

ГЕЛИОСФЕРНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ. II. ДЕФОРМАЦИЯ НЕЙТРАЛЬНОГО СЛОЯ

*Г. Ф. Крымский, П. А. Кривошапкин, В. П. Мамрукова, С. К. Герасимова**

*Институт космических исследований и астрономии им. Ю. Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук
677980, Якутск, Россия*

Поступила в редакцию 19 июня 2006 г.

Анализ данных нейтронных мониторов в периоды отрицательной и положительной полярностей общего магнитного поля Солнца выявил зависимость долгопериодной модуляции интенсивности космических лучей как от деформации нейтрального слоя межпланетного магнитного поля, так и от уровня солнечной активности. Причем при положительной полярности преобладает влияние уровня солнечной активности, а при отрицательной полярности — влияние величины деформации слоя. Причиной такого поведения 11-летней и годовой модуляций плотности является магнитный дрейф космических лучей, траектории которого различны в эпохи положительной и отрицательной полярностей.

PACS: 96.50.S-, 96.50.Xy, 96.60.Q-

1. ВВЕДЕНИЕ

Как показано в работе авторов [1] (далее будет именоваться Часть 1), гелиосферная модуляция интенсивности космических лучей (ИКЛ) несет на себе отпечаток их дрейфа в межпланетном магнитном поле (ММП). Картина дрейфа кардинально меняется при переполюсовках общего магнитного поля Солнца (ОМПС). Это приводит к 22-летним вариациям интенсивности КЛ с циклом солнечной активности. Как подчеркивалось в Части 1, важную роль играет быстрый дрейф вдоль плоскости солнечного экватора. В простейшей модели в этой плоскости располагается пограничная поверхность между областями с противоположно направленным магнитным полем. Физически эта поверхность представляет собой токовый слой, толщина которого во многих случаях может считаться пренебрежимо малой. Мы будем называть ее нейтральной поверхностью или нейтральным слоем.

Нейтральный слой в реальной гелиосфере имеет существенные отличия от своего модельного описания. Во-первых, к этому слою примыкает область относительно медленного и более плотного солнечно-

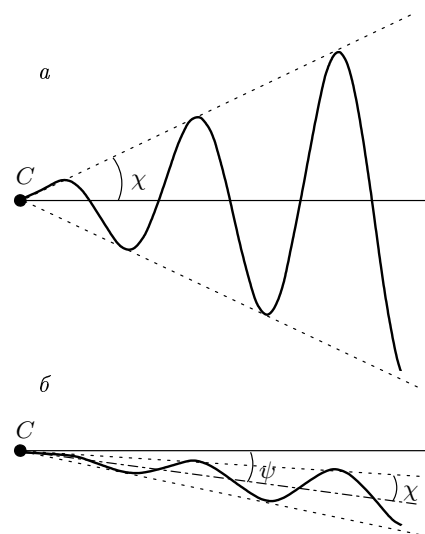


Рис. 1. Схематическое изображение меридионального разреза нейтральной поверхности ММП в максимуме (а) и минимуме (б) солнечной активности. *C* — Солнце, χ , ψ — угол полураствора и угол смещения к югу нейтральной поверхности относительно плоскости солнечного экватора (горизонтальная линия)

*E-mail: s.k.gerasimova@ikfia.ysn.ru

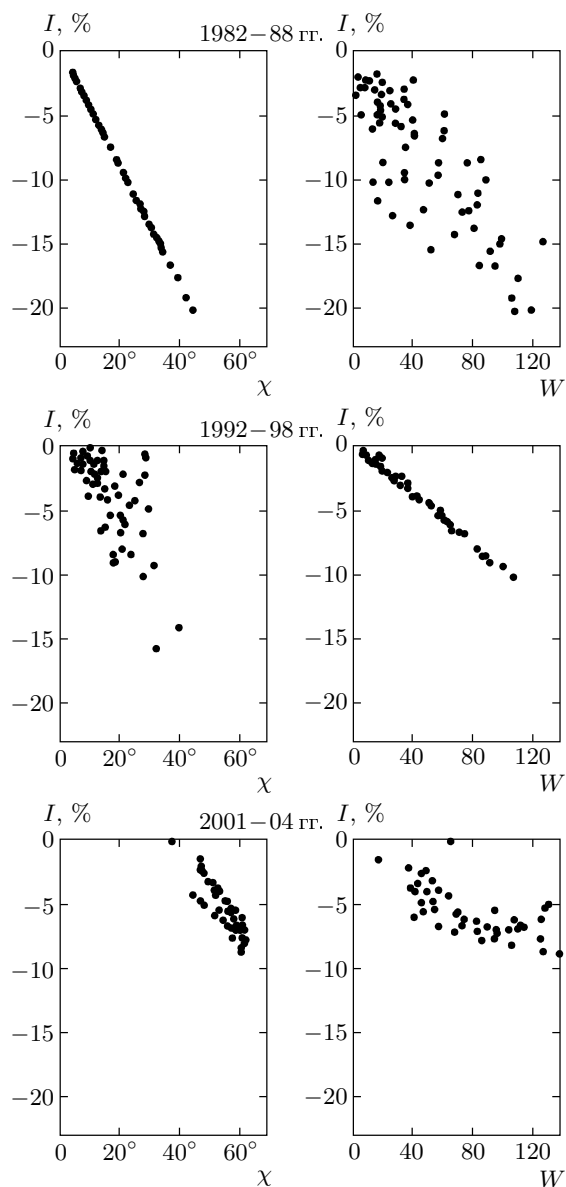


Рис. 2. Зависимости вариации интенсивности КЛ I от угла χ полураствора нейтрального токового слоя ММП и числа солнечных пятен W для отрицательной (1982–1988 гг. и 2001–2004 гг.) и положительной (1992–1998 гг.) полярностей ОМПС

го ветра [2], которая погружена в быстрый ветер из корональных дыр [3]. Во-вторых, слой имеет заметную деформацию — чаще всего он напоминает гофрированную поверхность. Эту деформацию можно охарактеризовать углом полураствора χ , как это показано на схематическом рис. 1. Наконец, гелиосфера обнаруживает северо-южную асимметрию, имеющую многообразные проявления. Солнечные КЛ

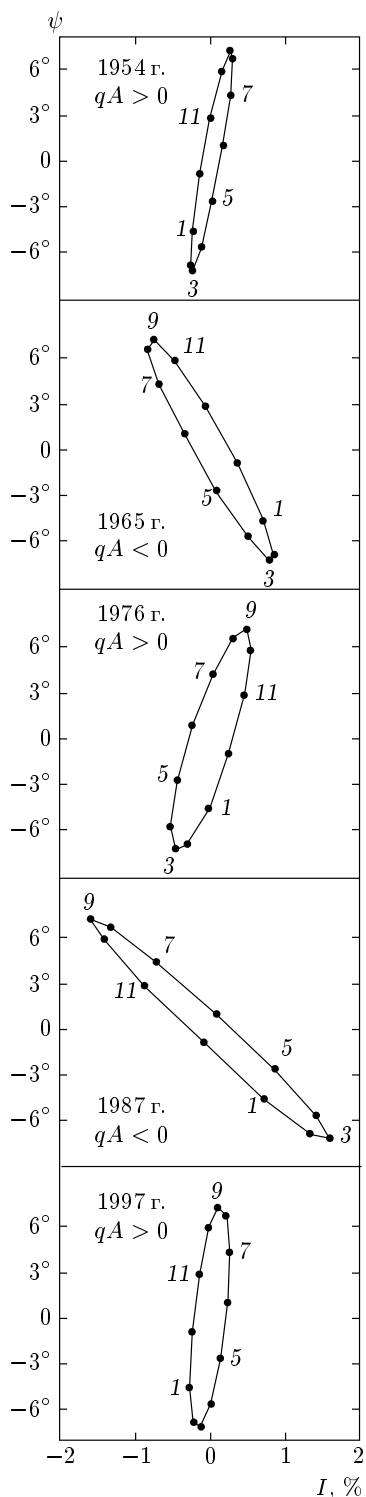


Рис. 3. Наблюдаемое гелиоширотное распределение вариации интенсивности КЛ (по данным нейтронных мониторов на станциях Клаймакс и Москва) в минимумах солнечной активности в периоды отрицательной ($qA < 0$) и положительной ($qA > 0$) полярностей ОМПС. Цифрами указаны месяцы

были, по-видимому, первым явлением, где эта асимметрия была обнаружена [4]. Гелиоширотный градиент плотности в галактических КЛ, найденный в работе [5], также является, по-видимому, следствием асимметрии. Измерения КЛ низких энергий на космическом аппарате [6] показали, что минимум интенсивности был смещен от плоскости солнечного экватора к югу примерно на 10° гелиошироты. Само ММП также обнаруживает северо-южную асимметрию [7]. Можно поэтому ожидать, что нейтральный слой имеет систематическое смещение к югу, которое легче всего можно заметить в период солнечного минимума, когда угол полураствора χ сравнительно мал (рис. 1).

В настоящей работе изучается поведение интенсивности галактических КЛ, связанное как с деформацией нейтрального слоя, так и с его возможным систематическим смещением.

2. ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ ИКЛ

В цикле солнечной активности меняется как число солнечных пятен W , которое принято считать показателем уровня солнечной активности, так и угол полураствора нейтрального слоя χ . Оба эти фактора должны отражаться в интенсивности I галактических КЛ. Усложняющим обстоятельством является очевидная корреляция между χ и W . Для того чтобы определить $I(\chi, W)$ в линейной форме

$$I(\chi, W) = \beta_1\chi + \beta_2W + \text{const}, \quad (1)$$

предварительно найдем две взаимно ортогональные (не коррелирующие между собой) линейные комбинации χ и W и вычислим коэффициенты регрессии наблюдаемой интенсивности I с ними. Затем, возвращаясь к исходным величинам, получим искомую зависимость в форме (1). Этот прием был использован в работе [8], где таким образом был проведен анализ данных нейтронных мониторов на станциях Мак Мердо, Рим и Токио за два продолжительных периода, соответствующих разным полярностям ОМПС.

В настоящей работе используется более обширный материал по данным на станции Мак Мердо [9]: за 1982–1988 гг. и 2001–2004 гг. (отрицательная полярность ОМПС) и за 1992–1998 гг. (положительная полярность ОМПС). Периоды максимальной солнечной активности исключены, чтобы более надежно выявить эффекты, связанные с магнитным дрейфом.

Данные по W взяты из работы [10], а по χ — из работы [11]. Для каждого из трех периодов вычислены коэффициенты β_1 и β_2 и на рис. 2 представлены зависимости I , вычисленные по формуле (1), от величин χ и W . Коэффициенты корреляции, соответствующие избранным на рис. 2 зависимостям, даны в табл. 1. Из рис. 2 и табл. 1 следует, что в годы отрицательной полярности ОМПС модуляция КЛ в большей степени определяется деформацией нейтрального слоя, а в период положительной полярности — уровнем солнечной активности.

3. ГЕЛИОШИРОТНЫЙ ГРАДИЕНТ ПЛОТНОСТИ КЛ

Гелиоширотный градиент плотности КЛ может быть обнаружен в наземных измерениях в виде годовой вариации, обусловленной изменениям гелиошироты Земли ψ . В работе [5] такой эффект был обнаружен за три солнечных цикла и было установлено, что знак градиента меняется при переполюсовках ОМПС.

Здесь мы рассматриваем гелиоширотное распределение КЛ в пяти последовательных максимумах интенсивности КЛ вблизи солнечных минимумов (1954, 1965, 1976, 1987, 1997 гг.) с разной полярностью ОМПС. Периоды минимумов солнечной активности выбраны с целью уменьшить искажающее влияние угла χ (см. рис. 1).

Для анализа использованы среднемесячные значения интенсивности КЛ по данным нейтронных мониторов станций Клаймакс (1954, 1965, 1976, 1987, 1997 гг.) и Москва (1965, 1976, 1987, 1997 гг.). Долговременные изменения интенсивности исключены скользящей средней за 13 месяцев. Амплитуда и фаза годовых вариаций интенсивности КЛ для каждой станции, вычисленные с помощью фурье-анализа, представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что данные станций хорошо согласуются между собой. Амплитуда годовой вариации КЛ при отрицательной полярности ОМПС почти в 3 раза больше, чем при положительной. Максимальное значение приходится на сентябрь при положительной полярности и на март при отрицательной полярности магнитного поля.

Гелиоширотные изменения интенсивности КЛ при разной полярности ОМПС даны на рис. 3. Здесь взята только первая гармоника годовой волны. Из рис. 3 отчетливо видно, что годовая волна практически полностью обусловлена изменением гелиошироты Земли и что знак гелиоширотной асимметрии КЛ изменяется на противоположный при изменении полярности ОМПС.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции вычисленной вариации интенсивности КЛ с углом полураствора нейтрального токового слоя ММП χ и числом солнечных пятен W

Годы	Полярность поля	Коэффициент корреляции $I(\chi)$	Коэффициент корреляции $I(W)$
1982–1988 2001–2004	отрицательная	-0.9999 ± 0.0001 -0.899 ± 0.019	-0.819 ± 0.003 -0.678 ± 0.052
1992–1998	положительная	-0.691 ± 0.041	-0.997 ± 0.001

Таблица 2. Амплитуда и фаза годовых вариаций КЛ

Год, полярность ОМПС	Станция	Амплитуда, %	Фаза, град.
1954, $qA > 0$	Клаймакс	0.289 ± 0.011	207.4 ± 2.2
1965, $qA < 0$	Клаймакс	0.854 ± 0.011	35.4 ± 0.7
	Москва	0.861 ± 0.010	40.3 ± 0.7
1976, $qA > 0$	Клаймакс	0.530 ± 0.011	266.8 ± 1.2
	Москва	0.262 ± 0.011	263.1 ± 2.4
1987, $qA < 0$	Клаймакс	1.601 ± 0.011	63.2 ± 0.4
	Москва	1.631 ± 0.010	53.0 ± 0.4
1997, $qA > 0$	Клаймакс	0.263 ± 0.011	175.0 ± 2.4
	Москва	0.311 ± 0.011	145.1 ± 2.0
Среднее, $qA > 0$ (1954, 1976, 1997)	Клаймакс	0.361 ± 0.006	216.4 ± 1.0
	Москва	0.286 ± 0.008	203.5 ± 1.6
Среднее, $qA < 0$ (1965, 1987)	Клаймакс	1.227 ± 0.008	49.3 ± 0.4
	Москва	1.246 ± 0.007	46.7 ± 0.3

4. ПРИЧИНЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ЭФФЕКТОВ

Вариации ИКЛ, зависящие от угла χ , определяются взаимодействием быстрого и медленного солнечного ветра [8]. Чем больше этот угол, тем сильнее взаимодействие. Соответствующая зона, где оно имеет место, служит препятствием для дрейфового распространения КЛ. Наибольший вклад этот эффект должен вносить за пределами орбиты Земли. Именно поэтому он более отчетливо наблюдается при отрицательной полярности ОМПС, когда дрейф происходит в основном в радиальном направлении внутрь гелиосферы. При положительной полярности указанное препятствие в меньшей степени влияет на дрейф с высоких широт. Еще одна причина наблюдаемой зависимости может быть связана с характером гелиоширотного распределения КЛ, изученного в Части 1. В эпоху отрицательной полярно-

сти максимальная интенсивность КЛ наблюдается на нейтральной поверхности. Чем больше она деформирована, тем меньше, в среднем, будет наблюдаемая интенсивность. При положительной полярности соответствующее распределение более размыто по гелиошироте и, кроме того, градиент имеет противоположный знак, что ослабляет зависимость от χ .

Что касается гелиоширотного градиента, который проявляется в годовой вариации ИКЛ, то он определяется из распределения, полученного в Части 1:

$$f_- = -b|\psi|, \quad (1)$$

$$f_+ = b \left(|\psi| - \frac{1}{2k} \left(1 - e^{-2k|\psi|} \right) \right). \quad (2)$$

Формула (1) получена из выражения (15), а формула (2) — из выражения (13) Части 1 при $k^2 \gg 1$, $\psi \ll 1$. Здесь ψ — гелиоширота, предполагаемая

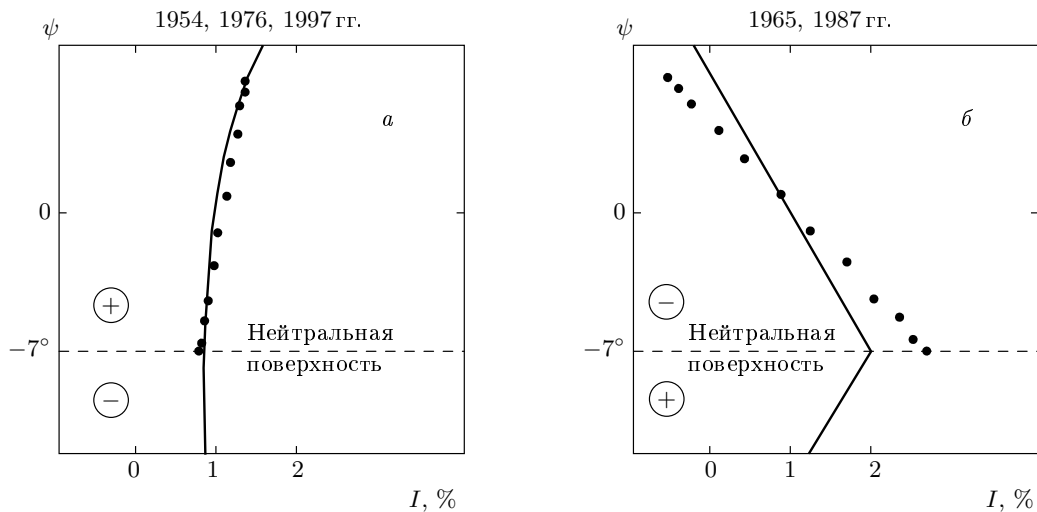


Рис. 4. Экспериментальная и ожидаемая гелиоширотные зависимости интенсивности КЛ при разной полярности ОМПС: *a* — положительная полярность ОМПС ($qA > 0$), *b* — отрицательная полярность ($qA < 0$). Точки — эксперимент, сплошная линия — теоретическое распределение КЛ, штрихи — нейтральная поверхность ОМПС. Знаки в кружках показывают полярность магнитного поля

малой, k — отношение пробега частиц к их гиро- радиусу (считается, что $k^2 \gg 1$), постоянная b зависит от скорости ветра u_0 и напряженности ради- альной компоненты поля H_0 на орбите Земли (при $r = r_0 = 1.5 \cdot 10^{13}$ см):

$$b = (\gamma + 2) \frac{u_0}{c} \frac{eH_0 r_0}{pc}.$$

Здесь c — скорость света, $\gamma = 2.5$ — показатель диф- ференциального спектра КЛ, $p = 13$ ГэВ/с — эф- фективный импульс частиц, ответственных за ней- тронную компоненту на уровне моря. Если принять $u_0 = 4 \cdot 10^7$ см/с, $H_0 = 3.5 \cdot 10^{-5}$ Э, то получим $b = 7.26 \cdot 10^{-2}$.

Функции f_- и f_+ представляют собой варьируе- мые части функции распределения, принятой за еди- ницу, и определены так, чтобы $f_{\pm} = 0$ при $\psi = 0$. Помимо различия в знаке, который показывает, что гелиоширотный градиент меняет направление при перемене полярности ОМПС, функции различают- ся поведением вблизи точки $\psi = 0$: при положи- тельной полярности градиент плавно переходит через 0 вблизи этой точки, тогда как при отрицательной по- лярности он испытывает здесь скачок.

Если предположить, что «гелиоширота» отсчи- тывается не от плоскости солнечного экватора, а от нейтральной поверхности, которая в среднем сдви- нута к югу, то появится асимметричный градиент G_{\pm} .

Пусть нейтральная поверхность сдвинута к югу не менее чем на 7° . Тогда измеряемый широтный градиент будет полностью асимметричным и при отрицательной полярности ОМПС его величина бу- дет равна $G_- = -b$, что при пересчете на гра- дус широты даст $G_- = -0.127\%$ /град. Наблюда- емая величина на уровне моря, равная в среднем $G_- = -0.179\%$ /град., показывает, что скорость вет- ра и напряженность магнитного поля для рассмат- риваемых периодов несколько больше, чем приня- тые нами значения.

При положительной полярности ОМПС гради- ент имеет обратный знак, а его величина должна быть меньше, так как он полностью исчезает при $\psi = 0$. Как видно из выражения для f_+ , средняя величина градиента с учетом сдвига $\Delta\psi$ зависит от параметра k :

$$\bar{G} = \frac{f_+(7^\circ - \Delta\psi) - f_-(7^\circ - \Delta\psi)}{14^\circ}.$$

Среднее значение градиента в зависимости от па- раметра k при сдвиге по гелиошироте $\Delta\psi$, равном -7° , дается в табл. 3. Видно, что величина градиента зна- чительно ниже, чем при отрицательной полярности. Наблюдаемая величина $G_+ = 0.052\%$ /град. соответ- ствует значению параметра $k \approx 2$.

На рис. 4 приведены распределения по гелиоши- роте наблюдаемой (средние значения из рис. 3, точ- ки) и вычисленной (сплошные линии) интенсивно- стей КЛ.

Таблица 3. Вычисленные значения асимметричного градиента для различных k

k	2	3	5
Градиент, %/град.	0.051	0.067	0.088

Соответствие наблюдаемого асимметричного градиента КЛ его рассчитанным значениям указывает на реалистичность диффузионно-дрейфовой модели модуляции ИКЛ и на асимметрию солнечного ветра и магнитного поля, которая сохранялась в течение пяти солнечных циклов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обнаружена зависимость интенсивности космических лучей от угла деформации нейтрального слоя межпланетного магнитного поля, проявляющаяся в эпохи отрицательной полярности общего магнитного поля Солнца. Найден гелиоширотный градиент плотности космических лучей, свидетельствующий о северо-южной асимметрии в низкоширотной гелиосфере, существующей в течение 50 лет. Оба наблюдаемых эффекта несут в себе отпечаток дрейфовых траекторий космических лучей в гелиосфере, меняющихся при смене полярности общего магнитного поля Солнца.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-02-16954-а), программ Президиума РАН № 6 и № 16, комплексного интеграционного проекта СО РАН № 3.10.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Ф. Крымский, П. А. Кривошапкин, В. П. Мамрукова, С. К. Герасимова, *ЖЭТФ* **131**, (2007).
2. А. Хундхаузен, *Расширение короны и солнечный ветер*, Мир, Москва (1976).
3. В. А. Коваленко, *Солнечный ветер*, Наука, Москва (1983).
4. Г. Ф. Крымский, А. И. Кузьмин, *Изв. АН СССР, сер. физ.* **12**, 2005 (1964).
5. Г. Ф. Крымский, П. А. Кривошапкин, В. П. Мамрукова, Г. В. Скрипин, *Геомагнетизм и аэрономия* **21**, 923 (1981).
6. J. A. Simpson, M. Zhang, and S. Bame, *Astrophys. J.* **465**, L69 (1996).
7. K. Mursula and T. Hiltula, *Geophys. Res. Lett.* **30**, 2135 (2003).
8. Г. Ф. Крымский, П. А. Кривошапкин, С. К. Герасимова и др., *Геомагнетизм и аэрономия* **41**, 444 (2001).
9. J. W. Bieber, <http://www.bartol.udel.edu/~neutronm>.
10. Ronald Van der Linder, <http://sidc.oma.be/html/sunspot.html>.
11. T. Hoeksema, <http://wso.stanford.edu/synsource.html>.