

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.

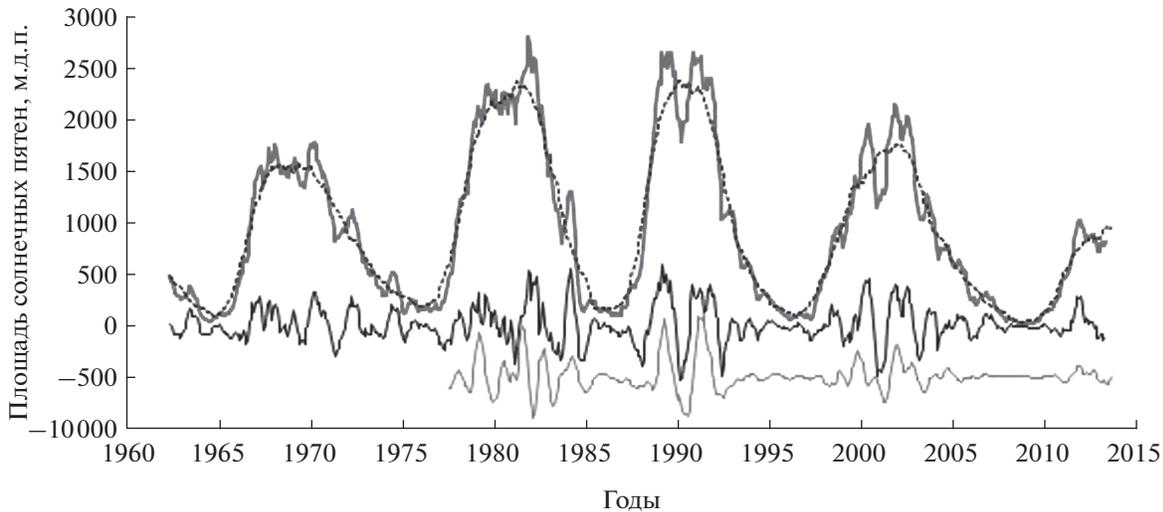
В контексте развития КДО в КЛ нас интересует проблема связи солнечного и гелиосферного магнитного поля при разных значениях характерных времен, а именно 11-летней и квази-двухлетней вариации.

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 ( $\approx 19$  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.

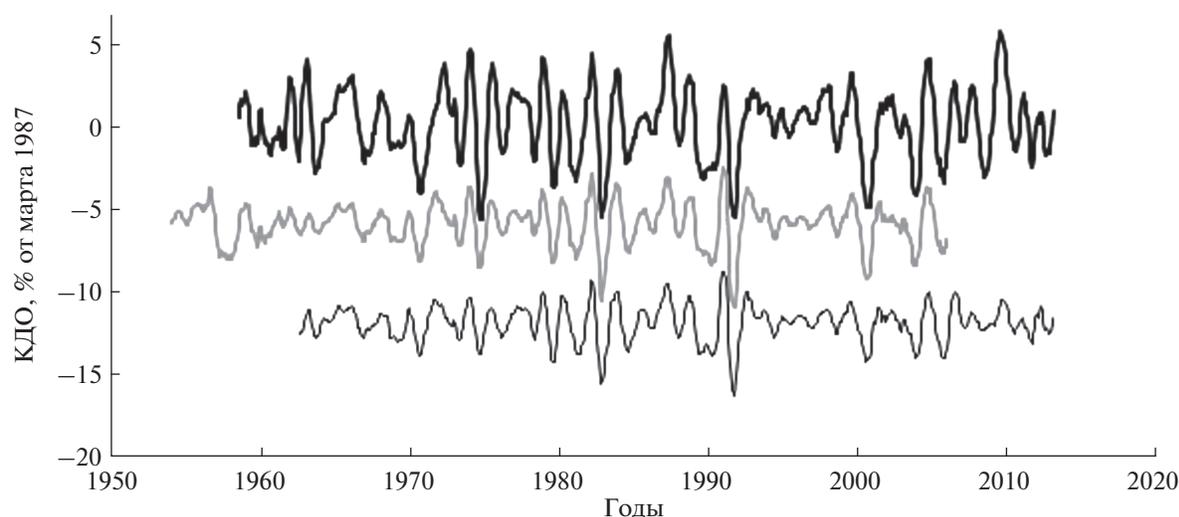
одом 7 и 25 мес., затем вычитаем из первого ряда второй. Эта процедура эквивалентна применению фильтра, пропускающего без искажений сигнал с периодом 1.5–1.7 года и пропускающего с ослаблением <50% сигнал в диапазоне 1–3.3 года. Этот простой подход позволяет выделить осцилляции с сохранением нестабильности 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 – балонные 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

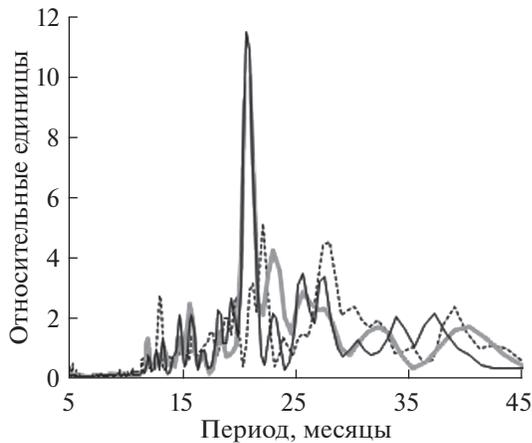
Амплитуды квазипериодических вариаций определялись как разности между усредненным максимумом и усредненным минимумом вариаций за время наблюдений, указанное в табл. 1. Например, для получения амплитуды 11-летней вариации КЛ в стратосфере усреднялись данные максимумов интенсивности по 25-месячным сглаженным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

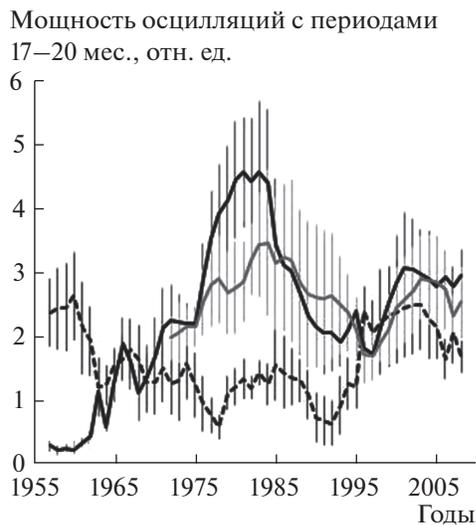
В последней строке табл. 1 даны отношения амплитуд КДО и 11-летней вариации. Они составляют 20–30% для всех исследованных параметров. Эти значения для КЛ несколько меньше полученных для КЛ в [13], где амплитуды КДО определялись за 5-летние периоды вокруг максимумов солнечной активности и составляли от 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	$1911 \pm 210$	$3.10 \pm 0.50$	$32.5 \pm 3.5$	$13.0 \pm 1.7$
КДО	$384 \pm 49$	$0.95 \pm 0.08$	$5.45 \pm 0.37$	$2.62 \pm 0.23$
$A(\text{КДО})/A(11\text{лет})$	$0.20 \pm 0.03$	$0.31 \pm 0.06$	$0.17 \pm 0.02$	$0.20 \pm 0.03$



**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  $\pm 0.2$  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	$\approx 0.89 \pm$ $\pm 0.01$	4–10	$\approx -0.90 \pm$ $\pm 0.01$	4–8	$\approx -0.87 \pm$ $\pm 0.01$	1–2	$-0.82 \pm$ $\pm 0.01$	0–1
КДО	$0.53 \pm$ $\pm 0.03$ $\geq 0.5$	4–5 3–6	$-0.46 \pm$ $\pm 0.04$	3	$-0.68 \pm$ $\pm 0.02$ $\approx -0.66$	1 0–1	$-0.72 \pm$ $\pm 0.02$ $\approx -0.68$	1 0–2

1950-х и 1990-х годов, тогда как в КЛ и ГМП мощная  $\approx 20$  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,

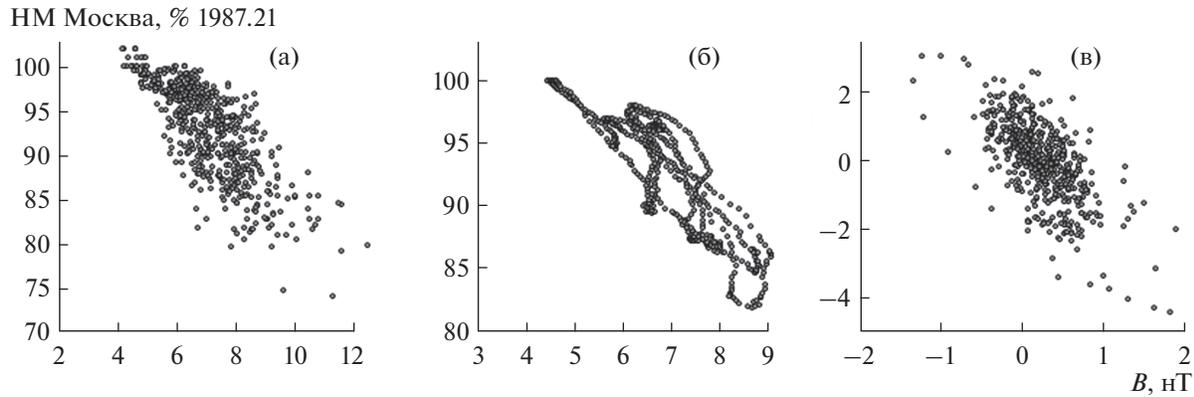


Рис. 5. Регрессия между значениями индукции ГМП  $V$  и интенсивностью КЛ: а – среднемесячные значения, б – 25-месячные сглаженные, в – КДО. Потоки КЛ нормированы к 100% в марте 1987 г.

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  $\approx 100$  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  $\approx 0.7$  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
$-2.99 \pm 0.11$	$-3.78 \pm 0.09$	$-1.89 \pm 0.09$	$-6.85 \pm 0.28$	$-8.97 \pm 0.25$	$-3.01 \pm 0.20$

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: 10.1029/2000JA000115