

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ В МАГНИТНОМ ОБЛАКЕ

А.С. Петухова

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
petukhova@ikfia.ysn.ru

ENERGY SPECTRUM OF FORBUSH DECREASE IN A MAGNETIC CLOUD

A.S. Petukhova

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia
petukhova@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Приведены результаты расчета амплитуды форбуш-понижения в магнитном облаке с квазибессилового структурой винтового поля. Расчеты выполнены для космических лучей с энергиями 10–50 ГэВ и максимальной напряженностью магнитного поля в поперечном сечении 15–20 нТл. Определен спектр форбуш-понижения в интервале энергий нейтронных мониторов и мюонных телескопов. Результаты расчета сопоставляются с измерениями.

Ключевые слова: космические лучи, форбуш-понижение, магнитное облако.

Abstract. The results of calculating the Forbush decrease amplitude in a magnetic cloud with a quasi-free force field structure are presented. The calculations were performed for cosmic rays with energies of 10–50 GeV and a maximum magnetic field strength in a cross section of 15–20 nT. The Forbush decrease spectrum has been determined in the energy range of neutron monitors and muon telescopes. The calculation results are compared with the measurements.

Keywords: cosmic rays, Forbush decrease, magnetic cloud.

ВВЕДЕНИЕ

Выбросы корональной массы (СМЕ) выносят плазму из солнечной атмосферы в межпланетное пространство, где их называют межпланетными выбросами корональной массы (ICMEs). ICMEs сильно воздействуют на свойства плазмы солнечного ветра, геомагнитную активность и распределение космических лучей (КЛ) в межпланетном пространстве.

Магнитное облако (МО), являющееся частью ICME, находится внутри него. МО является крупномасштабной магнитной петлей, соединенной с Солнцем. Уникальным свойством МО является винтовая структура его магнитного поля (MFR).

Изучение свойств МО представляет большой интерес. Структура магнитного поля МО содержит информацию о связи ICME и ее родительской СМЕ, которая является важной для разработки моделей генерации СМЕ. Определение типа МО и его ориентации в межпланетном пространстве является существенным для изучения воздействия МО на геомагнитную активность.

Для определения свойств МО используют, главным образом, результаты прямых измерений на космических аппаратах. КЛ также можно использовать для этого. КЛ благодаря их высокой мобильности содержат информацию о глобальных свойствах МО и, таким образом, могут предоставлять информацию, которой нет в локальных измерениях. Форбуш-понижения (ФП) являются наблюдаемыми понижениями скорости счета детекторов КЛ (нейтронные мониторы и мюонные телескопы), сопровождающие прохождение ICME через точку измерений (Землю).

МОДЕЛЬ

Магнитное облако представлено в виде петли, соединенной с Солнцем. Магнитное поле облака винтовое, квазибессилое. Термин квазибессилое обозначает, что распределение напряженности и

спиральности магнитного поля в плоскости поперечного сечения облака аналогичны распределениям в решении Лундквиста [Lundquist, 1950]. Максимальная напряженность магнитного поля в поперечном сечении равна 20 нТл. Магнитное облако движется, скорость передней и задней поверхностей равны 500 км/с и 400 км/с соответственно. Продолжительность времени пересечения МО Землей равно 20 ч, что соответствует среднему радиусу поперечного сечения 0.25 а.е. Принятые значения параметров МО соответствуют измерениям [Kilua, 2017]. Взаимодействие МО с солнечным ветром не учитывается. Полагаем, что за пределами МО располагается паркеровский солнечный ветер.

Установлено, что в электрическом индукционном поле движущегося МО кинетическая энергия КЛ систематически уменьшается. Величина потерь энергии КЛ зависит от времени их нахождения внутри МО, которое, в свою очередь, зависит от значений параметров винтового магнитного поля. Уменьшение интенсивности КЛ — амплитуда форбуш-понижения — определяется величиной потерь энергии и формой спектра КЛ, приходящих во внутрь МО из окружающего пространств. Функцию распределения КЛ определяем из решения бесстолкновительного уравнения Больцмана вдоль характеристик. Полагаем, что ФП формируется электромагнитным полем МО без учета рассеяний КЛ. Характеристики уравнения, являющиеся траекториями частиц, определяются решением системы уравнений движения релятивистских частиц. Траектории рассчитываются численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

При расчете характеристик ФП использована модель винтового магнитного поля МО. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены проекции на плос-

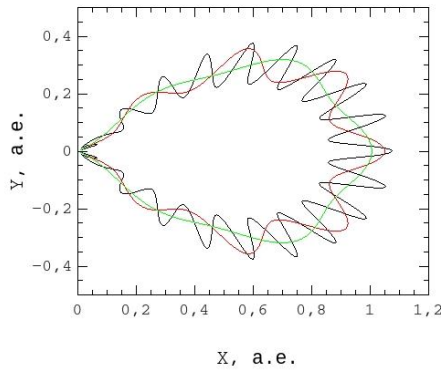


Рис. 1. Проекция магнитных силовых линий на плоскость XOY . Магнитное поле изображено посредством 3-х силовых линий, расположенных на разных расстояниях от поверхности МО

кость XOY гелиоцентрической декартовой системы координат 3-х магнитных силовых линий, расположенных на разных расстояниях от поверхности МО.

На рис. 2 кривые разного цвета представляют изменение амплитуды ФП $A_{ФП}$ на Земле при пересечении МО для КЛ различных энергий. Рисунок показывает, что $A_{ФП, \max}$ связана с кинетической энергией КЛ обратной зависимостью: чем больше энергия, тем меньше $A_{ФП, \max}$.

В теории зависимость объясняется связью между энергией КЛ и временем их перехода из окружающего пространства в МО: чем больше энергия КЛ, тем быстрее они переходят в одну и ту же точку МО и, соответственно, меньше энергии теряют.

На рис. 3 в качестве иллюстрации изображены траектории частиц с энергиями 10 ГэВ (черная кривая) и 20 ГэВ (красная кривая). Частица с энергией 10 ГэВ переходит за 1.6 часа и при этом относительное изменение ее импульса $\Delta p / p_0 = -0.7\%$. Соответствующие величины для частицы с энергией 20 ГэВ равны 0.9 часа и $\Delta p / p_0 = -1.6\%$. Здесь p_0 — начальный импульс.

Рассчитанный энергетический спектр ФП в интервале энергий 5–100 ГэВ представлен на рис. 4 красной кривой. Синяя кривая — аппроксимация рассчитанного спектра, в случае представления в показательной форме показатель степени равен -1.5 . Черные кривые изображают спектр ФП, зарегистрированных в нескольких событиях мюонными детекторами в Якутске в период 2011–2012 гг. [Григорьев, 2014]. В теории $A_{ФП, \max}$ зависит от параметров МО,

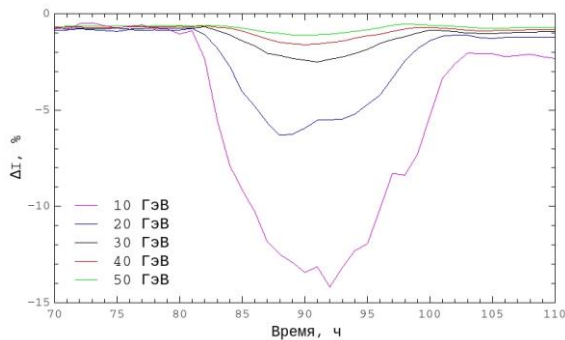


Рис. 2. Зависимость амплитуды форбуш-понижения от времени для различных энергий

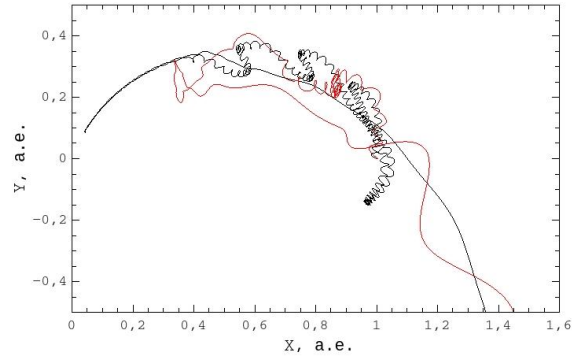


Рис. 3. Траектории частиц различной энергии в магнитном облаке в плоскости XOY . Черная кривая — 10 ГэВ, красная кривая — 20 ГэВ

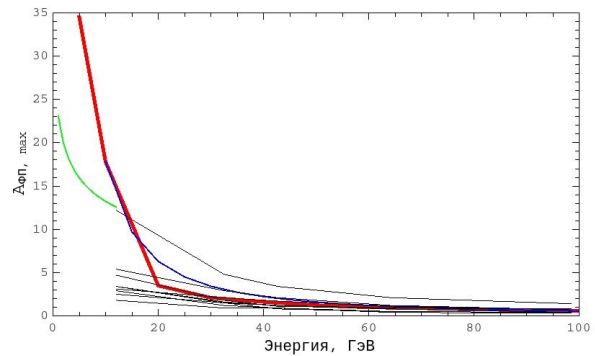


Рис. 4. Максимальные амплитуды форбуш-понижения в зависимости от энергии. Красная линия — результат расчета, синяя линия — аппроксимация результатов расчета, черные линии — экспериментальные данные, зеленая линия — спектр форбуш-понижения в событии 14 февраля 1978 г. [Raghav, 2014]

таких как: напряженность магнитного поля, скорости и градиента скорости движения, площади поперечного сечения, углового размера по долготе. Поэтому спектр ФП может меняться от события к событию.

На рис. 4 зеленая кривая представляет спектр ФП в области энергий 1–10 ГэВ в событии 14.02.1978 [Raghav, 2014]. В теории $A_{ФП, \max}$ зависит от спектра галактических КЛ, приходящих в МО. В расчете принято, что функция распределения КЛ описывается степенной функцией от импульса с показателем $\gamma=4.7$. При энергиях КЛ больших 10 ГэВ форма функции распределения КЛ не меняется, поэтому спектр ФП в этой области энергий зависит только от значений параметров МО. В области энергий 1–10 ГэВ величина показателя спектра КЛ по абсолютной величине уменьшается, что приводит к уменьшению $A_{ФП, \max}$. Кроме того, величина показателя спектра КЛ в этой области энергий зависит от уровня солнечной активности: при высокой активности величина γ меньше по сравнению с низкой активностью. Соответственно меняется показатель спектра ФП: при высокой солнечной активности показатель спектра меньше, чем при низкой активности при прочих одинаковых значениях параметров МО.

В последующем мы планируем определить правила сопоставления результатов расчета характеристик ФП с измерениями отдельных детекторов. Поскольку в расчете используется функция распреде-

ления частиц во всем угловом пространстве, в то же время в измерениях проявляется только его часть, которая зависит от энергии геомагнитного обрезания, географического расположения, времени суток, геометрических размеров детектора.

ВЫВОД

Разработанная теория формирования ФП в МО удовлетворительно согласуется с энергетическим спектром ФП, определенным по измерениям наземных детекторов КЛ.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации и Сибирским отделением Российской академии наук (проект П.16.2.2.). Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-32-00064).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Исаков Д.Д. Энергетический спектр форбуш-понижений на фазе роста 24-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 3. С. 304–309.

Kilpua E., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space // Living Rev. Solar Phys. 2017. V. 14, N 1, id. 5.

Lundquist S. Magnetohydrostatic fields // Ark. Fys. 1950. V. 2. P. 361.

Raghav A., Bhaskar A., Lotekar A., et al. Quantitative understanding of Forbush decrease drivers based on shock-only and CME-only models using global signature of February 14, 1978 event // J. Cosmology and Astroparticle Physics. 2014. V. 10, id. 074.