с постоянной времени τ . Скорость движения вдоль поля $\dot{x} = v\mu$, а изменение питч-угла регулируется первым адиабатическим инвариантом $(1-\mu^2)/H(x) = \text{const}$. Производя дифференцирование последнего равенства по времени и подставляя туда \dot{x} , находим: $\dot{\mu} = \frac{1-\mu^2}{2} \frac{H'}{H} v$.

Функция распределения будет представлена двумя сферическими гармониками:

$$f(x, \mu) = f^{(0)}(x) + f^{(1)}(x) + f^{(2)}(x)(\mu^2 - 1/3).$$

После подстановки в уравнение для стационарного случая и выделения в нем нулевой, первой и второй гармоник, получаем систему из трех уравнений

$$\frac{\partial f^{(1)}}{\partial x} - \frac{H'}{H} f^{(1)} = 0,$$

$$\frac{\partial f^{(0)}}{\partial x} + \frac{4}{15} \frac{\partial f^{(2)}}{\partial x} - \frac{2}{5} \frac{H'}{H} f^{(2)} + \frac{1}{v\tau} f^{(1)} = 0,$$

$$\frac{\partial f^{(1)}}{\partial x} + \frac{H'}{2H} f^{(1)} + \frac{1}{v\tau} f^{(2)} = 0.$$

После интегрирования имеем: $f^{(1)} = \frac{H}{H_0} f_0^{(1)}$,

$f^{(2)} = -\frac{3}{2} v\tau \frac{H'}{H_0} f_0^{(1)}$, где индексом «0» помечены величины при $x \rightarrow \infty$.

Поведение изотропной части определяется интегралами

$$f^{(0)} = \frac{f^{(0)}}{H_0} \left[-\int \frac{H}{v\tau} - \frac{2}{5} \int \left(\frac{(H')^2}{H} - H'' \right) v\tau dx \right].$$

Расходимость первого интеграла на нижнем и верхнем пределах связана с упрощенной постановкой задачи. В действительности область интегрирования всегда ограничена. Второй интеграл показывает модулирующее действие пробки, которое тем заметнее, чем больше τ , т. е. когда рассеяний мало.

Полученное выражение для $f^{(2)}$ указывает на то, что в момент прохождения идеализированной магнитной пробки вторая сферическая гармоника должна испытывать смену направления на противоположный, в то время как $f^{(1)}$ сохраняет свое изначальное направление. Амплитуда обеих вариаций должна испытывать вариации в зависимости от сгущенности поля.

Сопоставление модели магнитной пробки и экспериментальных данных

Как было сказано выше, попадание Земли в зону влияния магнитной пробки должно характеризоваться резкими амплитудно-фазовыми колебаниями тензорной анизотропии КЛ. При этом, ожидается смена фазы компонент тензорной анизотропии, по крайней мере хотя бы одной из компонент R_2^0 , R_2^1 или R_2^2 в зависимости от параметров магнитной пробки.

На рис. 1. показаны полученные в результате реализации метода глобальной съемки поведения R_1^1 , R_1^2 и R_2^2 5–9 мая 2017 г. в виде векторов на часовом циферблате. На рисунке также представлено поведение модуля напряженности межпланетного магнитного поля $|B|$, плотности протонов ρ_{CB} и скорость СВ v_{CB} , которые также показаны на рисунке. Как видно из рисунка 7 мая наблюдался резкий скачок всех 3-х вышеуказанных параметров ММП, который образовался из-за перехода Землей нейтрального токового слоя. Как было указано в работе [Thomas et al., 2014], при переходе Землей нейтрального токового слоя наблюдается магнитная пробка, образованная взаимодействием быстрых и медленных потоков СВ, которая сопровождается усилением давления СВ и напряженности поля. Можно сделать вывод, что во время такого перехода должно наблюдаться ожидаемое от модели магнитной пробки поведение тензорной анизотропии КЛ. Действительно, в момент перехода наблюдалась рез-

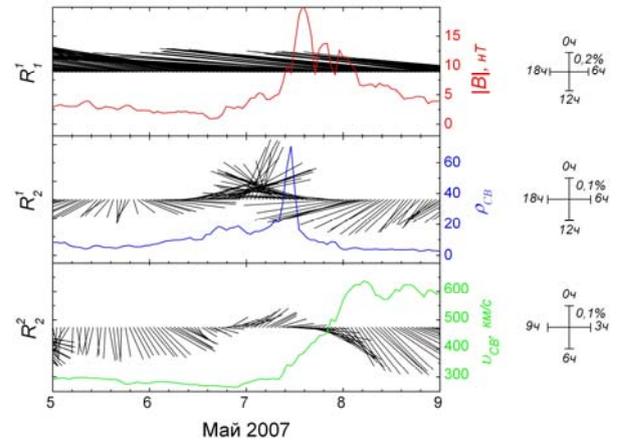


Рис. Поведение R_1^1 , R_1^2 и R_2^2 , представленные в виде векторов, а также параметров межпланетного магнитного поля $|B|$, ρ_{CB} и v_{CB} в мае 2017 г. Соответствующие каждому вектору часовые циферблаты представлены справа.

кая кратковременная смена фазы компонент R_2^1 и R_2^2 на противоположный и постепенное восстановление изначальной фазы.

Заключение

Проведено моделирование прохождения КЛ через магнитную пробку. Установлено, что при этом должно наблюдаться поведение тензорной анизотропии КЛ характеризующееся сменой направления на противоположный с последующим восстановлением фазы. На основе метода глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов получены экспериментальные данные об угловом распределении КЛ подтверждающие вышеуказанную теорию.

Работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-42-05085-р_восток_a, 15-42-05083-р_восток_a и программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 23 “Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика”.

Список литературы

Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Мамруков В.П., Герасимова С.К. Поршневая ударная волна и эффект Форбуша // ПАЖ. 2009. Т 35, № 10. С. 772–776.

Gerasimova S.K., Gololobov P.Yu., Grigoryev V.G., Krivoschapkin P.A., Krymsky G.F. Investigation of short-term disturbances of the solar wind using a tensor anisotropy method // Proc. Science. 2017. PoS(ICRC2015)077.

Thomas S.R., Owens M.J., Lockwood M., Scott C.J. Galactic cosmic ray modulation near the heliospheric current sheet // Solar Phys. 2014. V. 289. P. 2653–2668.

www.nmdb.eu