

ВОЗДЕЙСТВИЕ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ НА ПЛОТНОСТЬ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

А.В. Белов, А.А. Абунин, М.А. Абунина, Е.А. Ерошенко, В.А. Оленева, В.Г. Янке

THE IMPACT OF MAGNETIC CLOUDS ON COSMIC RAY DENSITY

A.V. Belov, A.A. Abunin, M.A. Abunina, E.A. Eroshenko, V.A. Oleneva, V.G. Yanke

В данной работе исследуются особенности поведения галактических космических лучей в событиях, связанных с присутствием магнитных облаков в межпланетных возмущениях у Земли. Рассмотрена модель, способная описать распределение плотности космических лучей внутри магнитного облака, и показано, что в большинстве случаев (но не во всех) поведение плотности космических лучей в магнитном облаке у Земли можно описывать простой параболической зависимостью от расстояния до центра облака, измеренного в гирорадиусах.

In this paper we investigate the behavior of galactic cosmic rays in the events related to the presence of magnetic clouds in the interplanetary disturbances near the Earth. A model capable of describing the distribution of the cosmic-ray density in the magnetic clouds, and it was shown that in most cases (but not all) the behavior of the density of cosmic rays in the Earth magnetic cloud can be described by a simple parabolic dependence on the distance to the center of the cloud measured in gyroradius.

Введение

Магнитные облака тесно связаны с Форбуш-понижениями (ФП) космических лучей (КЛ) [Barnden, 1973; Белов и др., 1976]. Поскольку ФП возникают при расширении частично закрытых магнитных структур в солнечном ветре [Lockwood, 1971; Belov, 2009], а МО – это наиболее очевидный пример такой структуры, естественно ожидать наиболее глубокое падение плотности КЛ именно внутри магнитных облаков. На этом основана концепция двухступенчатых ФП [Barnden, 1973], в которой второй, более глубокий, спад плотности связан с МО. В данной работе для исследований использовались данные по плотности КЛ определенной жесткости за пределами атмосферы и магнитосферы Земли, полученные методом глобальной съемки (GSM) [Belov et al., 2005]. Было исследовано 99 событий, что позволило провести статистический анализ. Часто Форбуш-эффекты (ФЭ) развиваются внутри МО, но статистику влияния таких структур на КЛ до последнего времени никто не изучал. Первые шаги в этом направлении сделаны в работе [Абунина и др., 2013].

По-видимому, значительная часть магнитных облаков, наблюдаемых у Земли, имеют квазицилиндрическую геометрию. Это согласуется и с современными представлениями о том, что внутренняя часть СМЕ — это первоначально солнечное волокно, устроенное как длинный цилиндр, жгут (fluxrope). Это согласуется и с наблюдениями возмущений солнечного ветра у Земли и с успешными попытками моделировать магнитные облака как цилиндрические образования. Речь, разумеется, идет не обо всем облаке, а о его небольшой околоземной части.

В данной работе при моделировании мы рассматриваем поведение только изотропной части вариации КЛ, т. е. плотности КЛ. Естественно предполагать, что именно в магнитном облаке (вследствие его расширения и относительной изолированности) механизм, создающий Форбуш-понижение, будет особенно эффективен. В этом случае вблизи центральной оси цилиндра должен наблюдаться минимум плотности КЛ, а к поверхности цилиндра плотность должна повышаться. Простейшей функцией, способной отобразить такое распределение, является парабола. В теоретических моделях решение дается

более сложными функциями, но можно показать, что в первом, достаточно хорошем, приближении они совпадают с параболой.

Данные и методы

Для анализа событий использовался каталог ICMEs [Richardson, Cane, 2010] за 1996–2009 гг., в котором представлены основные параметры межпланетных возмущений, их солнечные источники и сопутствующие геомагнитные эффекты. Мы отобрали те ICMEs, которые вошли в список магнитных облаков WIND http://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html и/или перечислены в [Gosling, 1990; Huttunen et al., 2005]. Созданная в ИЗМИРАНе база данных по Форбуш-эффектам (ФЭ) основана на вариациях плотности и анизотропии КЛ с жесткостью 10 ГВ, полученных вариантом метода глобальной съемки (GSM) [Belov et al., 2005] по данным мировой сети нейтронных мониторов. Такие вариации плотности и анизотропии космических лучей намного удобнее и эффективнее для исследования гелиосферных процессов, чем данные любого отдельного детектора КЛ, поскольку GSM метод позволяет получать характеристики КЛ за пределами атмосферы и магнитосферы Земли. База данных ИЗМИРАН включает различные параметры межпланетных возмущений и вариаций космических лучей (плотность, анизотропия и др.), а также индексы геомагнитной активности и солнечные параметры.

Обсуждение результатов

В выборку ICMEs с МО, наблюдавшихся у Земли в 23–24 солнечных циклах, попали 99 событий. Магнитные облака — это структуры с усиленным межпланетным магнитным полем, но это усиление бывает и весьма значительным (до 57 нТл), и очень скромным (до 8 нТл).

Чтобы понять, как зависит модуляция КЛ от наличия магнитных облаков, мы сравнили обсуждаемую выборку с МО с контрольной выборкой. В нее были включены события того же периода (1996–2009 гг.) с похожими межпланетными характеристиками (произведения максимальных величин модуля ММП и скорости солнечного ветра), но без МО. Сравнение средних характеристик основной (с МО) и контрольной выборок показывает, что ICME с МО

Средние параметры КЛ, межпланетного пространства и геомагнитной активности для возмущений с МО и без МО

Параметр	Среднее для выборки с МО	Среднее для контрольной выборки (без МО)
A_F	3.36 ± 0.37	1.91 ± 0.16
D_{min}	-0.93 ± 0.11	-0.44 ± 0.03
B_m	20.21 ± 1.07	18.01 ± 0.33
V_m	551.5 ± 16.5	652.2 ± 9.1
$V_m B_m$	6.05 ± 0.54	5.79 ± 0.07

значительно эффективнее модулируют КЛ, создавая более глубокие ФП с более быстрым спадом плотности и с большей величиной анизотропии КЛ. В таблице для более наглядного сравнения сведены средние значения полученных параметров для обеих групп событий.

Моделирование плотности космических лучей в магнитных облаках

Мы используем данные об изменении плотности КЛ, полученные за каждый час методом глобальной съемки. Поскольку плазма ICME распространяется практически радиально, мы получаем почти радиальный разрез (точнее сказать, прокол) изучаемого распределения плотности. Этот прокол может в общем случае произвольно располагаться в цилиндре, но это не ограничивает применимость параболического представления плотности. Но, моделируя среднечасовые данные, надо помнить, что Земля, пересекая межпланетное возмущение, проходит за час разное расстояние в соответствии со скоростью этой части возмущения. Не менее важно учитывать специфику космических лучей. Для заряженных частиц расстояния измеряются не в километрах или астрономических единицах, а в ларморовых радиусах (гирорадиусах) ρ , которые определяются жесткостью частиц R и напряженностью межпланетного магнитного поля B . Протяженное магнитное облако со слабым магнитным полем может оказывать на космические лучи большее влияние, чем облако узкое, но с сильным полем. Можно записать, что за час наблюдатель проходит в межпланетном возмущении (в частности, в магнитном облаке) $X_\rho = cVB/R$ гирорадиусов, где V — радиальная скорость солнечного ветра. При переходе от линейных размеров к гирорадиусам можно ожидать более симметричных распределений плотности КЛ в магнитном облаке, как это видно из рис. 1.

Второе важное обстоятельство, которое следует учитывать, изучая влияние магнитного облака на космические лучи по наземным данным, — это магнитосферные вариации КЛ [Dogman, 2010] во время магнитных бурь, когда Земля находится в МО. Главная их часть обусловлена изменением жесткости геомагнитного обрезания в пунктах наблюдения. С учетом сказанного, ожидаемую вариацию плотности КЛ в магнитном облаке можно записать так:

$$\delta = \frac{\Delta N}{N} = a + b_1 X + b_2 X^2 + b_d D_{st} \quad (2)$$

где a — постоянная, b_1 — трендовый коэффициент, b_2 — отражает основную часть влияния МО на КЛ, b_d определяет вклад магнитосферы.

Эту простую модель мы применили ко всем 99 событиям нашей выборки, каждый раз определяя пара-

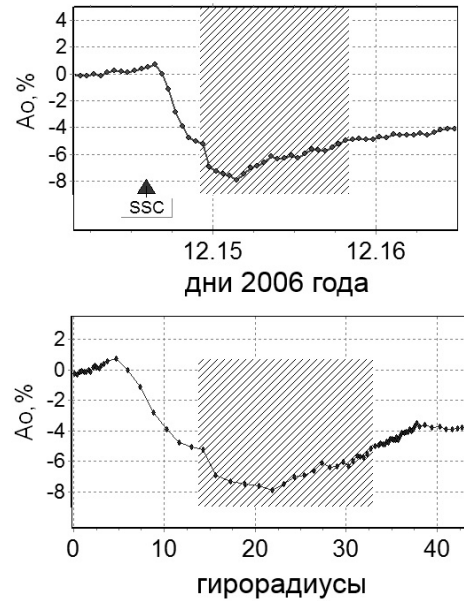


Рис. 1. Пример эффекта магнитного облака в КЛ: распределение плотности КЛ (A_0) построено во временной развертке (верхняя панель) и в зависимости от гирорадиуса частиц с жесткостью 10 ГВ. Заштрихованная область показывает размеры МО в данном событии (2006.12.14). Треугольником отмечено начало магнитной бури.

метры a , b_1 , b_2 , b_d . Пример модельного представления вариаций плотности КЛ в магнитном облаке дает рис. 2.

Здесь мы видим хорошее согласие рассчитанных и экспериментальных данных. Хорошим, или, по меньшей мере, удовлетворительным, оно оказалось для большинства событий. Но совпадение модельного представления с реальным поведением плотности наблюдалось не всегда. Для такого несовпадения может быть множество причин. Одной из основных является то, что упрощенное представление МО в виде цилиндра в ряде случаев, очевидно, не пригодно. В этих случаях дисперсия σ^2 в методе наименьших квадратов велика, а коэффициент корреляции, напротив, низок. Но надо заметить, что и при низкой дисперсии результатам не всегда можно доверять. Количество часов, которое Земля провела в МО, меняется в нашей выборке от 6 до 64. Ясно, что 6 ч (6 точек) недостаточно, чтобы надежно определить 4 параметра модели. Однако для большинства событий точек хватает. Средняя продолжительность МО в нашей выборке 21 ± 1 час.

Следует отметить, что влияние большинства МО на плотность КЛ (10 ГВ) невелико. Из 74 событий в 41 случае это влияние $< 0.3\%$, а в 50 случаях $< 0.5\%$. Понятно, что такие небольшие эффекты трудно (почти невозможно) выделить по данным одного детектора КЛ. Нам кажется, что все CMEs/ICMEs воздействуют на КЛ. По-другому быть не может. Тем более это справедливо в тех случаях, когда у Земли наблюдается магнитное облако. Однако эффекты CMEs/ICMEs и магнитных облаков часто бывают малы и трудны для обнаружения.

Основные выводы

Присутствие магнитного облака в межпланетном возмущении, как правило, усиливает способность этого возмущения модулировать космические лучи.

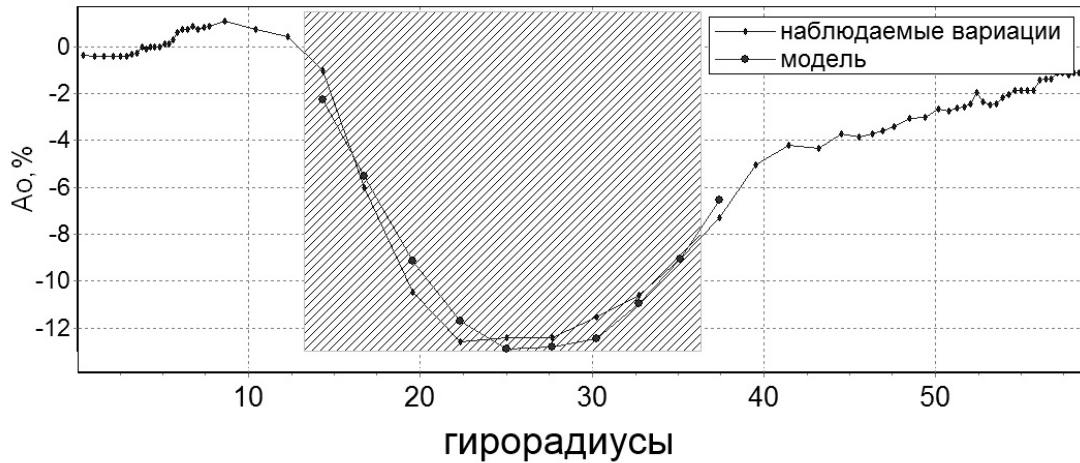


Рис. 2. Пример моделирования МО в событии 2004.07.26. Зависимость распределения плотности КЛ (A_0) в магнитном облаке от гирорадиуса частиц с жесткостью 10 ГВ: треугольники – наблюдаемые вариации КЛ, точки – модельное описание распределения A_0 в данном событии.

В большинстве случаев (но не во всех) поведение плотности КЛ в магнитном облаке у Земли можно описывать простой параболической зависимостью от расстояния от центра МО, измеренного в гирорадиусах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белов А., Дорман Л., Ерошенко Е. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1976. Т. 16, № 5. С. 761.
 Abunin A., Abunina M., Belov A., et al. The impact of magnetic clouds on the density and the first harmonic of the cosmic ray anisotropy / Proc. 33-rd ICRC. Rio de Janeiro, Brasil, 2–9 July 2013. ID 198. 2013.
 Barnden L.R. The Large-Scale Magnetic Field Configuration Associated With Forbush Decreases / Proc. 13th ICRC. Denver, USA, 1973. V. 2. P. 1277–1282.
 Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., et al. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. doi:10.1029/2005JA011067.

Belov A. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU257 Symposium. Ed. N. Gopalswamy and D. Webb. 2009. V. 257. P. 439–450.
 Dorman L.I. Cosmic Rays in Magnetospheres of the Earth and other Planets. Dordrecht: Springer, 2010. 770 p.
 Gosling J.T. Coronal Mass Ejections and Magnetic Flux Ropes in Interplanetary Space // Geophys. Monogr. Ser. 1990. V. 58. P. 343–364.
 Huttunen K., Schwenn R., Bothmer V., Koskinen H. Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23 // Ann. Geophys. 2005. V. 23, N 2. P. 625–641.
 Lockwood J.A. Forbush decreases in the cosmic radiation // Space Sci. Rev. 1971. V. 12, N 5. P. 658–715.
 Richardson I., Cane H. Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996–2009): Catalog and Summary of Properties // Solar Phys. 2010. V. 264, N 1. P. 189–237.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия