

ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 1957–2011 гг.

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

PHASE DISTRIBUTION VARIATIONS OF THE FIRST HARMONIC OF COSMIC RAY ANISOTROPY IN 1957–2011

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

Асимметрия межпланетного пространства, определяемая радиальной скоростью солнечного ветра и квазиспиральным положением силовых линий межпланетного магнитного поля, приводит к неоднородному распределению фаз и амплитудно-фазовой взаимозависимости первой гармоники анизотропии космических лучей (КЛ). Для исследования долгопериодных изменений анизотропии КЛ использованы характеристики первой гармоники анизотропии, определенные за каждый час методом глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов в период 1957–2011 гг. За каждый год получены долготные распределения векторной анизотропии КЛ и взаимосвязь ее амплитуды и фазы. Результаты ясно демонстрируют изменения анизотропии, обусловленные магнитным солнечным циклом и циклом солнечной активности. Для возмущенных и спокойных периодов при различных полярностях солнечного магнитного поля получены оценки составляющих градиента плотности КЛ. Полученные изменения анизотропии КЛ согласуются с конвективно-диффузионной моделью анизотропии.

The asymmetry of the interplanetary space defined by the radial velocity of the solar wind and the quasi-spiral position of the interplanetary magnetic field lines leads to non-uniform distribution of the phases and the amplitude-phase interrelation of the cosmic ray anisotropy first harmonic. To study the long term variations of cosmic ray anisotropy the characteristics of its first harmonic defined for each hour by global survey method have been used throughout the period 1957–2011. For each year of this period longitudinal distributions of the cosmic ray vector anisotropy and its amplitude-phase relation were obtained. The results clearly demonstrate variations of anisotropy due to the solar activity and solar magnetic cycles. Evaluations of the cosmic ray gradient components during disturbed and quiet periods at different polarities of the solar magnetic field were derived. The results of this study are consistent with the convection-diffusion model of the anisotropy.

Введение

В солнечном ветре около Земли постоянно наблюдается анизотропия галактических космических лучей (ГКЛ), большая часть которой может быть представлена вектором. Величина и направление этого вектора (первой сферической гармоники анизотропии) хорошо описывается конвективно-диффузионной моделью, предложенной Крымским [Крымский, 1964]. Одним из следствий конвективно-диффузионной модели является амплитудно-фазовая взаимозависимость первой гармоники анизотропии, вначале полученная теоретически [Belov, 1987], а позднее подтвержденная экспериментально [Belov et al., 1991].

Долгопериодные изменения анизотропии космических лучей (КЛ) изучались во многих работах. В данной работе авторы проводят систематические исследования долгопериодных изменений амплитудно-фазовой взаимозависимости и фазового распределения анизотропии в спокойные и возмущенные периоды во время различных полярностей общего магнитного поля Солнца (07.1957–01.1958, 08.1971–11.1979 и 08.1991–11.1999 г. – периоды с положительной полярностью; 01.1960–08.1969, 07.1981–12.1989 и 01.2001–12.2011 г. – периоды с отрицательной полярностью) и при разных скоростях солнечного ветра. Используются данные за 55 лет (1957–2011 гг., пять солнечных циклов). За каждый год этого периода получены долготные распределения векторной анизотропии КЛ и взаимосвязь ее амплитуды и фазы.

Используемые данные и методы обработки

В работе использовалась созданная в ИЗМИРАНе база данных по вариациям КЛ. Вариации плотности и анизотропии КЛ с жесткостью 10 ГВ были полу-

чены методом глобальной съемки (GSM) [Belov et al., 2005] по данным сети нейтронных мониторов. Эта база данных включает различные показатели межпланетной среды (параметры солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и др.), КЛ (плотность, анизотропия и др.), а также индексы геомагнитной активности и солнечные параметры. Мы использовали среднечасовые характеристики базы данных для КЛ с жесткостью 10 ГВ. При работе с данными не использовались часы, во время которых наблюдалось наземное возрастание (GLE, ground level enhancement).

Обсуждение результатов

Средние распределения

На рис. 1 показаны фазовое (долготное) распределение первой гармоники анизотропии КЛ и зависимость ее амплитуды от фазы. Чтобы получить приведенные точки, долготы были разбиты на интервалы по 10° , а искомые значения получены путем усреднения внутри каждого интервала. Максимум распределения фаз (распределения количества часов наблюдения определенной фазы за все время, N_{\max}) приходится приблизительно на 95° , т. е. на направление с востока. Приблизительно там же находится максимум амплитуды анизотропии ($A_{xy \max}$).

Эти гладкие зависимости – результат усреднения за большой период. Здесь объединены данные за 477 226 часов, что объясняет малые величины стандартных статистических погрешностей, приведенных на рисунке.

Полученное общее распределение существенно неоднородно, что соответствует предсказаниям упрощенного варианта конвективно-диффузионной модели анизотропии [Belov, 1987]. Это совпадение, в первую очередь, означает, что основную часть времени

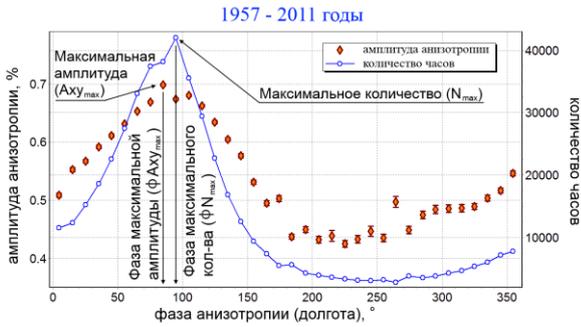


Рис. 1. Амплитудно-фазовая взаимозависимость солнечно-суточной анизотропии A_{xy} и ее фазовое распределение за 1957–2011 гг.

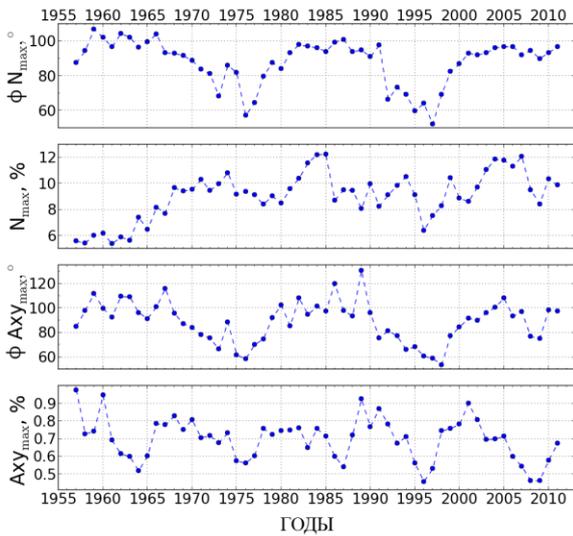


Рис. 2. Временные зависимости параметров анизотропии. Положение максимума фазового распределения анизотропии ($\phi_{N_{max}}$), доля часов, приходящихся на максимум распределения (N_{max}), максимальная величина ($A_{хуmax}$) и фаза максимума ($\phi_{Ахуmax}$) суточной компоненты анизотропии КЛ.

времени сохраняется квазиспиральная структура межпланетного магнитного поля, а скорость солнечного ветра относительно стабильна.

Временные зависимости

Ясно, что в разные периоды результаты могут быть различными, например, в зависимости от магнитного цикла Солнца или цикла солнечной активности. Чтобы проверить это предположение, были получены амплитудно-фазовые зависимости и фазовые распределения для каждого года в отдельности.

На рис. 2 показаны временные зависимости параметров анизотропии. На верхней панели представлено положение максимума фазового распределения анизотропии, на второй панели сверху показана доля часов, приходящихся на максимум распределения. На двух нижних панелях построены аналогичные зависимости для максимальной величины и фазы максимума амплитудно-фазовой зависимости анизотропии.

Можно четко выделить 11-летние вариации в распределении максимума анизотропии и частоты появления определенной фазы и 22-летние вариации в изменении фазы для обоих параметров. Таким образом, эти параметры ведут себя подобно амплитуде

и фазе первой гармоники анизотропии [Forbush, 1969; Belov et al., 1991].

Распределения при различных условиях

Попробуем понять, как на полученные распределения влияют основные солнечные характеристики и условия в межпланетном пространстве. Для этого мы провели расчеты для спокойных периодов при различных полярностях общего магнитного поля Солнца и для возмущенных периодов при относительно активном Солнце. Зависимость фазы анизотропии от солнечного магнитного цикла хорошо проявляется вблизи минимума солнечной активности, что ясно видно на рис. 3, а, б. Чтобы получить эти рисунки, выбирались часы с индексом $A_p < 10$ в дни, когда число солнечных пятен (SSN) было ≤ 50 , для периодов с отрицательной и положительной полярностями общего магнитного поля Солнца соответственно.

При отрицательной полярности общего магнитного поля (рис. 3, а) максимум распределения фаз находится около 95° , максимум амплитуды анизотропии – около 105° . Для положительной полярности (рис. 3, б) максимум распределения фаз и максимум амплитуды анизотропии находятся в области $50-70^\circ$. Однако на рис. 3, б при положительной полярности общего магнитного поля виден второй (значительно меньший) максимум в амплитуде анизотропии в диапазоне $200-260^\circ$. Это может быть связано с аномальным 1996 годом и подобными периодами, когда амплитуда анизотропии была невелика и ее фазовая зависимость не имела ярко выраженного максимума [Belov, 1999].

Для исследования возмущенных периодов были выбраны часы с $A_p > 20$ независимо от количества пятен и полярности общего магнитного поля Солнца. В активные периоды (рис. 3, в) максимум распределения фаз находится около 95° , максимум амплитуды анизотропии – около 85° . Однако на долготах $260-270^\circ$ возникает еще одно увеличение амплитуды. Эта особенность может объясняться тем, что в возмущенные периоды градиент плотности КЛ не только возрастает, но и меняет направление. Если в спокойные периоды радиальная составляющая градиента (а также составляющая вдоль поля) всегда положительна, то внутри межпланетных возмущений она иногда становится отрицательной. В результате этого и направление анизотропии может измениться на почти противоположное обычному. В это же время широтная и азимутальная составляющие градиента также существенно возрастают и вносят свой вклад в анизотропию.

Из найденных распределений (рис. 3) были получены оценки радиальной и широтной составляющих градиента плотности КЛ по формулам, полученным в [Belov, 1987; Belov et al., 1987]. Результаты согласуются с выводами работы [Chen, Bieber, 1993] о том, что широтное распределение КЛ имеет локальный минимум около гелиосферного токового слоя при положительной полярности общего магнитного поля Солнца. При отрицательной полярности абсолютные величины широтной составляющей градиента плотности КЛ уменьшаются относительно значений при положительной полярности.

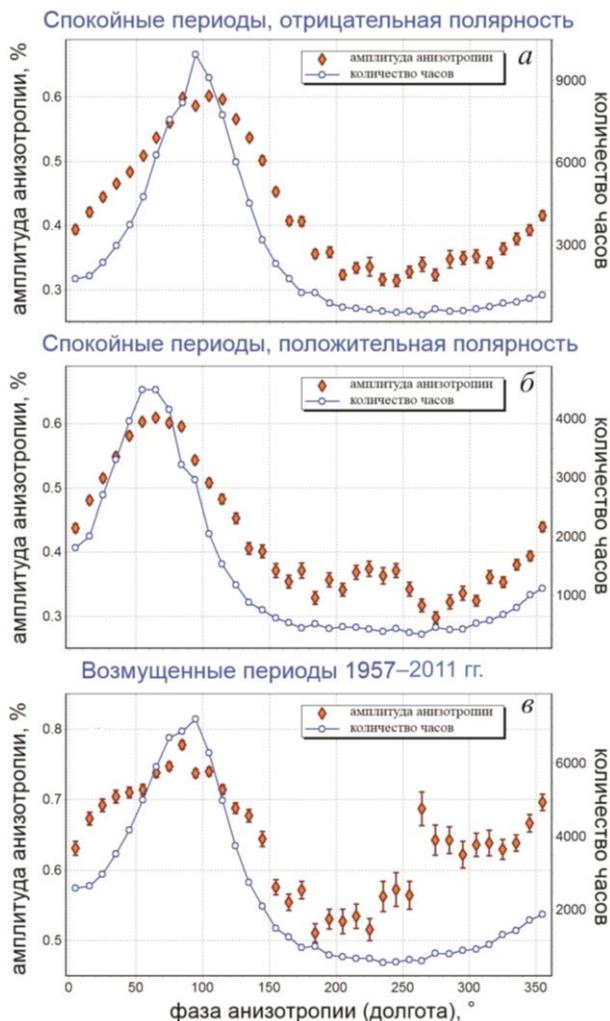


Рис. 3. Амплитудно-фазовая взаимозависимость солнечно-суточной анизотропии и ее фазовое распределение: а – в спокойные периоды при отрицательной полярности (1960–1969, 1982–1989, 2001–2011 гг.); б – в спокойные периоды при положительной полярности (1971–1978, 1992–1999 гг.); в – в возмущенные периоды 1957–2011 гг.

Основные выводы

Изучены фазовые распределения и амплитудно-фазовые зависимости солнечно-суточной анизотропии ГКЛ за большой промежуток времени (1957–2011 гг.). Эти изменения в основном подчиняются 11-летним и 22-летним солнечным циклам.

Существенно неоднородное фазовое распределение и значительная амплитудно-фазовая зависимость существуют почти постоянно, однако в некоторые периоды неоднородность значительно уменьшается. Это происходит в возмущенные периоды и в отдельные периоды низкой солнечной активности при положительной полярности общего магнитного поля Солнца.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 11-02-01478. Авторы благодарны коллективам станций мировой сети космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты [<http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>, <http://www.nmdb.eu/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Крымский Г.Ф. Диффузионный механизм суточной вариации космических лучей // Геомагнетизм и аэрномия. 1964. Т. 4, № 6. С. 977–986.
- Belov A.V. The first harmonic of CR anisotropy in the convection-diffusion model / Proc. 20-th ICRC. Moscow, USSR, 2–15 Aug 1987. V. 4. P. 119–122. 1987.
- Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Oleneva V.A. Cosmic ray gradient variations in 1974 / Ibid. 1987. P. 137–139.
- Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Rudnev Yu.F. The amplitude-phase interrelation and other peculiarities of the first cosmic ray anisotropy harmonic / Proc. 22-th ICRC. Dublin, Ireland, 11–23 Aug 1991. V. 3. P. 457.
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Anomalous behavior of cosmic ray anisotropy in the last minimum of the solar activity / Proc. 26-th ICRC. Salt Lake City, USA, 17–25 Aug 1999. V. 7. P. 268.
- 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.
- Chen J., Bieber J. Cosmic-ray anisotropies and gradients in three dimensions // Astrophys. J. 1993. V. 405, N. 1. P. 375–389.
- Forbush S.E. Variation with a period of two solar cycles in the cosmic-ray diurnal anisotropy and the superposed variations correlated with magnetic activity // J. Geophys. Res. 1969. V. 74, N 14. P. 3451–3468.
- <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.
- <http://www.nmdb.eu/>.

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