Форбуш-понижения в магнитном облаке

*Петухова А.С., м.н.с,
Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской Академии наук,
г. Якутск,
E-mail: petukhova@ikfia.ysn.ru*

*Научный руководитель:
д.ф.-м.н. Петухов С.И.*

Аннотация

Рассчитана временная динамика функции распределения космических лучей в магнитном облаке, имеющем в начальный момент времени форму сегмента тора с характерной (бессиловой) структурой магнитного поля. Форма облака при последующем распространении, в межпланетном пространстве, определяется на основе инерциального приближения. Магнитное поле облака определяется условием вмороженности. При расчете функции распределения частиц учитывается электромагнитное поле облака, рассеяние частиц не учитывается. Получены соотношения между функцией распределения частиц и 2-мя ее моментами (плотность частиц, однонаправленная анизотропия). Выявлено, что потери космических лучей в областях, связывающих магнитное облако с Солнцем, определяют амплитуду второй ступени Форбуш понижения. Установлена зависимость временной динамики характеристик Форбуш понижения от типа магнитного облака. Результаты расчета плотности числа частиц и однонаправленной анизотропии, в общем, соответствуют измерениям. Представленные результаты свидетельствуют об определяющей роли структуры магнитного поля облака во временной динамике Форбуш понижения.

Введение

Межпланетные выбросы коронального вещества (ICMEs) оказывают сильное воздействие на состояние околоземного пространства, геомагнитную активность и пространственное распределение космических лучей (КЛ) в межпланетном пространстве. Внутри ICMEs могут располагаться магнитные облака, которые занимают значительную часть их объема. Магнитное облако (МО) представляет собой крупномасштабную магнитную петлю, соединенную с Солнцем концами. Согласно принятой терминологии, области петли, находящиеся на Солнце, называются «ноги».

При определении свойств МО, в основном, используют результаты прямых измерений на космических аппаратах [1]. Для определения свойств МО также используют КЛ. КЛ, вследствие их высокой мобильности, содержат сведения о глобальных свойствах МО, которые, таким образом, могут выявить информацию о МО, которая не может быть измерена локально. Форбуш понижение (ФП) это наблюдаемое понижение в измеряемом диапазоне детекторов КЛ (нейтронные мониторы, мюонные телескопы), связанное с прохождением ICME через точку наблюдения (Земля).

В настоящее время не существует общепринятого заключения о вкладе МО в механизм ФП. К примеру, Zhang и Burlaga [2] отрицают вклад МО в амплитуду ФП. С другой стороны, Kuwabara и др. [3] пришли к выводу о важном вкладе МО в амплитуду

ФП. Richardson и Cane [4] считают, что турбулентный слой и МО в равной степени определяют амплитуду ФП.

В этой работе мы представляем результат расчета Форбуш понижения в МО с тороидальной структурой магнитного поля.

Модель

В модельных расчетах МО в начальный момент времени представляем в виде сегмента тора, а его магнитное поле удовлетворяет решению [5].

Мы предполагаем, что МО заморожено в плазму ICME, каждый элемент которого движется радиально в гелиоцентрической системе координат.

Компоненты магнитного поля, во время распространения МО, вычисляются согласно условию замороженности, представляющему сохранение магнитного потока через площадки, связанные с лагранжевыми частицами. Мы предполагаем, что между МО и солнечным ветром нет взаимодействия.

Рисунок 1. Скетч формы сегмента тора, представленный одной силовой линией, находящейся вблизи его поверхности, для одного момента времени. Силовая линия соответствует решению Миллера, Тернера в начальный момент времени и определена согласно условию замороженности во второй момент времени. Ось сегмента лежит в плоскости XOY , $R/r=10$, где R, r – радиусы оси и поперечного сечения тора. Угловая ширина равна $\pi/2$. Длина оси на орбите Земли составляет $\pi/2$, а.е.

Метод расчета

МО является глобальной петлевой структурой, которая соединена с Солнцем. Из расчета траекторий частиц следует, что КЛ могут многократно перемещаться из одной ноги в другую, удерживаясь внутри МО длительное время [6]. В этом случае неоднородность магнитного поля МО, особенно сильная в области ног, может приводить к перемешиванию частиц в сегменте, т.е. к изотропии и однородности по пространству функции распределения.

В модели расчета, мы представляем МО как сегмент тора (рисунок 1), который в целом соответствует центральной части реального МО. В каждый момент времени внутри МО существуют две группы КЛ: 1. траектории частиц, которые начинаются в окружающем пространстве; 2. траектории, которые начинаются в торцах тора. Функция распределения первой группы КЛ рассчитывается точно, а функция распределения второй группы вычисляется приблизительно. Чтобы учесть влияние ног на

распространение КЛ внутри МО, введем следующие утверждения: 1) поток частиц, выходящий из торцов, равен потоку частиц, вернувшегося обратно, с учетом потерь – влияние ног; 2) функция распределения вернувшихся частиц на торцах изотропна и однородна по сечению из-за влияния неоднородного поля.

Для сопоставления результатов модельных расчетов с измерениями необходимо установить соотношения между функцией распределения и ее моментами:

$$f(\vec{p}) = f_0(p) + \vec{n}\vec{b}$$

где f – функция распределения, f_0 , $\vec{b}$ – изотропная и анизотропная части функции распределения; $\vec{n}$ – единичный вектор направления движения частицы. Из соотношения мы определяем f_0 , $\vec{b}$ домножив на различные тригонометрические функции углов и интегрируя по телесному углу

$$f_0 = 1/4\pi \int f d\Omega, \vec{A} = -(\vec{b}/f_0) 100\%,$$

где f_0 – плотность усредненной по телесному углу функции распределения, которая с точностью до множителя совпадает с плотностью числа частиц – нулевой момент; $\vec{A}$ – анизотропия функции распределения $d\Omega$ – дифференциал телесного угла.

Результаты расчета

Для сегмента тора, использованного в иллюстративном расчете, приняты следующие параметры начального состояния: радиус сечения тора $0.043r_e$ (r_e – астрономическая единица), ось тора расположена в плоскости солнечного экватора на расстоянии $0.457r_e$ от Солнца; угловая ширина сегмента $\pi/2$; напряженность магнитного поля на оси тора 20 нТ; расширение тора при его радиальном движении производится сферически симметричным выбросом, скорости лагранжевых частиц которого в пределах тора распределены линейно по радиусу от 500 до 400 км/с. МО окружает паркеровский солнечный ветер. Взаимодействие МО с солнечным ветром не учитывается. Ось тора находится в плоскости X0Y системы координат. Кинетическая энергия частиц $\varepsilon_k = 10$ ГэВ (10.9 ГВ).

На рисунке 2а, 2б показаны результаты расчета пространственного распределения амплитуды ФП и компонент анизотропии вдоль прямой линии для одного момента времени. Момент времени соответствует $1 r_e$. Пространственное распределение при x от $1.2 r_e$ до $0.8 r_e$ соответствует временной зависимости параметров ФП во время прохождения МО Земли. Параметры ФП зависят от коэффициента потери частиц на концах тора: чем больше потери, тем больше параметры. Амплитуда ФП слабо зависит от типа МО.

На рисунке 2а представлена амплитуда ФП $A_{FD} = ((f_0 - f_{00})/f_{00})100\%$, где f_{00} – плотность функции распределения за пределами МО. Кривая соответствует $\xi = 0.05$, где ξ – коэффициент потерь. Можно отметить, что размер области ФП существенно меньше поперечного размера МО. Однако в реальных событиях ФП наблюдаются на протяжении всего МО или даже дольше [7]. В нашей модели ФП отсутствует в течение $(0.9-0.94) r_e$ и $(1.06-1.09) r_e$, так как: 1. КЛ, которые недавно вошли в МО еще не испытали его эффект. 2. Функция распределения КЛ вне МО является изотропной и однородной в пространстве. В реальных событиях функция распределения неизотропная и неоднородная из-за влияния турбулентной области. На рисунке 2б показаны компоненты анизотропии. МО определяет поведение компонент анизотропии.

В работах [Abunin et al., 2013; Belov et al., 2015] приведены результаты анализа поведения плотности и векторной анизотропии КЛ с жесткостью 10 GV (9 ГэВ) в 99 событиях 23-го и 24-го солнечных циклов, в которых было установлено присутствие МО. В данной выборке выделено характерное поведение плотности и анизотропии в МО: 1. максимальная величина $A_{ФП}$ заключена в пределах 1-12%; 2. анизотропия существенно меняется при входе и/или выходе из МО; 3. внутри МО часто наблюдается систематическое изменение анизотропии; 4. для экваториальной компоненты анизотропии характерно вращение; 5. северо-южная компонента анизотропии часто меняет знак в окрестности центра МО. 6. Плотность КЛ изменяется внутри МО, формируя почти симметричную картину с минимумом плотности КЛ в центре МО. Как видно из результатов, представленных на рисунках 2а, 2б модельные расчеты, в общем, воспроизводят наблюдаемое в МО поведение плотности и однонаправленной анизотропии, представленной в Таблице 1 статьи [7].

Рисунок 2. Амплитуда ФП в зависимости в пространстве (2а). Коэффициент потерь $\xi = 0.05$. Штрихованные вертикальные линии обозначают границ МО. Тип облака южно-западно-северный. Компоненты однонаправленной анизотропии в пространстве (2б). Черная, красная и зеленая кривые соответствуют $A_{x,y,z}$ компонентам анизотропии

Выводы

1. Предложены и реализованы кинематическая модель для определения динамики МО, расположенного в неоднородном потоке вещества, и метод расчета компонент магнитного поля в нем.
2. Предложен и реализован метод вычисления функции распределения частиц в электромагнитном поле, основанный на расчете траекторий.
3. Рассчитана временная динамика плотности, однонаправленной анизотропии в тороидальной модели МО, в целом, согласующейся с измерениями.

Список литературы:

1. Burlaga L F 1988 JGR 93(A7) 7217.
2. Zhang G & Burlaga L F 1988 JGR 93 2511.
3. Kuwabara T, Bieber JW, Evenson P, et al. 2009 JGR 114 A05109.
4. Richardson I G & Cane H V 2011 Sol. Phys. 270 609.
5. Miller G & Turner L 1981 Physics of Fluids 24 363.
6. Krittinatham W & Ruffolo D 2009 ApJ 704 831.
7. Belov A, Abunin A, Abunina M et al. 2015 Solar Physics 290.5 1429.