

УДК 524.1-352

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ ПЕРВОЙ ГАРМОНИКИ АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2013 г. М. А. Абунина, А. А. Абунин, А. В. Белов, Е. А. Ерошенко, В. А. Оленева, В. Г. Янке

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк, г. Москва
e-mail: abunina@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 22.01.2013 г.

В межпланетном пространстве существуют выделенные направления, определяемые скоростью солнечного ветра и положением силовых линий межпланетного магнитного поля, что приводит к неоднородному распределению фаз и амплитудно-фазовой взаимозависимости первой гармоники анизотропии космических лучей. Для исследования долгопериодных изменений анизотропии космических лучей использованы характеристики первой гармоники анизотропии, определенные за каждый час методом глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов в период 1957–2010 гг. За каждый год этого периода получены долготные распределения векторной анизотропии космических лучей и взаимосвязь ее амплитуды и фазы. Результаты ясно демонстрируют изменения анизотропии, обусловленные магнитным солнечным циклом и циклом солнечной активности. Исследованы также распределения анизотропии при различных скоростях солнечного ветра. Выделяются и обсуждаются периоды со специфическим поведением анизотропии космических лучей. Полученные изменения анизотропии космических лучей согласуются с конвективно-диффузионной моделью анизотропии.

DOI: 10.7868/S0016794013050027

1. 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; Крымский и др., 1981; Forman and Gleeson, 1975]. 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, 1993].

Долгопериодные изменения анизотропии космических лучей (КЛ) изучались во многих работах, например, [Чирков, 1986; Mogaal, 1976; Krymsky et al., 2003; Belov et al., 2006; Крымский и др., 2009]. Уже в начале 50-х гг. прошлого столетия стало известно, что усредненные характеристики вектора анизотропии ГКЛ изменяются с 11- и 22-летней периодичностью [Elliot, 1952]. Позже Скотт Форбуш [Forbush, 1969] обнаружил, что долгопериодные изменения анизотропии отображают основные солнечные циклы.

При выделении и изучении долговременных изменений анизотропии чаще всего использовались данные отдельных наземных детекторов КЛ, из которых выделялась солнечно-суточная вариация, и исследования велись на среднесуточной базе. Крымский и др. [2007] рассмотрели долговременные изменения анизотропии в диапазоне энергий 10–200 ГэВ, ее параметры определялись и по солнечно-суточным вариациям, и методом глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов за 1965–2000 гг. В работе [Белов и др., 2006] авторы использовали среднечасовые характеристики анизотропии КЛ, полученные по данным всей мировой сети нейтронных мониторов и исследовали долговременное поведение первой гармоники анизотропии отдельно в сравнительно спокойные и возмущенные периоды.

Во всех вышеперечисленных работах исследуется изменение амплитуды и фазы анизотропии. Цель данной работы – провести систематические исследования долгопериодных изменений амплитудно-фазовой взаимозависимости и фазового распределения анизотропии в спокойные и возмущенные периоды, во время различных полярностей общего магнитного поля Солнца (с июля 1957 по январь 1958 г., с августа 1971 по ноябрь 1979 г. и с августа 1991 по ноябрь 1999 г. – пе-

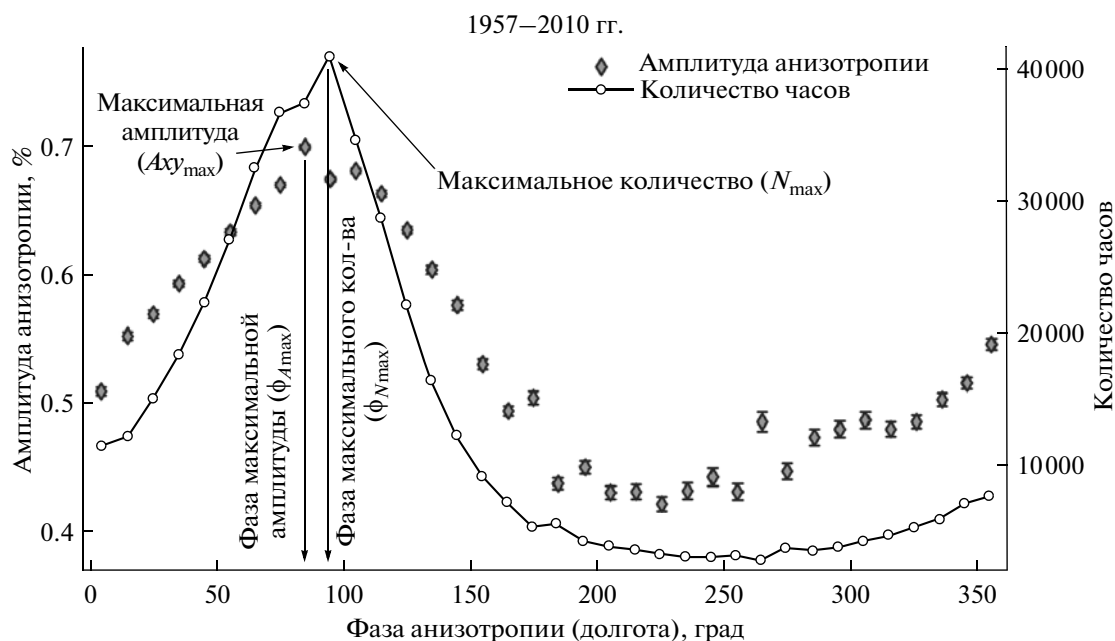


Рис. 1. Амплитудно-фазовая взаимозависимость солнечно-суточной анизотропии A_{xu} и ее фазовое распределение за 1957–2010 гг.

риоды с положительной полярностью; с января 1960 по август 1969 г., с июля 1981 по декабрь 1989 г. и с января 2001 по декабрь 2010 г. — периоды с отрицательной полярностью) и при разных скоростях солнечного ветра. Использованы данные за 54 года (1957–2010 гг.) — пять солнечных циклов. За каждый год этого периода получены долготные распределения векторной анизотропии космических лучей и взаимосвязь ее амплитуды и фазы.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использовалась созданная в ИЗМИРА-Не база данных по вариациям космических лучей. Вариации плотности и анизотропии КЛ с жесткостью 10 ГВ были получены вариантом метода 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.), космических лучей (плотность, анизотропия и др.), а также индексы геомагнитной активности и солнечные параметры. Мы использовали среднечасовые характеристики из базы данных для КЛ с жесткостью 10 ГВ. При работе с данными не использовались часы, во время которых наблюдались наземные возмущения (GLE). В данной работе мы проанализировали составляющую векторной анизотропии КЛ в плоскости земного экватора (ось x направлена от Солнца), имеющую амплитуду A_{xu} и фазу ϕ (угол вектора анизотропии с осью x , отсчитываемый против часовой стрелки). Для сопоставления с

теоретическими моделями предпочтительнее эллиптическая система координат. Однако для перехода в эту систему требуется точно знать A_z -составляющую анизотропии, а абсолютную величину A_z получить не просто [Belov et al., 1990].

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Средние распределения.

На рисунке 1 за 1957–2010 гг. представлено фазовое (долготное) распределение первой гармоники анизотропии КЛ и зависимость ее амплитуды от фазы. Чтобы получить приведенные точки, долготы были разбиты на интервалы по 10° , и 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 ($A_{xu_{\max}}$).

Эти гладкие зависимости — результат усреднения за большой период. Здесь объединены данные за 468 313 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 сохраняется квазиспи-

ральная структура межпланетного магнитного поля, а скорость солнечного ветра относительно стабильна. Разумеется, эти факты хорошо известны и не нуждаются в дополнительном подтверждении со стороны КЛ. Однако следующее следствие полученного неравномерного распределения касается только КЛ. Это распределение свидетельствует о существенном преобладании положительного градиента плотности КЛ и о том, что этот градиент, как правило, имеет небольшую величину. Максимум фазового распределения (8.76%) на рис. 1 оказался в секторе 90–100°. Можно выделить область между 40 и 130°, в которой находится большинство точек (60.4% всего времени), в этой же зоне находятся наибольшие значения амплитуды. Область минимальных значений количества часов расположена между 210 и 300° (6.3% всех точек), а наименьшие амплитуды анизотропии находятся между 180 и 270°.

Определим степень неоднородности фазового и амплитудно-фазового распределения следующим образом:

$$\delta_N = \frac{N90_{\max} - N90_{\min}}{N90_{\max} + N90_{\min}}, \quad (1a)$$

$$\delta_A = \frac{A90_{\max} - A90_{\min}}{A90_{\max} + A90_{\min}}, \quad (1b)$$

где $N90_{\max}$ — это наибольшее количество часов в секторе шириной 90°, $N90_{\min}$, соответственно, наименьшее количество часов в секторе шириной 90°; $A90_{\max}$ и $A90_{\min}$ — наибольшая и наименьшая суммы значений анизотропии в секторе шириной 90°. Величины δ_N и δ_A могут меняться от 0 (полностью однородное распределение) до 1. Для всего периода (рис. 1) получилось $\delta_N = 0.81$, $\delta_A = 0.2$. Эти значения (особенно δ_N) свидетельствуют о существенно неоднородном распределении.

3.2. Временные зависимости.

Ясно, что в различные 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 рисунке 2 показаны временные зависимости параметров анизотропии, отмеченные на рис. 1. 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.

На представленном рисунке можно явно 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, 2006; Swinson, 1995; Krymsky et al., 2003].

Интересно, как со временем меняется степень неоднородности фазового распределения. Оказалось, что величина δ_N (рис. 3), вычисленная для каждого года по формулам (1a, 1b), изменяется в пределах от 0.53 (для 1958 г.) до 0.96 (для 2007 г.), что говорит о высокой неоднородности распределения во все годы. Сектор с максимальной плотностью ($N90_{\max}$) в различные годы располагался в долготной зоне от 0 до 150°, а с минимальной — в пределах от 180 до 320°. Сектор с минимальной величиной анизотропии ($A90_{\min}$) располагался в пределах от 130 до 350°. Сектор с максимальной величиной анизотропии ($A90_{\max}$) — в долготной зоне от 10 до 150°. Единственное исключение — 2003 г., когда в распределении наблюдается два максимума: нормальный (от 30 до 120°) и необычный (от 220 до 310°), и они практически совпадают по величине. Скорее всего, эта особенность обусловлена исключительно большими и эффективными корональными дырами 2003 г., и связанным с ними большим азимутальным градиентом КЛ.

В сектор шириной 90°, в который входит максимальное количество точек по распределению фаз, в разные годы, попадает от 42.4% точек (в 1958 г.) до 77.5% (в 2007 г.). Причем всего 8 лет (1957–1963 и 1996 гг.) имеют меньше 50% точек в этом максимальном секторе. Даже в эти годы степень неоднородности достаточно высока (>0.5), но на фоне большинства лет, когда она >0.8, эту степень неоднородности можно считать аномально низкой. Нужно отметить, что в аномальном периоде объединились годы особо высокой солнечной активности 19-го цикла и спокойный 1996 г., для которого данная аномалия была замечена ранее [Belov et al., 1999]. Естественно предполагать, что чем активнее период, тем меньше степень неоднородности. Достаточно вспомнить, что градиент КЛ в активные периоды больше по величине и значительно более изменчив, чем в спокойные периоды. Частично, аномалия 19-го цикла может быть связана с этим обстоятельством, однако, главная ее причина, скорее всего, методическая. Дело в том, что в 19-ом цикле работали нейтронные мониторы типа IGY малой площади, и их статистическая точность была гораздо ниже, чем у современных нейтронных мониторов. Это не так сильно сказывается на вариациях плотности, определяемых методом глобальной

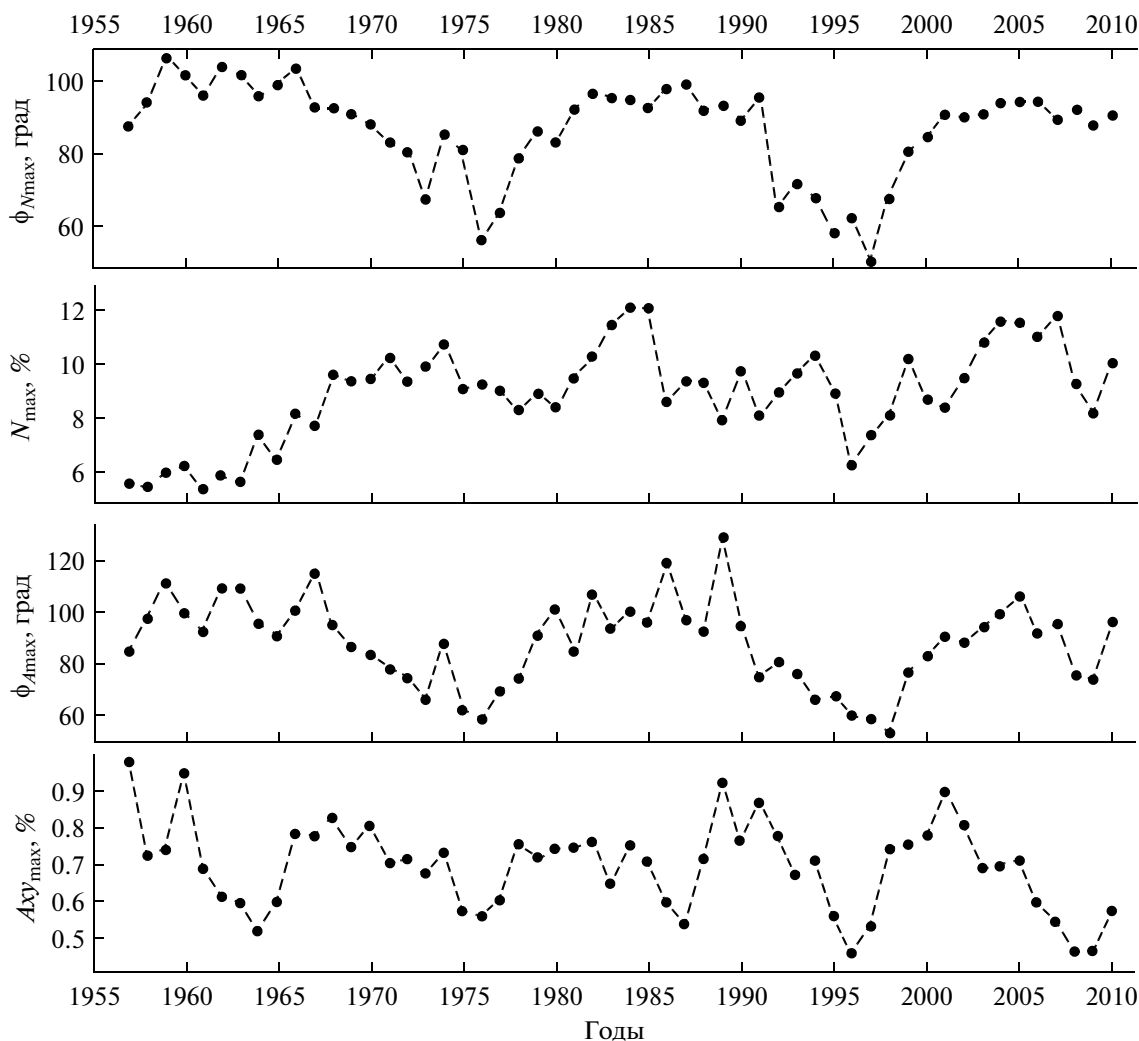


Рис. 2. Временные зависимости параметров анизотропии. Положение максимума фазового распределения анизотропии ($\phi_{N_{\max}}$), доля часов, приходящихся на максимум распределения (N_{\max}), максимальная величина ($A_{hu_{\max}}$) и фаза максимума ($\phi_{A_{\max}}$) суточной компоненты анизотропии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

съемки, но погрешность определения фазы анизотропии сильно зависит от статистической точности отдельных детекторов. До 1963 г. вся мировая сеть нейтронных мониторов была оборудована детекторами малой площади и с 1963 г. до конца 60-х гг. происходила замена старых мониторов на мониторы нового типа (NM64). Эта реорганизация мировой сети отражается в вариациях параметров на рисунках 2 и 3.

3.3. 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.

Зависимость фазы анизотропии от солнечного магнитного цикла хорошо проявляется вблизи минимума солнечной активности, что ясно видно из рис. 4а и 4б. Чтобы получить эти рисунки, выбирались часы с Ap -индексом < 10 в дни, когда число солнечных пятен (SSN) было ≤ 50 , для периодов с отрицательной ($qA < 0$) и с положительной ($qA > 0$) полярностью общего магнитного поля Солнца, соответственно.

При отрицательной полярности общего магнитного поля (рис. 4а) максимум распределения фаз находится около 95° , максимум амплитуды анизотропии — около 105° . Для положительной полярности (рис. 4б) максимум распределения фаз и максимум амплитуды анизотропии находятся в области $50\text{--}70^\circ$. Однако на рис. 4б при положительной полярности общего магнитного поля виден второй (значительно меньший) максимум в амплитуде анизотропии в диапазоне $200\text{--}260^\circ$. Это

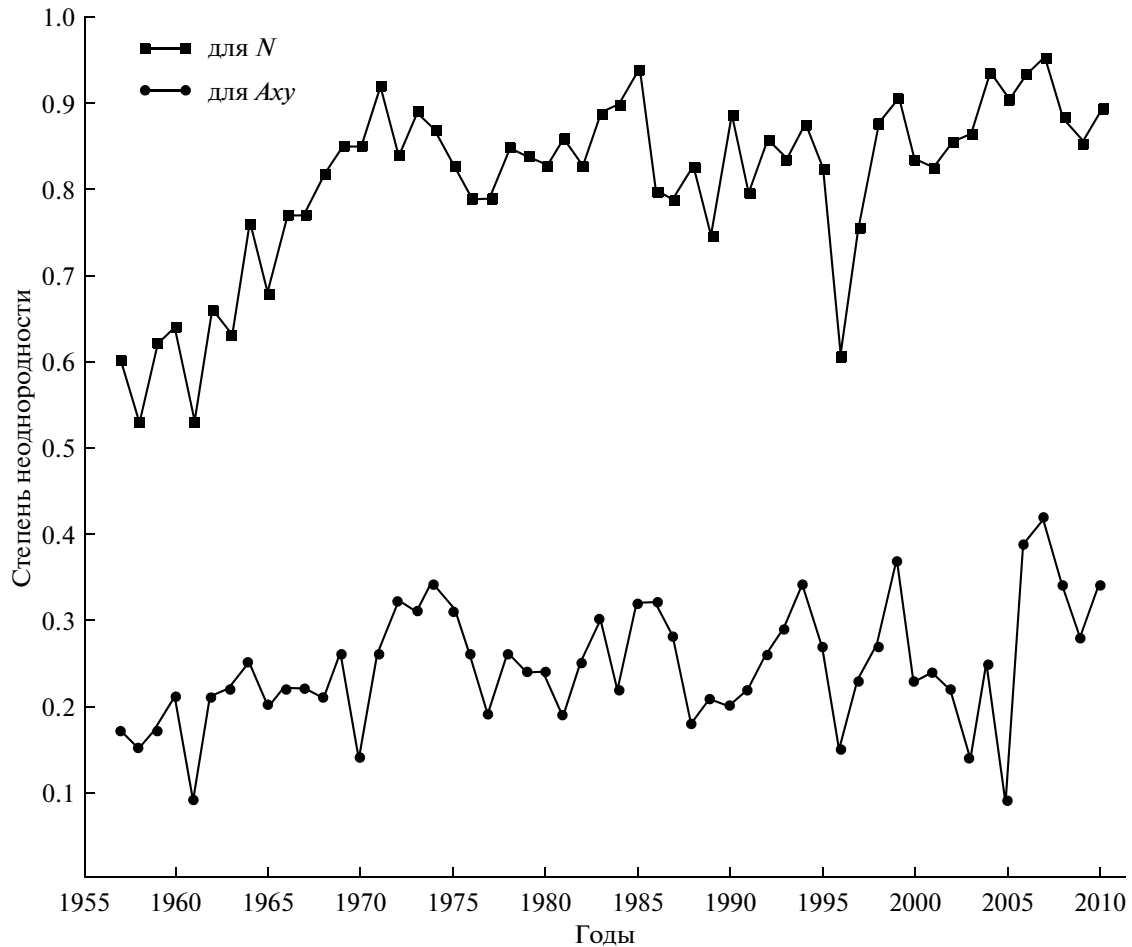


Рис. 3. Зависимость от времени степени неоднородности распределения фаз и амплитуд анизотропии.

может быть связано с аномальным 1996 г. 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 Ar -индексом >20 , независимо от количества пятен и полярности общего магнитного поля Солнца. В активные периоды (рис. 4в) 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 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 гра-

диента также существенно возрастают и вносят свой вклад в анизотропию.

3.4. Оценки градиента космических лучей.

Чтобы из найденных распределений (рис. 4а, 4б, 4в) получить оценки радиальной (G_x) и широтной (G_z) составляющих градиента КЛ, предположим, что вектор анизотропии A_{xy} (с составляющими A_x, A_y) и вектор межпланетного магнитного поля лежат в одной плоскости и используем следующие уравнения [Belov, 1987; Belov et al., 1987]:

$$G_x = \frac{\sqrt{k}}{\rho} ((Ac - Ax) - A_y \operatorname{tg} \psi),$$

$$G_z = \frac{\sin \psi}{\rho} (\sqrt{1-k}) \left(Ax - Ac - \frac{\frac{1}{1-k} + k \operatorname{tg} \psi}{1-k} A_y \right),$$

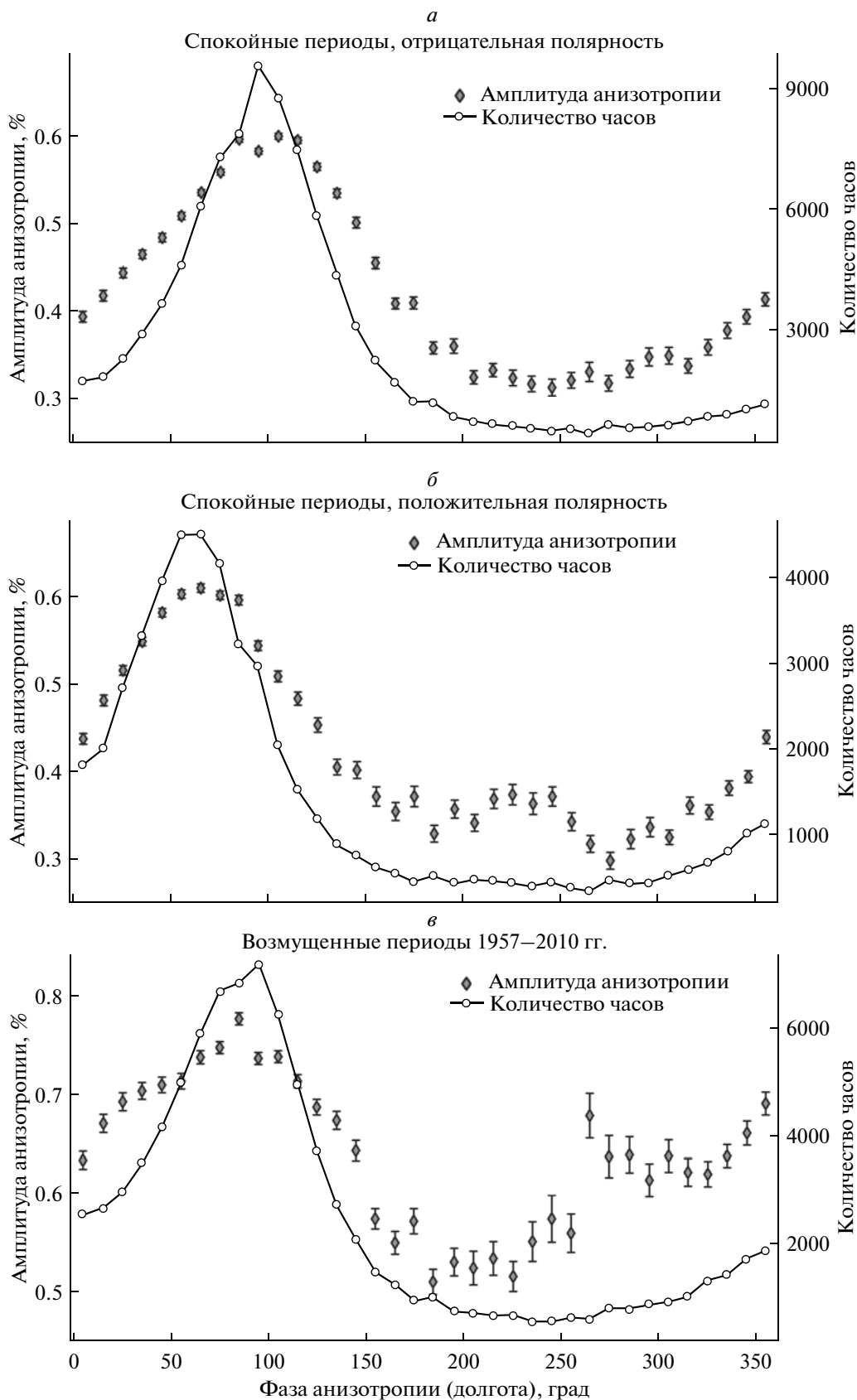


Рис. 4. Амплитудно-фазовая взаимозависимость солнечно-суточной анизотропии и ее фазовое распределение: *a* – в спокойные периоды при отрицательной полярности (1960–1969, 1982–1989, 2001–2010 гг.); *б* – в спокойные периоды при положительной полярности (1971–1978, 1992–1999 гг.); *в* – в возмущенные периоды 1957–2010 гг.

Характеристики анизотропии КЛ и сопутствующие параметры в различные периоды

Периоды	Кол-во часов	U , км/с	B , нТл	Ac , %	G_x , %/ae	G_z , %/ae	ψ , °	ρ , ae	A_{xy} , %	ϕ , °
Спокойные периоды, $qA < 0$	7350	403	4.5	0.62	2.09	-2.87	148	0.049	0.58	95
					2.11	2.56	327			
Спокойные периоды, $qA > 0$	3663	402	5.1	0.62	1.65	-6.27	147	0.043	0.61	65
					1.53	7.21	331			
Возмущенные периоды 1957–2010 гг.	4484	556	8.9	0.85	6.2	1.71	139	0.025	0.73	95
					5.95	0.72	322			

где k – отношение коэффициентов поперечной и продольной диффузии; ρ – гирорадиус протонов с жесткостью 10 ГВ; $Ac = (\gamma + 2) \frac{U}{c}$ – конвективная составляющая анизотропии; γ – показатель энергетического спектра первичных КЛ (для данных оценок было принято $\gamma = 2.6$); U – скорость солнечного ветра; A_x и A_y – радиальная и азимутальная составляющие анизотропии; $\psi = \arctg\left(\frac{B_y}{B_x}\right)$ – угол между вектором ММП и осью x ; B_y и B_x – составляющие вектора ММП.

Мы использовали значение амплитуды анизотропии, которое приходилось на максимум распределения фаз (т.е. самое распространенное значение амплитуды). Для тех часов, которые попадали в нужный фазовый интервал (например, $90^\circ \leq \phi \leq 100^\circ$, с максимумом фаз на 95°) и соответствовали параметрам для выбранных периодов (для спокойных – $Ap < 10$, $SSN \leq 50$; для возмущенных – $Ap > 20$), рассчитывались средние значения скорости солнечного ветра, величины B_x и B_y составляющих межпланетного магнитного поля и угол ψ . Используя описанную выше модель и полученные данные, мы посчитали значения составляющих градиента КЛ (G_x и G_z) и некоторые другие параметры (см. таблицу). Расчеты проводились отдельно для разной полярности ММП (т.е. для $B_x > 0$ и для $B_x < 0$), при $k = 0.01$.

Анализируя полученные результаты, можно сделать несколько выводов. 1. В возмущенные периоды значения градиентов увеличиваются в несколько раз относительно спокойных периодов. 2. В периоды с положительной и отрицательной полярностью общего магнитного поля Солнца при смене знака сектора ММП (при изменении ψ) меняется знак и у G_z компоненты градиента КЛ, поэтому знак G_z всегда совпадает со знаком сектора ММП. 3. Если сравнивать спокойные периоды с разными полярностями, то можно заметить, что абсолютные значения G_z меньше для отрицательной полярности, чем для положительной.

Полученные результаты согласуются с выводами работы [Chen and Bieber, 1993] о том, что широтное распределение космических лучей имеет локальный минимум около гелиосферного токового слоя. Это проявляется при положительной полярности Солнца. Сложнее ситуация в периоды с отрицательной полярностью. В это время дрейфовые эффекты меняют знак, и можно ожидать около гелиосферного токового слоя локальный максимум. Однако структура гелиомагнитосферы такова, что галактическим космическим лучам в полярные области легче проникать, чем в приэкваториальные, при любой полярности поля. Поэтому при отрицательной полярности Солнца дрейфовые и структурные факторы противодействуют друг другу, и это может объяснить уменьшение абсолютных величин G_z в такие периоды.

Скорее всего, величины градиентов в таблице завышены. Использованные здесь допущения (пренебрежение широтной составляющей ММП и азимутальной составляющей градиента КЛ, использование составляющих анизотропии КЛ в плоскости земного экватора и т.п.) не позволяет проводить детальный количественный анализ, и мы планируем выполнить более полные и точные расчеты градиентов в будущем, а здесь даем только предварительные, в основном качественные, оценки.

3.5. Влияние скорости солнечного ветра.

Нам хотелось получить влияние скорости солнечного ветра (СВ) на анизотропию в чистом виде, поэтому мы не брали возмущенные периоды, когда возрастает не только скорость, но и другие параметры межпланетной среды (ММП, плотность, температура и т.д.).

Для исследования влияния скорости СВ на амплитудно-фазовую взаимозависимость солнечно-суточной анизотропии и ее фазовое распределение отдельно рассматривались спокойные периоды ($Ap < 10$, $SSN \leq 50$) с различными скоростями СВ (рис. 5а–5в). Мы разбили скорости солнечного

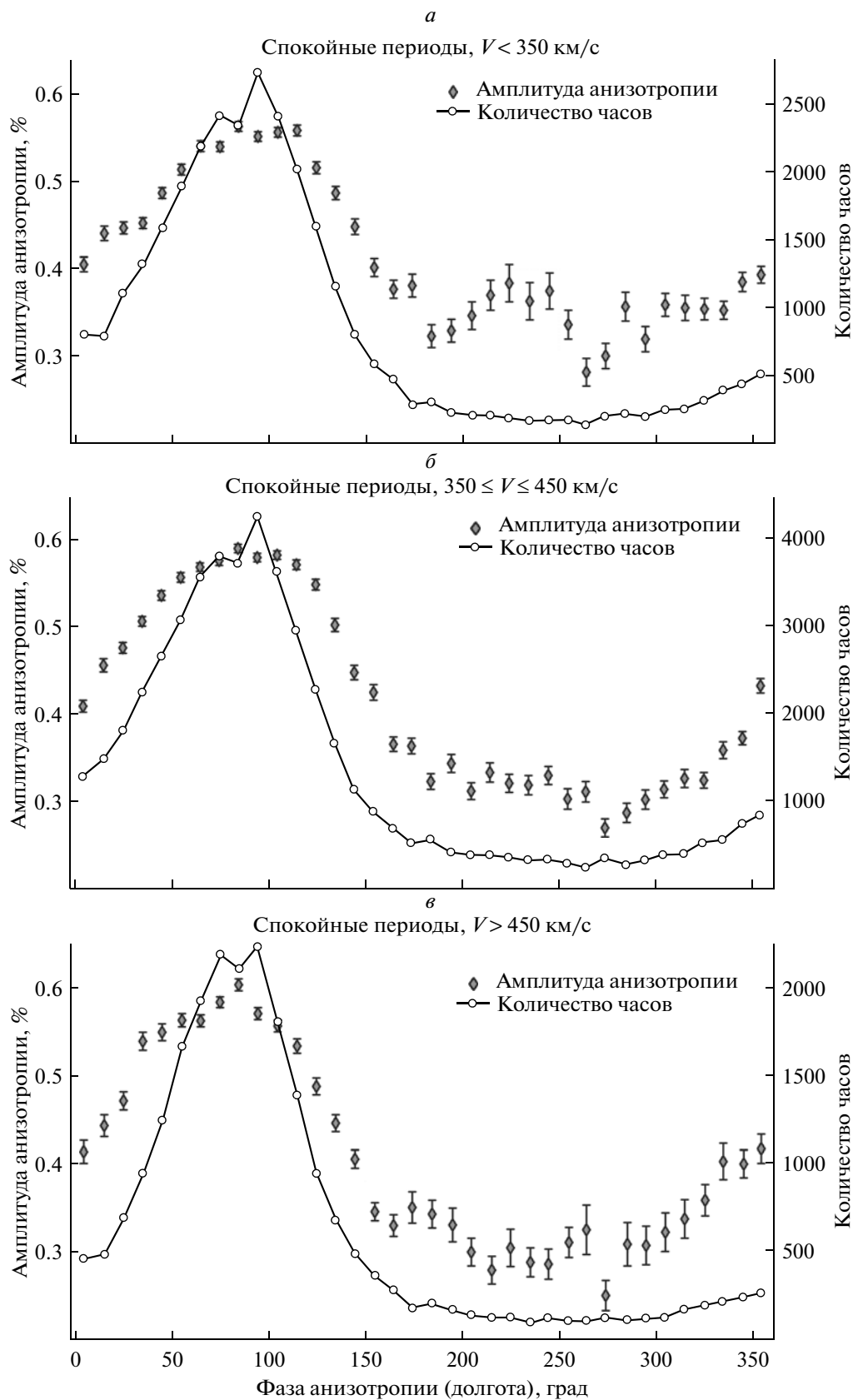


Рис. 5. Амплитудно-фазовая взаимозависимость солнечно-суточной анизотропии и ее фазовое распределение в спокойные периоды при скорости солнечного ветра: *a* – $V < 350$ км/с; *б* – $350 \leq V \leq 450$ км/с; *в* – $V > 450$ км/с.

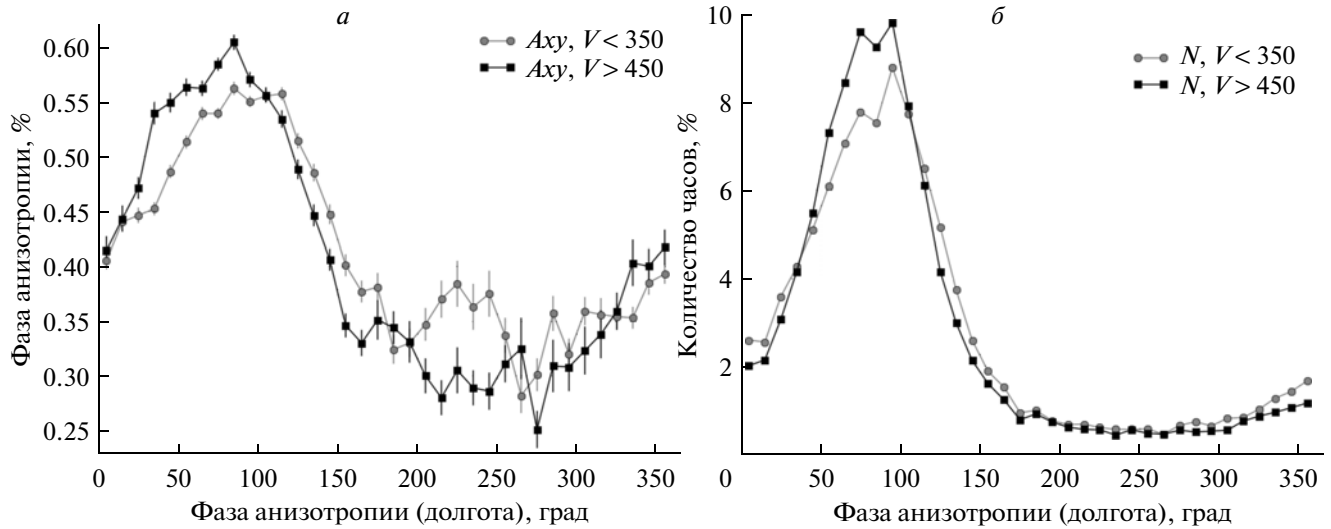


Рис. 6. Амплитудно-фазовая взаимозависимость (а) и фазовое распределение солнечно-суточной анизотропии (в процентах) (б) в спокойные периоды при скоростях солнечного ветра $V < 350$ км/с и $V > 450$ км/с.

ветра на три зоны: $V < 350$ км/с (31028 часов); 350 км/с $< V < 450$ км/с (48914 часов); $V > 450$ км/с (22781 часов). Скорости от 350 км/ч до 450 км/ч наблюдаются чаще других, поэтому амплитудно-фазовое распределение для этих скоростей (рис. 5б) содержит большее количество точек, более гладкое, и статистическая ошибка для этого интервала меньше.

Можно заметить, что не наблюдается значительной зависимости амплитуды анизотропии от скорости СВ: максимум анизотропии, фазовое распределение очень похожи друг на друга, разница только в деталях распределения (рис. 6а, 6б). Видимо, влияние скорости каким-то образом компенсируется другими факторами. Одной из особенностей является то, что при спокойном СВ ($V < 350$ км/с) также наблюдается второй максимум анизотропии (рис. 5а), как и на рис. 4б.

Наглядно показывает разницу между поведением амплитудно-фазовой зависимости для медленного и быстрого солнечного ветра рис. 5а. Видно, что максимум амплитудно-фазовой зависимости для медленного солнечного ветра ниже и более сглажен, а при фазах от 200 до 260° виден второй максимум. При низких скоростях чаще появляется “неправильное” направление анизотропии, как наблюдалось в 1996 г. [Belov et al., 1999]. Однако повышение скорости СВ до нормальной возвращает векторную анизотропию в правильный сектор, и максимум фазового распределения становится выше, чем для низких скоростей (рис. 6б).

4. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Изучены фазовые распределения и амплитудно-фазовые зависимости солнечно-суточной анизотропии ГКЛ за большой промежуток времени (1957–2010 гг.). Эти изменения, в основных чертах, 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.

Оценки градиента КЛ для различных условий показали, что радиальная и широтная составляющие градиента в возмущенные периоды значительно больше, чем в спокойные, знак широтной составляющей, как правило, совпадает со знаком сектора межпланетного магнитного поля независимо от фазы магнитного цикла Солнца, а абсолютная величина широтной составляющей градиента при положительной полярности общего магнитного поля Солнца больше, чем при отрицательной.

Распределение амплитуды и фазы анизотропии КЛ слабо зависит от скорости солнечного ветра.

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

- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Долговременные изменения анизотропии космических лучей по данным сети нейтронных мониторов / Тр. 29 Всероссийской конф. по космическим лучам. Москва, 3–7 августа 2006 г. CD МОД_8. 2006.
- Крымский Г.Ф. Диффузионный механизм суточной вариации космических лучей // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 4. № 6. С. 977–986. 1964.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А., Самсонов И.С., Скрипин Г.В., Транский И.А., Чирков Н.П. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука. 224 с. 1981.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Мамрукова В.П., Григорьев В.Г., Герасимова С.К. 11- и 22-летние вариации анизотропии галактических космических лучей // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 71. № 7. С. 1003–1005. 2007.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Мамрукова В.П., Стародубцев С.А., Шафер Г.В. Долговременные изменения анизотропии и плотности галактических космических лучей по данным измерений АСК-1 в Якутске / Космические лучи и гелиосфера: Тезисы докладов, представленных на Всероссийскую конференцию, посвященную 100-летию Ю.Г. Шафера, г. Якутск, 7–9 сентября 2009 г. С. 28. 2009.
- Чирков Н.П. Вариации плотности космических лучей и солнечного ветра с циклом солнечной активности / Модуляция космических лучей в солнечной системе. Сб. научн. тр. Ред. Крымский Г.Ф. Якутск: изд-во ЯФ СО АН СССР. С. 3–14. 1986.
- 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 / Proc. 20-th ICRC. Moscow, USSR, 2–15 Aug 1987. V. 4. P. 137–139. 1987.
- Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Oleneva V.A. Determination of the absolute value of north-south cosmic ray anisotropy from ground-based data / Proc. 21-th ICRC. Adelaide, Australia, 6–19 January 1990. V. 6. P. 357. 1990.
- 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. 1991.
- Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Rudnev Yu.F. The amplitude-phase interrelation of CR anisotropy in the two last solar minima / Proc. 23-th ICRC. Alberta, Canada, 19–30 July, 1993. V. 3. P. 641. 1993.
- 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. 1999.
- Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V., Pchelkin V., Plainaki C., Mariatos G. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. V. 110, doi:10.1029/2005JA011067, 2005.
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G., Mavromichalaki H. Long-term variations of the cosmic ray anisotropy by the data from neutron monitor network / Proc. 20-th ECRS. Lisbon, Portugal, 5–8 Sept 2006. ID 123. 2006.
- Chen J., Bieber J. Cosmic-ray anisotropies and gradients in three dimensions // Astrophys. J. V. 405. № 1. P. 375–389. 1993.
- Elliot H. Time variations of cosmic ray intensity / Progress in cosmic ray physics. Ed. J.G. Wilson, S.A. Wouthyusen. Amsterdam: North-Holland Publishing Co. P. 453–514. 1952.
- 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. V. 74. № 14. P. 3451–3468. 1969.
- Forman M.A., Gleeson L.J. Cosmic-ray streaming and anisotropies // Astrophys. Space Sci. V. 32. P. 77–94. 1975.
- Krymsky G.F., Krivoschapkin P.A., Gerasimova S.K., Grigoryev V.G., Mamrukova V.P., Skripin G.V. Variation of high energy cosmic ray anisotropy with a solar activity cycle / Proc. 28-th ICRC. Tsukuba, Japan, 31 July–7 Aug 2003. P. 3985–3988. 2003.
- Moraal H. Observations of the Eleven-Year Cosmic-Ray Modulation Cycle // Space Sci. Rev. V. 19. P. 845–920. 1976.
- Swinson D.B. Diurnal variations underground since 1959 / Proc. 24-th ICRC. Rome, Italy, 28 Aug–8 Sept 1995. V. 3. P. 627–630. 1995.