

УДК 524.1+523.9

О СВЯЗИ МЕЖДУ КВАЗИ-ДВУХЛЕТНИМИ ВАРИАЦИЯМИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ, ГЕЛИОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ*

© 2016 г. Г. А. Базилевская, М. С. Калинин, М. Б. Крайнев, В. С. Махмутов, А. К. Свиржевская, Н. С. Свиржевский, Ю. И. Стожков

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва
bazilevs@sci.lebedev.ru*

Поступила в редакцию 31.03.2015 г.

Квази-двухлетние осцилляции солнечной активности ($T \approx 1-4$ года) считаются одними из базовых вариаций солнечной активности, связанных с процессом солнечного динамо. Они передаются в межпланетное пространство открытым магнитным потоком Солнца и порождают КДО в интенсивности космических лучей. В статье обсуждаются наблюдательные характеристики КДО в КЛ, их связь с КДО на Солнце и в межпланетной среде. Время запаздывания КДО в КЛ относительно КДО солнечного и гелиосферного магнитного поля позволяет предположить, что формирование КДО открытого магнитного потока Солнца происходит в течение 3–5 мес. Рассматривается вопрос о выделенной периодичности КЛ ($T = 1.6$ года), которая превалировала в КЛ и гелиосферном магнитном поле на протяжении более 10 лет, но не была стабильной в течение 60 лет наблюдений. Различия характеристик КДО и долговременных вариаций КЛ предполагают особенности в механизме их образования.

DOI: 10.7868/S0023420616010015

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия квази-двухлетние осцилляции (КДО, $T \approx 1-4$ года) солнечной активности и зависящих от нее явлений в космическом пространстве привлекают все больше внимания, и в настоящее время КДО считаются одними из базовых вариаций солнечной активности, связанных с процессом солнечного динамо [например, 1–5]. Исследованию КДО в космических лучах (КЛ) посвящено много работ, в которых авторы обращали внимание на яркие вариации с определенным периодом, наиболее часто с $T = 1.3-1.6$ года [например, 6–10]. Было показано, что такие осцилляции нестабильны во времени и антикоррелируют с гелиосферным магнитным полем (ГМП).

В настоящей работе мы не пытаемся исследовать отдельные случаи КДО, а наоборот, рассматриваем КДО как постоянно присутствующие вариации. Мы пытаемся зафиксировать особенности КДО в солнечной активности и КЛ с целью продвинуться в понимании связи между солнечными и межпланетными КДО, а также наметить пути исследования КДО в КЛ, которые могли бы

пролить свет на роль основных механизмов солнечной модуляции КЛ.

В контексте развития КДО в КЛ нас интересует проблема связи солнечного и гелиосферного магнитного поля при разных значениях характерных времен, а именно 11-летней и квази-двухлетней вариации.

Эта работа является развитием работы [11], в которой было показано, что КДО в КЛ присутствуют постоянно, и такие характерные свойства вариаций галактических КЛ как ступенчатая модуляция и эффект Гневышева являются проявлениями КДО. Мы также подчеркивали нестабильность периода КДО в КЛ, считая стохастичность характерным признаком КДО в солнечной активности. Однако время наблюдения вариаций КЛ слишком мало для утверждения об отсутствии выделенных периодов в КДО в КЛ. Поэтому в этой работе мы вернулись к изучению периодичности $T = 1.6$ года (≈ 19 мес.), которая была выявлена во многих работах. Кроме того, мы рассматриваем корреляции КЛ с солнечным магнитным полем и ГМП для КДО и для 11-летнего цикла.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для выделения КДО мы используем скользящее сглаживание среднемесячных данных с пери-

* Статья по материалу доклада на 10-й конференции ИКИ РАН “Физика плазмы в Солнечной системе” (февраль 2015 г.)

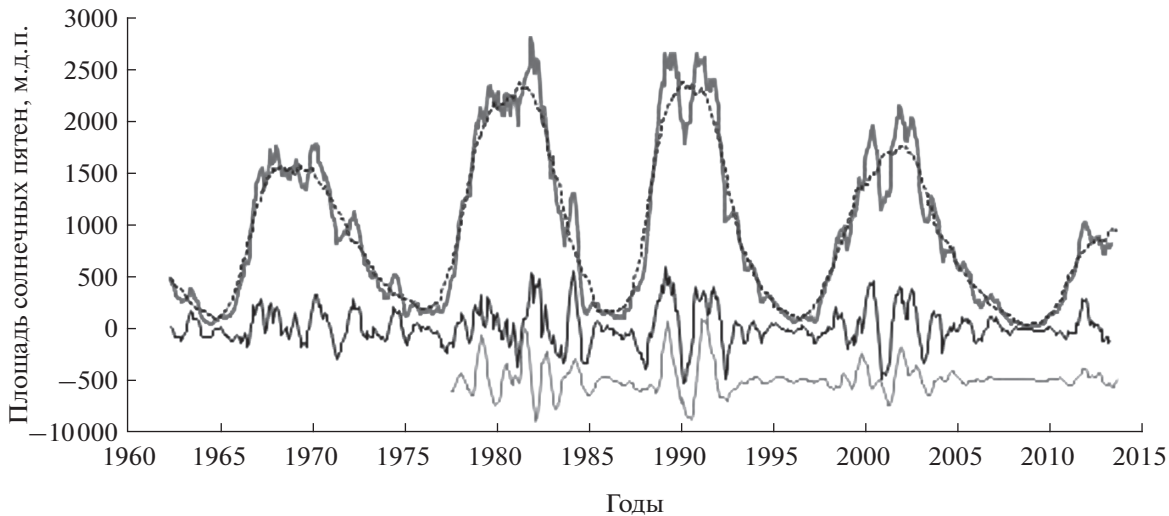


Рис. 1. Верхние кривые — площадь солнечных пятен: серая кривая — 7-месячное сглаживание, пунктир — 25-месячное сглаживание. Черная кривая — КДО площади солнечных пятен. Нижняя кривая (сдвинута вниз для удобства рассмотрения) — КДО фотосферного магнитного поля, относительные единицы.

одом 7 и 25 мес., затем вычитаем из первого ряда второй. Эта процедура эквивалентна применению фильтра, пропускающего без искажений сигнал с периодом 1.5–1.7 года и пропускающего с ослаблением <50% сигнал в диапазоне 1–3.3 года. Этот простой подход позволяет выделить осцилляции с сохранением нестабильности периода, что важно для анализа корреляций между различными параметрами. Результаты применения этого фильтра находятся в разумном согласии с другими работами по КДО, которые использовали более сложную технику, например, вейвлет-преобразование [6, 10, 12] или метод EMD (empirical mode decomposition) [13].

В анализ включены данные по солнечной активности: площади солнечных пятен (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>), фотосферному магнитному полю (<http://wso.stanford.edu>), индукции ГМП, скорости солнечного ветра (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.htm>). Индекс фотосферного магнитного поля $B2 = B^2/8\pi$ рассчитывался с использованием гармонических коэффициентов (<http://wso.stanford.edu>), полученных из наблюдений обсерватории им. Вилкокса. Процедура расчета $B2$ изложена в [14].

В анализе данных по космическим лучам использованы данные измерений КЛ на баллонах в стратосфере полярных широт [15] и данные нейтронных мониторов (НМ) (<http://www.nmdb.eu/>). К сожалению, ряды использованных параметров ограничены во времени, причем начало мониторинга различно. Поэтому мы старались всюду указывать интервал времени, к которому относится каждый конкретный результат.

Процедура выделения КДО на примере площади солнечных пятен показана на рис. 1. КДО, представленные сплошной черной кривой, получены вычитанием пунктирной кривой (25-месячное сглаживание среднемесячных площадей солнечных пятен) из данных 7-месячного сглаживания (толстая серая кривая). Тонкая серая линия показывает КДО для индекса фотосферного магнитного поля $B2$. Хорошо видна когерентность в КДО площадей солнечных пятен и $B2$. КДО для разных индексов солнечной активности демонстрируют когерентность на всех уровнях солнечной атмосферы, что является одним из основных характерных свойств этих вариаций [16]. Так как ряд $B2$ не очень продолжительный, мы в дальнейшем будем использовать площадь солнечных пятен в качестве индекса солнечных КДО. На рис. 1 хорошо виден нерегулярный характер КДО, они, скорее, представляют собой последовательность импульсов разной продолжительности. В то же время характерным свойством солнечных КДО является модуляция их амплитуды в 11-летнем цикле. В годы слабой активности КДО не исчезают, но их амплитуда уменьшается [16].

На рис. 2 показаны КДО, полученные по измерениям КЛ на баллонах в стратосфере в Мурманской области (верхняя кривая), на НМ Клаймакс (средняя кривая) и Москва (нижняя кривая). Видно, что КДО в КЛ хорошо коррелируют между собой. Эта когерентность имеет место для КЛ в широком диапазоне энергий — от ~100 МэВ по данным *IMP8* [17] и *PAMELA* [18] за пределами атмосферы до десятков ГэВ по данным экваториальных нейтронных мониторов. Коэффициенты корреляции между результатами почти любых двух измерений (за исключением НМ Оулу) в пе-

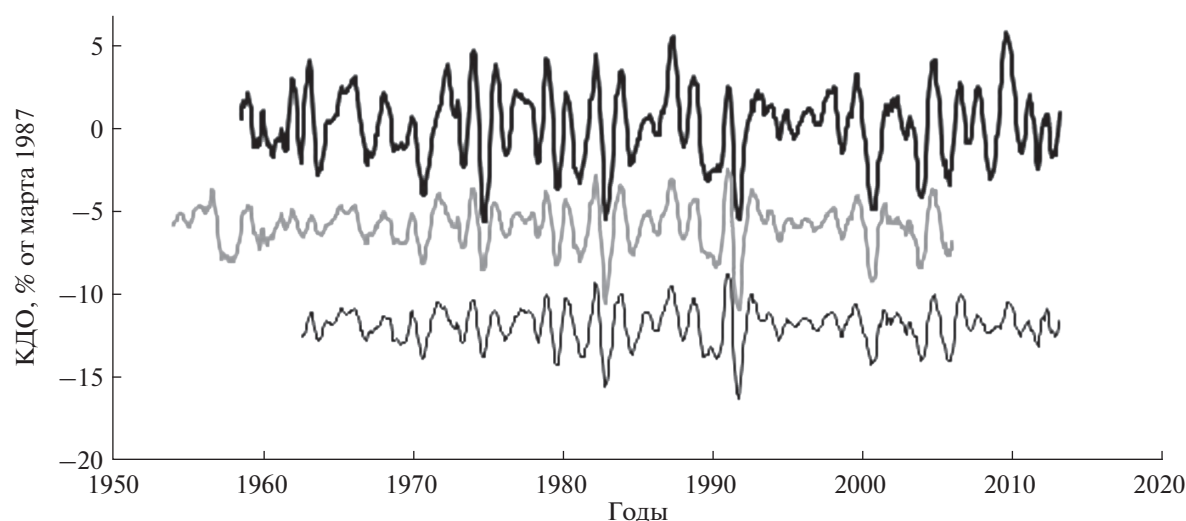


Рис. 2. Квази-двухлетние осцилляции интенсивности КЛ. Две нижние кривые сдвинуты вниз на 6 и 12% соответственно для удобства рассмотрения. Верхняя кривая – баллонные измерения, средняя – НМ Клаймакс, нижняя – НМ Москва.

риод совместной работы варьируют от 0.72 до 0.89. Таким образом, КДО в КЛ являются хорошо выраженной вариацией, присутствующей постоянно и охватывающей диапазон энергий КЛ, подверженный модуляции солнечной активностью. В то же время на рис. 2 можно видеть нерегулярный характер КДО в КЛ и подавление КДО в 1990-е годы, аналогичное солнечным КДО. Однако, в отличие от солнечной активности, не наблюдается ярко выраженной зависимости амплитуды КДО в КЛ от фазы 11-летнего солнечного цикла.

3. АМПЛИТУДЫ КДО И 11-ЛЕТНИХ ВАРИАЦИЙ

Амплитуды квазипериодических вариаций определялись как разности между усредненным максимумом и усредненным минимумом вариаций за время наблюдений, указанное в табл. 1. Например, для получения амплитуды 11-летней вариации КЛ в стратосфере усреднялись данные максимумов интенсивности по 25-месячным сглаженным за V.1965, V.1976, XI.1986, IX.1996,

VI.2009. Из полученного результата вычиталось среднее значение для минимумов интенсивности КЛ в XI.1969, II.1982, X.1990 и I.2001. В табл. 1 указаны среднеквадратичные ошибки. Аналогичная процедура выполнена для площади пятен и ГМП (время максимумов и минимумов для каждого индекса свое). Амплитуда КДО также находилась как разность средних значений максимумов и минимумов осцилляции за указанный интервал времени.

В последней строке табл. 1 даны отношения амплитуд КДО и 11-летней вариации. Они составляют 20–30% для всех исследованных параметров. Эти значения для КЛ несколько меньше полученных для КЛ в [13], где амплитуды КДО определялись за 5-летние периоды вокруг максимумов солнечной активности и составляли от 28 до 77% для разных НМ и разных циклов солнечной активности. Возможно, что в периоды низкой солнечной активности в нашу оценку внесли вклад КДО меньшей амплитуды, хотя из рис. 2 не следует значительной модуляции амплитуды КДО в КЛ в 11-летнем цикле. Естественно, что значения амплитуд как 11-летнего цикла, так и

Таблица 1. Амплитуды 11-летних вариаций и КДО

	Площадь пятен, м.д.п.	B , нТ	КЛ: бал., Мурманск, %1987.2	КЛ: НМ, Москва, %1987.2
Период наблюд., годы	1954.3–2012	1965.96–2012	1958.6–2012	1963.6–2012
11-летний цикл	1911 ± 210	3.10 ± 0.50	32.5 ± 3.5	13.0 ± 1.7
КДО	384 ± 49	0.95 ± 0.08	5.45 ± 0.37	2.62 ± 0.23
$A(\text{КДО})/A(11\text{лет})$	0.20 ± 0.03	0.31 ± 0.06	0.17 ± 0.02	0.20 ± 0.03

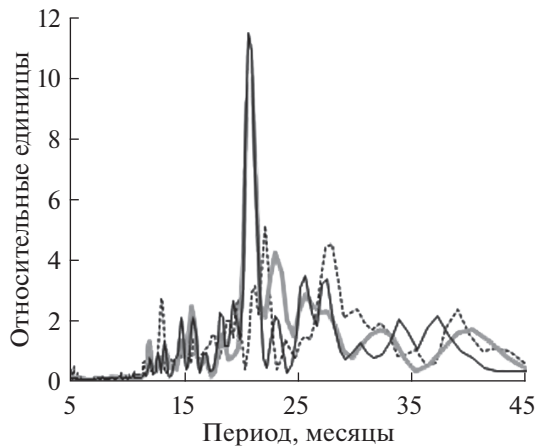


Рис. 3. Периодограмма мощности осцилляции для комбинированного ряда КЛ в 1952–2013 гг. (тонкая черная кривая), индукции ГМП в 1966.5–2013 гг. (серая кривая) и площади солнечных пятен в 1952–2013 гг. (пунктир).

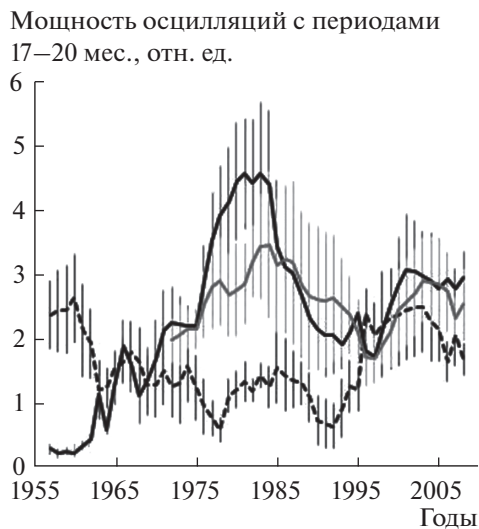


Рис. 4. Сглаженный временной ход мощности осцилляции в диапазоне периодов 17–20 мес. Черная кривая – КЛ, серая кривая – индукция ГМП, пунктир – площадь солнечных пятен. Каждая точка получена из спектра мощностей за 11 лет.

КДО зависят от процедуры вычисления, которая различна в нашей работе и в [13], но основной вывод заключается в том, что КДО составляют значительную часть вариабельности солнечной активности, гелиосферного магнитного поля, а также потоков КЛ.

4. ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ВЫДЕЛЕННЫМ ПЕРИОДОМ $T \approx 1.7$ ГОДА

Солнечные КДО демонстрируют признаки стохастичности [2, 16], т.е. на протяжении доста-

точно долгого времени нет никакого выделенного периода. Автокорреляционная функция площади солнечных пятен по измерениям с 1875 г. до настоящего времени спадает до нуля при сдвиге на 1 месяц, а при дальнейших сдвигах до 40 месяцев остается в пределах ± 0.2 без указаний на выделенную периодичность. В спектре мощностей солнечных КДО за тот же период времени можно видеть множество пиков примерно одинаковой мощности [16]. Что касается межпланетных индексов и КЛ, то большинство работ [6–10] указывает на выделенные периоды 1.3–1.7 года, однако длительность мониторинга этих параметров сравнительно мала.

Чтобы увеличить длительность ряда КЛ для анализа динамики спектра мощностей, мы построили комбинированный ряд потоков КДО в КЛ путем нормировки КДО нейтронных мониторов Клаймакс и Москва за период их совместной работы VIII.1963–XI.2005. Правомочность этой процедуры обусловлена подобием КДО в КЛ для разных станций, которое видно на рис. 2. Надежность комбинированного ряда была подтверждена путем его сравнения с аналогичным рядом, полученным с использованием данных НМ Клаймакс и Апатиты.

Известно [11, 16], что солнечные КДО передаются в межпланетную среду открытым магнитным потоком Солнца, временной ход которого хорошо воспроизводится временным ходом индукции ГМП на орбите Земли [19]. Корреляция солнечных и гелиосферных КДО низкая, что еще раз подтверждается рис. 3, на котором представлена мощность осцилляции в зависимости от периода (периодограмма) КДО в КЛ, площади солнечных пятен и ГМП за период одновременных измерений. Периодограмма площадей пятен имеет несколько пиков, среди которых самые высокие при $T \approx 22$ мес. и $T \approx 29$ мес., причем мощность осцилляции при $T \approx 20$ мес. невелика и не согласуется с периодограммами для КЛ и ГМП. На периодограммах КЛ и ГМП также наблюдаются разнообразные периоды, но явно превалирует пик с периодом $T \approx 20$ мес. (1.7 года), который изучался в работах [7, 10] и др. В работе [11] на примере НМ Клаймакс мы показали, как менялись периодограммы для интервалов 1957–1969 гг., 1979–1987 гг. и 1988–2005 гг. Имея комбинированный ряд данных КЛ за 1952–2013 гг., мы проследили, как развивалась осцилляция с $T \approx 20$ мес. на протяжении последних 60 лет, для чего построили временную зависимость мощности осцилляции в интервале периодов 17–20 мес. Для этого рассчитывался спектр мощности за каждые 11 лет, начиная с 1952 г., со скользящим сдвигом в 1 год, представленный на рис. 4.

Мы видим, что в солнечной активности КДО с $T \approx 20$ мес. были наиболее мощными в конце

Таблица 2. Максимальные коэффициенты корреляции между солнечным и гелиосферным магнитными полями и космическими лучами

	$R(B2, B)$, 1978.5– 1913.4 гг.	Запад. B , мес.	$R(B2, \text{КЛ})$, 1978.5– 1913.4 гг.	Запад. КЛ, мес.	$R(B, \text{КЛ})$, 1967.2– 1913.4 гг.	Запад. КЛ, мес.	$R(BV, \text{КЛ})$, 1967.2– 1913.4 гг.	Запад. КЛ, мес.
Долговр. вариации	$\approx 0.89 \pm$ ± 0.01	4–10	$\approx -0.90 \pm$ ± 0.01	4–8	$\approx -0.87 \pm$ ± 0.01	1–2	$-0.82 \pm$ ± 0.01	0–1
КДО	$0.53 \pm$ ± 0.03 ≥ 0.5	4–5 3–6	$-0.46 \pm$ ± 0.04	3	$-0.68 \pm$ ± 0.02 ≈ -0.66	1 0–1	$-0.72 \pm$ ± 0.02 ≈ -0.68	1 0–2

1950-х и 1990-х годов, тогда как в КЛ и ГМП мощная ≈ 20 мес. вариация существовала с 1975 г. по 1990 г. Изменчивость характеристик этой вариации в 1970–1980-х годах была показана в работе [7]. В 1970-х годах период был $T \approx 500$ дней (16.5 мес.), а в 1980-х годах $T \approx 600$ дней (20 мес.). В конце 1970–начале 1980-х годов осцилляция с $T \approx 500$ –600 дней практически отсутствовала. Вопрос, каким образом сформировались достаточно устойчивые КДО с $T \approx 20$ мес. в открытом магнитном потоке Солнца при отсутствии их на Солнце, представляет большой интерес и в настоящее время не имеет ответа. Таким образом, выделенный период может существовать в КДО только на протяжении некоторого, хотя и достаточно длинного, отрезка времени. Период постоянных наблюдений межпланетных индексов и КЛ слишком мал для того, чтобы понять, есть ли в КДО этих параметров стохастическая составляющая.

5. СВЯЗЬ КДО В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ, СРАВНЕНИЕ КВАЗИ-ДВУХЛЕТНИХ И 11-ЛЕТНИХ ВАРИАЦИЙ

Проблема, связанная с КДО в КЛ и имеющая отношение ко всем проявлениям КДО в гелиосфере, относится к формированию открытого магнитного потока. Есть ли какие-то закономерности, связывающие КДО на Солнце и в межпланетной среде? Отрицательная корреляция между КДО в КЛ и B ГМП при нулевом сдвиге ($d = 0$) достаточно высокая $R(B, \text{КЛ}, d = 0) = -0.66 \pm 0.02$. Она улучшается при запаздывании КЛ на 1 месяц до $R(B, \text{КЛ}, d = 1) = -0.68 \pm 0.02$. В то же время коэффициент корреляции между КДО в КЛ и в фотосферном магнитном поле $B2$ при нулевом запаздывании очень мал $R(B2, \text{КЛ}, d = 0) = -0.29 \pm \pm 0.04$ [11]. Практически такая же корреляция между КДО фотосферного и гелиосферного полей $R(B2, B, d = 0) = 0.25 \pm 0.05$. Однако корреляция ГМП и КЛ с $B2$ улучшается при запаздывании B ГМП и КЛ относительно $B2$. Хотя коэффициенты корреляции небольшие, но они значительно выше тех, которые получаются при нулевом

сдвиге. В табл. 2 даны максимальные коэффициенты корреляции для КДО и долговременных вариаций, которые были взяты как 25-месячные скользящие средние для периода времени, указанного в верхней строке табл. 2. Характерно, что для долговременных вариаций коэффициенты корреляции $R(B2, B)$ и $R(B2, \text{КЛ})$ практически одинаковые и очень высокие, они даже чуть выше (хотя почти в пределах ошибок), чем $R(B, \text{КЛ})$. При этом запаздывание КЛ относительно B ГМП значительно меньше, чем относительно $B2$ – порядка 1–2 мес. по сравнению с 4–8 мес. Для КДО $R(B2, B)$ и $R(B2, \text{КЛ})$ корреляция значительно хуже, чем для долговременных вариаций, но она растет с запаздыванием КЛ на 3–5 мес. В то же время КДО в КЛ почти не запаздывают по отношению КДО в B ГМП, и $R(B, \text{КЛ})$ значительно выше, чем $R(B2, \text{КЛ})$.

Результаты табл. 2 можно понять, если предположить, что формирование КДО открытого магнитного потока имеет характерное время порядка 3–5 мес., причем долговременная составляющая формируется даже дольше, до 10 мес., и лучше передает в межпланетную среду вариации солнечного магнитного поля, чем КДО.

Запаздывание КЛ относительно B ГМП для долговременной составляющей немного больше, чем для КДО, и, как было показано раньше [11, 16], коэффициенты корреляции достаточно высокие. Интересным является тот факт, что корреляция КЛ с произведением BV , где V – скорость солнечного ветра, для КДО выше, чем с B ГМП: $|R(BV, \text{КЛ})| > |R(B, \text{КЛ})|$, тогда как для долговременных вариаций наоборот: $|R(BV, \text{КЛ})| < |R(B, \text{КЛ})|$. Этот факт требует дальнейшего изучения.

Изменения потока КЛ связаны с изменениями B ГМП. Оказывается, чувствительность КЛ к изменениям B ГМП различна для долговременных вариаций и КДО. На рис. 5 представлены соотношения между среднемесячными значениями КЛ по измерениям на НМ Москва и B ГМП для реальных значений (рис. 5а), 25-месячных сглаженных (рис. 5б) и КДО (рис. 5в). Запаздывание КЛ не учитывалось. Мерой зависимости КЛ от B ГМП может служить коэффициент регрессии,

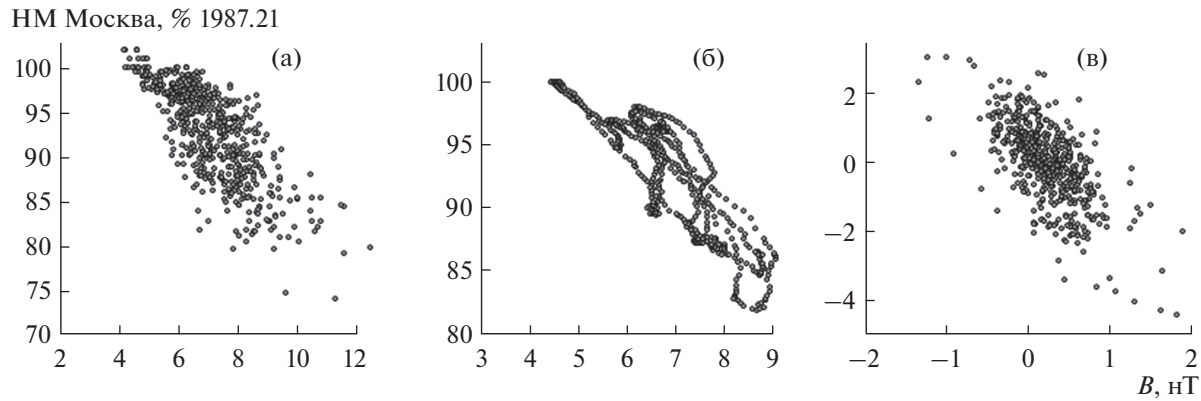


Рис. 5. Регрессия между значениями индукции ГМП V и интенсивностью КЛ: а – среднемесячные значения, б – 25-месячные сглаженные, в – КДО. Потоки КЛ нормированы к 100% в марте 1987 г.

который приведен в табл. 3. Наиболее сильная зависимость от V ГМП наблюдается в долговременных вариациях КЛ, самая слабая зависимость – в КДО. Результат подтверждается, если рассматривать потоки КЛ, измеренные на баллонах в стратосфере (см. табл. 3). Это можно рассматривать как указание на разные механизмы образования долговременной модуляции и КДО в КЛ.

Дополнительным указанием на разные механизмы образования долговременной вариации КЛ и КДО является различие коэффициентов регрессии для долговременных вариаций и КДО между потоками КЛ, измеренными в стратосфере ($N(bal)$, эффективная энергия $E \approx 6$ ГэВ) и измеренными на НМ Москва ($N(NM)$, $E \approx 15$ ГэВ). В предположении линейной зависимости $N(bal) = A_1 N(NM) + A_2$, коэффициент для долговременной вариации $A_1 = 2.40 \pm 0.02$ и для КДО $A_1 = 1.71 \pm 0.04$. Отсюда можно заключить, что КДО имеют более жесткую зависимость от энергии.

6. ВЫВОДЫ

В этой работе продолжено изучение эмпирических свойств КДО в КЛ, начатое в работе [11], поэтому выводы касаются результатов, полученных в обеих работах.

КДО в КЛ являются следствием КДО в солнечной активности. Так же, как на Солнце, они существуют постоянно, характеризуются нестабильным периодом и амплитудой. Модуляция амплитуд КДО 11-летним циклом в КЛ выражена слабее, чем

на Солнце. По нашим данным, КДО в КЛ являются когерентными в диапазоне энергий КЛ от ≈ 100 МэВ до десятков ГэВ. Такие явления, как эффект Гневывшева и ступенчатая модуляция КЛ, являются проявлениями КДО в КЛ [11, 13, 16].

Связь между солнечными КДО и КЛ осуществляется открытым магнитным потоком Солнца, который хорошо отображается V ГМП. По результатам этой работы, КДО открытого магнитного потока формируются из солнечного магнитного поля в течение 3–5 мес., претерпевая некоторые искажения. Поэтому корреляция между солнечными и гелиосферными КДО невелика и достигает максимума при запаздывании КЛ на 3–5 мес., тогда как коэффициент корреляции КДО в КЛ и V ГМП достигает ≈ 0.7 при запаздывании КЛ на 0–1 мес.

Средняя амплитуда КДО в КЛ составляет $\approx 20\%$ от амплитуды 11-летних вариаций, что примерно совпадает со значением для солнечных КДО. Для V ГМП амплитуда КДО достигает 30% от амплитуды 11-летней вариации.

В 1970–1980-х годах в КЛ наблюдалась ярко выраженная модуляция с периодом $T \approx 20$ мес., которая изучалась многими исследователями [например, 7, 8, 10]. Эта модуляция КЛ не существовала до начала 1970-х годов и не была постоянной в течение всего периода ее существования [7]. Она хорошо коррелировала с V ГМП, тогда как практически не наблюдалась в солнечной активности. Особенности формирования открытого магнитного потока, насколько нам известно, не изучены в до-

Таблица 3. Коэффициенты регрессии между интенсивностью КЛ и V ГМП

НМ Москва и V ГМП			Бал. Мурманск и V ГМП		
среднемесячные	сглаж. 25-мес.	КДО	среднемесячные	сглаж. 25-мес.	КДО
-2.99 ± 0.11	-3.78 ± 0.09	-1.89 ± 0.09	-6.85 ± 0.28	-8.97 ± 0.25	-3.01 ± 0.20

статочной мере, чтобы объяснить наличие длительно существующей КДО с выделенным периодом в межпланетной среде и КЛ. Постоянные наблюдения КЛ и параметров межпланетной среды пока недостаточно длительны, чтобы можно было сделать вывод о наличии стохастичности, признаки которой обнаружены в КДО солнечной активности [2, 11].

Хотя в настоящее время нет работ, моделирующих формирование КДО в КЛ, в этой работе получены указания, что механизмы образования долговременных вариаций и КДО в КЛ различны. Об этом свидетельствует различие коэффициентов регрессии для долговременных вариаций и КДО между КЛ и В ГМП: для долговременных вариаций этот коэффициент примерно вдвое больше. Различной является и энергетическая зависимость КДО и долговременных вариаций – для КДО она более жесткая. Моделирование этих особенностей КДО может дать новую информацию об относительной роли разных процессов, приводящих к наблюдаемой модуляции потоков КЛ солнечной активности.

Авторы благодарят исследователей, предоставляющих свободный доступ к своим данным в Интернете. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-02-00905а, 14-02-10006к, 13-02-00585, 13-02-00931, 15-02-10070к и Программы Президиума РАН “Фундаментальные свойства материи и астрофизика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Benevolenskaya E.E.* Double magnetic cycle of solar activity // *Solar Phys.* 1995. V. 161. P. 1–8. doi: 10.1007/BF00732080
2. *Wang Y.-M., Sheeley N.R., Jr.* On the fluctuating component of the Sun’s large-scale magnetic field // *Astrophys. J.* 2003. V. 590. № 2. P. 1111–1120. doi: 10.1086/375026
3. *Vecchio A., Laurenza M., Meduri D. et al.* The dynamics of the solar magnetic field: Polarity reversals, butterfly diagram, and quasi-biennial oscillations // *Astrophys. J.* 2012. V. 749. № 1. P. 27. doi: 10.1088/0004-637X/749/1/27
4. *Попова Е.П., Юхина Н.А.* Квазидвухлетний цикл солнечной активности и теория динамо // *Письма в Астрономический журнал.* 2013. Т. 39. № 10. С. 810–816.
5. *Popova E.P., Potemina K.A., Yukhina N.A.* Double cycle of solar activity in a two-layer medium // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014. V. 54. № 7. P. 877–881.
6. *Rybak J., Antalova A., Storini M.* The wavelet analysis of the solar and cosmic-ray data // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 97. P. 359–362. doi: 10.1023/A:1011805923567
7. *Kudela K., Rybak J., Antalova A., Storini M.* Time evolution of low-frequency periodicities in cosmic ray intensity // *Solar Phys.* 2002. V. 205. № 1. P. 165–175. doi: 10.1023/A:1013869322693
8. *Kato C., Munakata K., Yasue S. et al.* A ~1.7-year quasi-periodicity in cosmic ray intensity variation observed in the outer heliosphere // *J. Geophys. Res. (Space Physics).* 2003. V. 108. № A10. P. 1367. doi: 10.1029/2003JA009897
9. *Ruzmaikin A., Cadavid A.C., Lawrence J.* Quasi-periodic patterns coupling the Sun, solar wind and the Earth // *J. Atmos. Solar-Terrest. Phys.* 2008. V. 70. № 17. P. 112–2117. doi: 10.1016/j.jastp.2008.09.013
10. *Kudela K., Mavromichalaki H., Papaioannou A., Geronidou M.* On mid-term periodicities in cosmic rays // *Solar Phys.* 2010. V. 266. № 1. P. 173–180. doi: 10.1007/s11207-010-9598-0
11. *Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B. et al.* Correlation of the quasi-biennial oscillations in galactic cosmic rays and in the solar activity indices // *J. Physics: Conf. Series.* 2015. № 632. 012050.
12. *Hathaway D.H.* The Solar Cycle // *Living Reviews in Solar Physics.* 2010. V. 7. № 1. doi: 10.12942/lrsp-2010-1
13. *Laurenza M., Vecchio A., Storini M., Carbone V.* Quasi-biennial modulation of galactic cosmic rays // *Astrophys. J.* 2012. V. 749. № 2. P. 167. doi: 10.1088/0004-637X/749/2/167
14. *Krainev M.B., Bazilevskaya G.A., Makhmutov V.S.* On the large scale solar magnetic fields and the double peak structure of solar activity during the maximum phase of solar cycle // *Труды конференции “Крупномасштабные структуры солнечной активности: достижения и перспективы”.* С-Петербург: ГАО РАН, 1999. С. 121–126.
15. *Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al.* Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere // *Adv. Space Res.* 2009. V. 44. № 10. P. 1124–1137.
16. *Bazilevskaya G., Broomhall A.-M., Elsworth Y., Nakariakov V.M.* A combined analysis of the observational aspects of the quasi-biennial oscillation in solar magnetic activity // *Space Sci. Rev.* 2014. V. 186. P. 359–386.
17. *McDonald F.B.* Cosmic-ray modulation in the heliosphere – a phenomenological study // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 83. P. 33–50.
18. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* Time dependence of the proton flux measured by PAMELA during the 2006 July–2009 December solar minimum // *Astrophys. J.* 2013. V. 765. № 2. P. 91. doi: 10.1088/0004-637X/765/2/91
19. *Lockwood M.* Long-term variations in the magnetic fields of the Sun and the heliosphere: Their origin, effects, and implications // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № A8. P. 16021–16038. doi: 10.1029/2000JA9000115