

О ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ 2–40 МЕСЯЦЕВ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

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

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 28 августа 2021 г.,
после переработки 10 ноября 2021 г.
Принята к публикации 25 ноября 2021 г.

Выполнено сравнение квазидвухлетних вариаций и вариаций типа Ригера (характерное время меньше 1 года) в солнечной активности, межпланетном магнитном поле и в модуляции потоков галактических космических лучей. Показано, что по сравнению с 11-летним циклом квазидвухлетние вариации меньше подавлены в межпланетной среде, чем на Солнце. Хотя вариации типа Ригера примыкают по частоте к квазидвухлетним вариациям, они заметно отличаются от них по степени воспроизведения в межпланетной среде и влиянию на модуляцию космических лучей.

Статья для специального выпуска ЖЭТФ, посвященного 100-летию А. Е. Чудакова

DOI: 10.31857/S0044451022040101
EDN: DQGPZD

сферных частиц, а также искусственной радиоактивности [1].

1. ВВЕДЕНИЕ

Регулярные измерения потоков заряженных частиц в атмосфере на разных широтах были начаты С. Н. Верновым и А. Н. Чарахчьяном в 1957 г., когда был объявлен Международный геофизический год, и продолжают по настоящее время. Этот эксперимент не смог бы выжить, если бы с начала 1980-х годов он не получал постоянную поддержку А. Е. Чудакова, который добился регулярного финансирования от АН СССР. Теперь, несмотря на постоянные трудности, мы имеем уникальные ряды данных о ионизирующей радиации в атмосфере более чем за пять 11-летних циклов солнечной активности. Результаты измерений, полученные на баллонах, используются для изучения вариаций потоков галактических лучей, которые непрерывно бомбардируют Землю, для регистрации и изучения спорадических изменений радиационной обстановки в атмосфере, связанных с приходом солнечных и/или магнито-

Длинные ряды данных используются для изучения вариаций состояния гелиосферы и околоземной среды, которая представляет собой сложнейшую систему. Высокоэнергичные заряженные частицы галактического, солнечного и магнитосферного происхождения играют важную роль в формировании космической погоды. Ионизация атмосферы влияет на электрические явления и химические процессы, которые определяют погоду и климат на планете. Модуляция потоков ионизирующих частиц, бомбардирующих атмосферу Земли, зависит от постоянно меняющейся солнечной активности. Весь комплекс процессов в околоземном пространстве изучается солнечно-земной физикой, которая объединяет в себе физику Солнца, физику межпланетной среды, физику магнитосферы, атмосферы и космических лучей. С течением времени данные геофизических наблюдений приобретают всю большую ценность. Это становится особенно ясным сейчас, когда происходят быстрые изменения климата, причины которых понять необходимо, но пока не удается.

* E-mail: bazilevskaya@lebedev.ru

Настоящая работа, в которой используются результаты баллонных и наземных измерений потоков космических лучей (КЛ), а также параметров на Солнце и в межпланетной среде, влияющих на КЛ, посвящена изучению вариаций с характерными временами от нескольких месяцев до нескольких лет на фоне 11-летнего цикла солнечной активности. Целью работы является изучение воспроизведения указанных вариаций солнечной активности в параметрах межпланетного магнитного поля и модуляции потоков галактических КЛ.

В солнечной активности в диапазоне 10–200 нГц, т. е. 2–48 месяцев, выделяются два диапазона — квазидвухлетние осцилляции (КДО) с характерными временами 1–4 года и периодичности типа Ригера с характерными временами до 1 года. В обоих диапазонах можно видеть множество пиков, ни один из которых не отражает постоянно присутствующую периодическую вариацию, такую как 27-дневная волна, связанная с периодом обращения Солнца вокруг своей оси.

Широко известные КДО в атмосферных процессах [2] не имеют непосредственной связи с КДО на Солнце, но они послужили стимулом к изучению КДО внеземного происхождения [3]. Широкое изучение этих вариаций началось после их обнаружения в потоке солнечных нейтрино [4]. Обзор результатов наблюдений КДО до 2014 г. выполнен в работе [5], где суммированы их основные свойства:

- значения характерного времени КДО меняются в пределах 1–4 года, причем нет доминирующей периодичности;

- в каждом полушарии Солнца КДО развиваются независимо, но практически синхронны в пределах одного полушария на всех уровнях солнечной атмосферы, а также под фотосферой, как следует из данных гелиосейсмологии;

- КДО наблюдаются в фотосферном магнитном поле в фазе с другими индексами солнечной активности [6, 7];

- КДО передаются в межпланетную среду открытым магнитным потоком Солнца, т. е. компонентой магнитного поля Солнца, которая открывается в межпланетную среду;

- амплитуда КДО зависит от фазы 11-летнего цикла и максимальна в годы высокой солнечной активности;

- КДО наблюдаются в параметрах межпланетной среды, геомагнитной активности и модуляции потоков галактических КЛ.

Авторы работы [8] показали, что КДО могут быть связаны со стохастическим процессом воз-

никновения активных областей, случайным образом распределенных по долготе. Джалилов и др. [9] предположили, что КДО являются нестабильной модой волн Россби в зоне лучистого переноса. Авторы, считающие КДО фундаментальным явлением, связывают их с солнечным динамо. Беневоленская [10] предложила модель, в которой рассматривалось дополнительное динамо, оперирующее в верхних слоях конвективной зоны Солнца. Авторы работы [11] ввели модель турбулентного нелинейного динамо, альтернативную модели Бэбкока и Лейтона [12]. Новые аргументы в пользу фундаментального характера КДО представлены в работе [13].

Вариации с периодом 154 сут были первоначально обнаружены в частоте гамма- и рентгеновских вспышек в работе [14]. Впоследствии эта и близкие ей периодичности были обнаружены в других проявлениях солнечной активности: в частоте оптических вспышек, микроволновых всплесков, числе солнечных пятен, радиоизлучении 10.7 см, частоте выбросов корональной массы и т. д. (см. работы [15–17] и ссылки там). В литературе они получили название периодичности типа Ригера (ПТР). Довольно скоро стало ясно, что период ПТР может варьироваться в достаточно широких пределах, например, 51–128 сут [18], 185–195 сут [19]. В работе [20] ПТР были найдены в индукции межпланетного магнитного поля. ПТР в потоках КЛ изучались в работе [21]. Основные свойства ПТР, такие как неустойчивый период, отсутствие синхронизации между северным и южным полушариями Солнца [22], зависимость от фазы 11-летнего солнечного цикла [23], сходны со свойствами КДО. В последние годы появилось немало статей, в которых эти два диапазона объединяются [24–26].

Большинство исследователей предполагают фундаментальный характер ПТР. Бэй и Старрок [27] предположили, что ПТР являются субгармониками «фундаментального периода» 25.5 сут, играющего роль внутренних солнечных часов. Тот факт, что значения периодов ПТР меньше в более мощных циклах солнечной активности, послужил основанием для разработки теоретической модели, связывающей ПТР с волнами Россби [16, 18, 19, 22].

Несмотря на длительный период изучения, вопрос о том, действительно ли КДО и ПТР являются характерными вариациями солнечной активности, до сих пор является дискуссионным, поскольку мощный 11-летний цикл маскирует все остальные вариации. Согласно работе [28], в солнечной активности отсутствуют статистически обоснованные периодичности, за исключением 11-летнего цик-

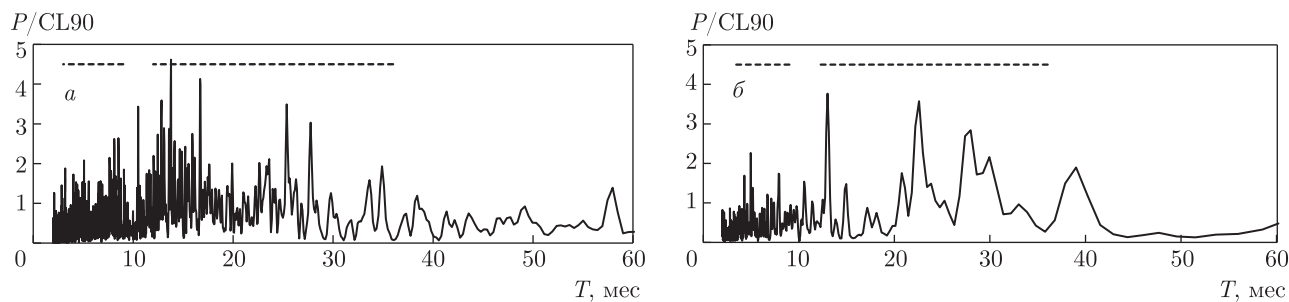


Рис. 1. Периодограммы числа солнечных пятен Rz с 1750 по 2020 гг. (а) и с июня 1966 г. по декабрь 2019 г. (б). 11-летние вариации подавлены путем вычитания из первоначального ряда значений, сглаженных по 25 месяцам. По осям ординат — мощность P в единицах 90 % доверительного уровня CL_{90} . Штриховыми отрезками обозначены диапазоны КДО и ПТР

ла и 27-дневного периода обращения Солнца вокруг своей оси. Авторы этой работы приходят к заключению, что нет необходимости искать специфический механизм для образования КДО на Солнце, поскольку они полностью соответствуют случайным компонентам, типичным для турбулентных конвективных систем, к которым относится солнечное динамо. В то же время авторы работы [28] признают, что указанный диапазон характеризуется особой перемежаемостью (intermittency), отражающей турбулентную природу солнечной активности [29].

Следует отметить, что стохастичность КДО и отсутствие выделенного периода были подчеркнуты в большинстве работ, исследующих КДО, в том числе и наших [5–7, 30]. Хотя отчетливая периодичность отсутствует, в солнечной активности выделяются заметные временные структуры в диапазоне КДО и ПТР, которые имеют ряд характерных особенностей, передаются в межпланетную среду и модулируют потоки КЛ [30]. Их изучение дает дополнительную информацию о динамике солнечной активности и о процессах в межпланетном пространстве. Ввиду того, что в КДО отсутствуют четкие периодичности, правильнее называть это явление средневременными вариациями внутри солнечного цикла. Однако в данной работе мы придерживаемся старого названия.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

В качестве иллюстрации значимости КДО и ПТР в солнечной активности на рис. 1а приведена периодограмма числа солнечных пятен Rz , полученная по среднемесячным значениям наблюдений с 1750 г. Периодограмма получена из спектра мощностей

$$P(\omega_m) = \frac{4}{N^2} \left[\left(\sum_{i=1}^N x_i \sin(\omega_m i) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N x_i \cos(\omega_m i) \right)^2 \right],$$

где x_1, x_2, x_3, \dots, N — ряд месячных данных, P_{ω_m} — мощность сигнала с частотой $\omega_m = \pi m / N \Delta t$, $m = 1, 2, 3, \dots, N$, $\Delta t = 1$ мес.

Из первоначального ряда данных были вычтены значения, сглаженные по 25 месяцам, что на 80 % подавляет вариации с периодами больше 5 лет (рис. 2). Мощность сигнала отнесена к уровню достоверности 90 %, т. е. в случае нормального распределения только 10 % вариаций может превышать 1. Штриховые линии указывают диапазон 3–9 мес (ПТР) и 12–36 мес (КДО). На рис. 1а видна мультипиковая структура ПТР и КДО. На рис. 1б показана аналогичная периодограмма для периода времени, обсуждаемого в данной работе — 1966–2019 гг. Диапазон вариаций от 2 до 40 мес является возмущенным на рис. 1а и 1б. Аналогичные результаты получаются для других индексов солнечной активности, см., например, рис. 2 работы [5].

В наших работах [5–7, 30] было показано, что КДО на Солнце и в межпланетной среде плохо коррелируют между собой. Поэтому в данной статье мы сосредоточиваемся на вопросе передачи КДО и ПТР от Солнца в межпланетную среду в сравнении с воспроизведением в межпланетной среде 11-летнего солнечного цикла.

Границы частотных интервалов КДО и ПТР четко не определены, они зависят от времени и в разных работах сдвинуты от месяца до года. Из данных, представленных на рис. 1, можно предположить, что фактически между КДО и ПТР нет четкой границы и они могут иметь одинаковое про-

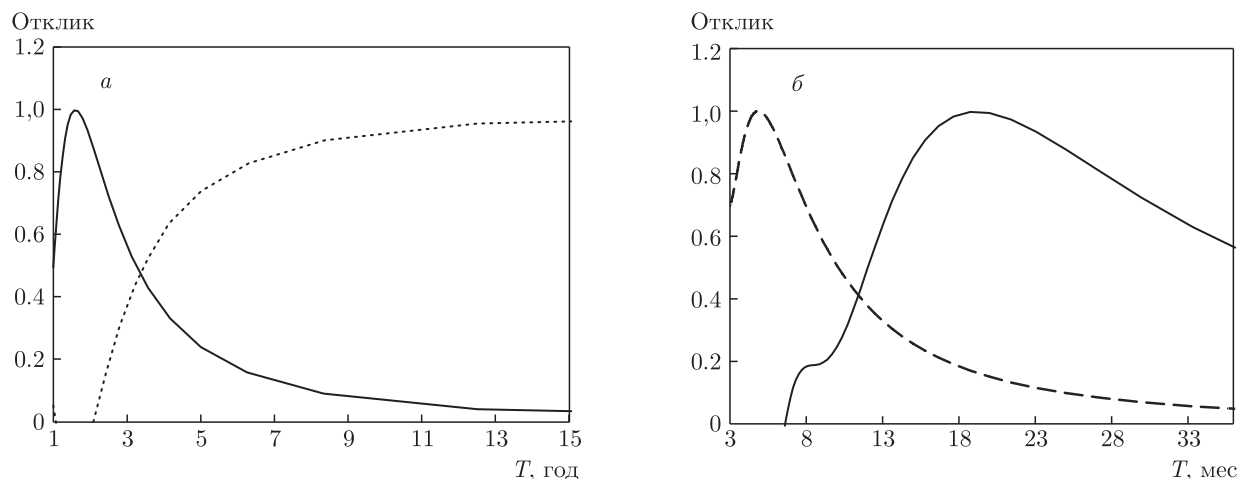


Рис. 2. Функции отклика 25-месячного скользящего сглаживания (*a*, пунктир), выделения КДО (*a* и *б*, сплошные кривые) и выделения ПТР (*б*, штриховая кривая)

исхождение. Мы покажем, что в аспекте передачи вариаций от Солнца к межпланетной среде ПТР и КДО обладают разными свойствами. Основываясь на результатах анализа вариаций в 1965–2020 гг., мы принимаем в данной работе интервалы периодов 120–150 мес, 18–36 мес и 3–9 мес соответственно для 11-летних вариаций, КДО и ПТР.

КДО и ПТР присутствуют практически во всех параметрах солнечной активности [5], здесь в качестве характеристики солнечной активности используется число солнечных пятен R_z (<https://wwwbis.sidc.be/silso/datafiles>). В работах [6, 7, 30] было показано, что КДО в галактических КЛ хорошо коррелируют с измеряемой на орбите Земли индукцией B межпланетного магнитного поля (ММП), которая является хорошим приближением для открытого магнитного потока Солнца [31] и используется здесь как параметр межпланетной среды (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

Мы используем среднемесячные значения потоков КЛ, полученные в долговременных измерениях на баллонах ионизирующей радиации в атмосфере, а именно, потоки заряженных частиц в атмосфере в максимуме Регенера – Пфотцера в Мурманской и Московской областях (MU_{bal} и MO_{bal} , пороги геомагнитного обрезания R_c соответственно 0.5 и 2.1 ГВ) (https://sites.lebedev.ru/en/DNS_FIAN/479.html), а также данные нейтронного монитора (NM) станции Москва ($R_c = 2.1$ ГВ) (<http://cosrays.izmiran.ru>), которые служат для подтверждения результатов наших измерений.

Для исследования был взят период с июня 1965 г. по декабрь 2020 г., когда можно было получить среднемесячные значения всех параметров, включенных в работу. В результате применения фильтров для выделения вариаций этот период уменьшился: с июня 1966 г. по декабрь 2019 г.

В спектрах мощностей параметров солнечной активности, межпланетной среды и КЛ преобладает 11-летний цикл. Он маскирует другие вариации, для выделения которых применяются различные фильтры. Мы используем простой метод выделения в виде скользящего сглаживания временного ряда данных по 25 и 7 мес. Данные 25-месячного сглаживания отражают 11-летний цикл. Фильтр для выделения КДО является разностью 7-месячного и 25-месячного сглаживания данных. Фильтр для выделения ПТР — разность между исходными данными и данными 7-месячного сглаживания. Функции отклика фильтров показаны на рис. 2.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗУЧАЕМЫХ ВАРИАЦИЙ НА СОЛНЦЕ И В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

Для удобства сравнения вариаций в разных параметрах мы отнесли месячные значения каждого параметра к среднему за 1965–2020 гг. На рис. 3 приведены экспериментальные данные, использованные в работе, за исключением результатов измерений MO_{bal} в стратосфере, которые близки к результатам MU_{bal} .

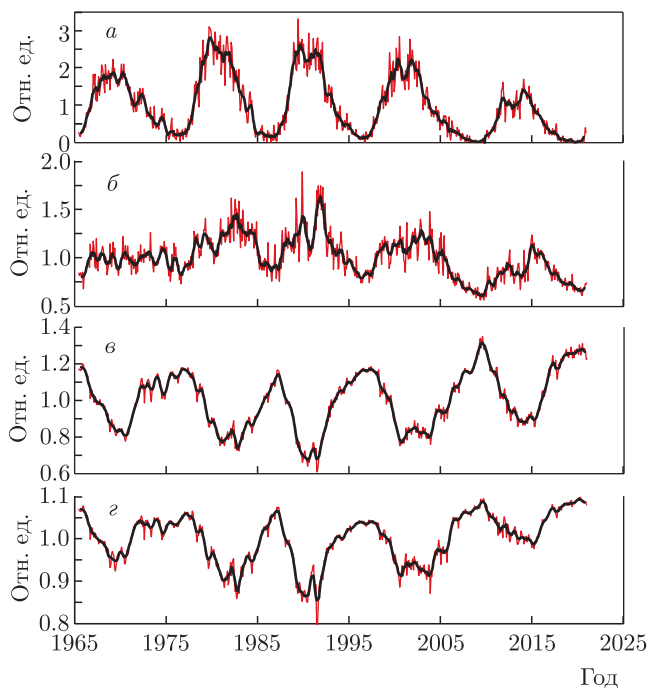


Рис. 3. Среднемесячные (красные линии) и 7-месячные скользящие сглаженные значения (черные линии): число солнечных пятен R_z (а); индукция B ММП (б); данные баллонных измерений MU_{bal} (в); данные NM (з). Данные отнесены к среднему значению за 1965–2020 гг.

Мы видим, что масштаб (максимальный размах) 11-летних вариаций на Солнце в 2.5 раза больше, чем в B и в 5 раз больше, чем в КЛ. В свою очередь, масштаб вариаций в B вдвое больше, чем в КЛ, хотя последний, естественно, зависит от энергии частиц. Более наглядное сравнение представлено на рис. 4, где использованы отфильтрованные данные 11-летних вариаций КДО и ПТР.

Рисунок 4а подтверждает разницу масштабов 11-летнего цикла на Солнце и в межпланетной среде, а также противоположную фазу вариаций КЛ. На рис. 4б видна синфазность КДО в B и КЛ, которая раньше отмечалась в работах [6, 7, 30]. На рис. 4б шкала для B дана с обратным знаком, поскольку КДО для КЛ и B имеют противоположные фазы. Коэффициент корреляции между КДО в B и КЛ (данные NM) составляет $CC = -0.65 \pm 0.02$. Амплитуда КДО больше в B , чем в КЛ, но меньше, чем на Солнце, как показано на рис. 4в. Кроме того, в КДО R_z заметна модуляция 11-летним циклом, которая меньше выражена в данных рис. 4б. Это объясняется тем, что открытое поле Солнца вблизи минимума солнечной активности формируется полями обширных полярных корональных дыр, а во

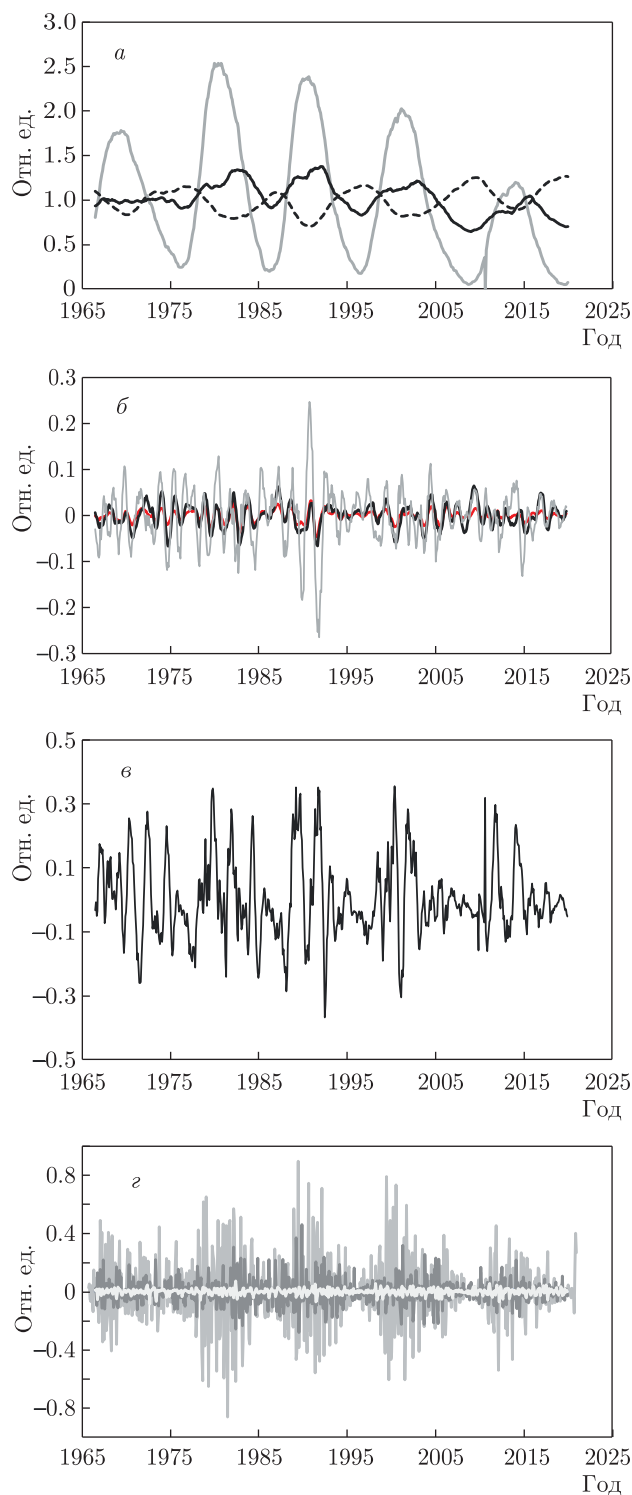


Рис. 4. Сравнение отфильтрованных рядов данных: а — 11-летние вариации R_z (серая кривая), индукции B ММП (черная сплошная) и КЛ (MU_{bal} , черная штриховая); б — КДО B (значения даны с обратным знаком, серая кривая) и КЛ (данные MU_{bal} — черная кривая, данные NM — красная); в — КДО R_z ; з — ПТР R_z (светло-серая кривая), B (темно-серая) и КЛ (данные MU_{bal} — белая)

время максимума оно складывается из магнитных потоков мелких корональных дыр, расположенных вблизи активных областей; при этом уменьшение площади дыр компенсируется увеличением средней индукции поля [31]. Кроме того, фаза КДО на Солнце плохо согласуется с фазой КДО в межпланетном пространстве, что проявляется в низкой корреляции между R_z и B — $CC = 0.33 \pm 0.03$. На рис. 4г представлены ПТР. По относительной амплитуде эти вариации в R_z лишь примерно в 1.4 раза меньше, чем сглаженный 11-летний цикл (рис. 4а). ПТР заметно модулированы 11-летним циклом, причем как на Солнце, так и в межпланетной среде. В отличие от 11-летнего цикла, где амплитуды в B и в КЛ сравнимы, ПТР в КЛ сильно подавлены по сравнению с B .

4. О ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Общее представление о передаче возмущений солнечной активности ММП могут дать коэффициенты корреляции между спектрами мощностей для реальных и фильтрованных рядов данных за 1966–2019 гг., которые приведены в табл. 1. Степень передачи возмущения максимальна для 11-летнего цикла, который превалирует в данных наблюдений. С уменьшением характерного времени вариации передача возмущения от Солнца к межпланетной среде падает. Коэффициенты корреляции между спектрами мощностей B и КЛ для реальных и сглаженных по 25 месяцам данных превышают 0.99. Для КДО корреляция спектров мощностей между B и КЛ составляет $CC \approx 0.8$ –0.9, а для ПТР — $CC \approx 0.4$ –0.05. Спектры мощностей КДО для разных рядов КЛ коррелируют между собой на уровне 0.9, а спектры ПТР — на уровне 0.7. Эти результаты показывают, что в ПТР большой вклад дают местные факторы: во-первых, они плохо передаются от Солнца в межпланетную среду, а во-вторых, в них могут вносить вклад аппаратурные эффекты.

Передача вариаций солнечной активности в межпланетную среду относится к проблеме формирования открытого магнитного потока Солнца, которая в настоящее время далека от разрешения [32–35]. По определению, открытый поток не содержит замкнутых магнитных петель, укорененных на Солнце и выходящих за пределы поверхности источника на расстояние, примерно равное $2R_{\odot}$. Тот факт, что 11-летние вариации солнечной ак-

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между спектрами мощностей R_z и B по данным с июня 1966 г. по декабрь 2019 г.

Ряд данных	Коэффициент корреляции
Реальные	0.82 ± 0.01
11-летний цикл	0.89 ± 0.01
КДО	0.61 ± 0.02
ПТР	0.32 ± 0.04

тивности лучше воспроизводятся в межпланетной среде, чем КДО и ПТР, можно объяснить связью между пространственным масштабом явления и характерным временем вариации. 11-летний цикл связан с крупномасштабной (меридиональной) циркуляцией солнечной плазмы, тогда как КДО могут соотноситься с комплексами активности, а ПТР — с отдельными активными областями. Мелкомасштабные поля замкнуты на Солнце и вносят меньший вклад в открытый магнитный поток.

Далее мы перейдем от рассмотрения всего спектра мощностей к выделению сигнала в интервалах частот, ответственных за изучаемые вариации. Для выделения 11-летних вариаций, КДО и ПТР были усреднены мощности реальных данных, соответствующих периодичностям 120–150 мес, 18–36 мес и 3–9 мес. Если взять мощность 11-летнего цикла за 100%, то получается распределение мощности в диапазонах КДО и ПТР, представленное в табл. 2. 11-летний цикл превалирует во всех параметрах, но на Солнце (R_z) КДО подавлены в 10 раз сильнее, чем в межпланетной среде (B , КЛ), и это должно быть связано с процессами формирования открытого магнитного потока Солнца. ПТР как на Солнце, так и в межпланетной среде присутствуют в долях процентов от 11-летнего цикла. Относительная мощность ПТР в различных параметрах различается не так сильно. В ПТР сильный вклад должны давать локальные возмущения, которые могут генерироваться в межпланетной среде. Здесь наглядно проявляется различная природа КДО и ПТР.

Частотные спектры отфильтрованных значений позволяют увидеть различия КДО и ПТР на Солнце и в межпланетной среде, если сравнивать периодограммы для R_z , B и КЛ (рис. 5). Периодограммы КДО демонстрируют существенное отличие вариаций на Солнце (R_z) от вариаций в B и КЛ, которые близки между собой. На периодограмме R_z хорошо

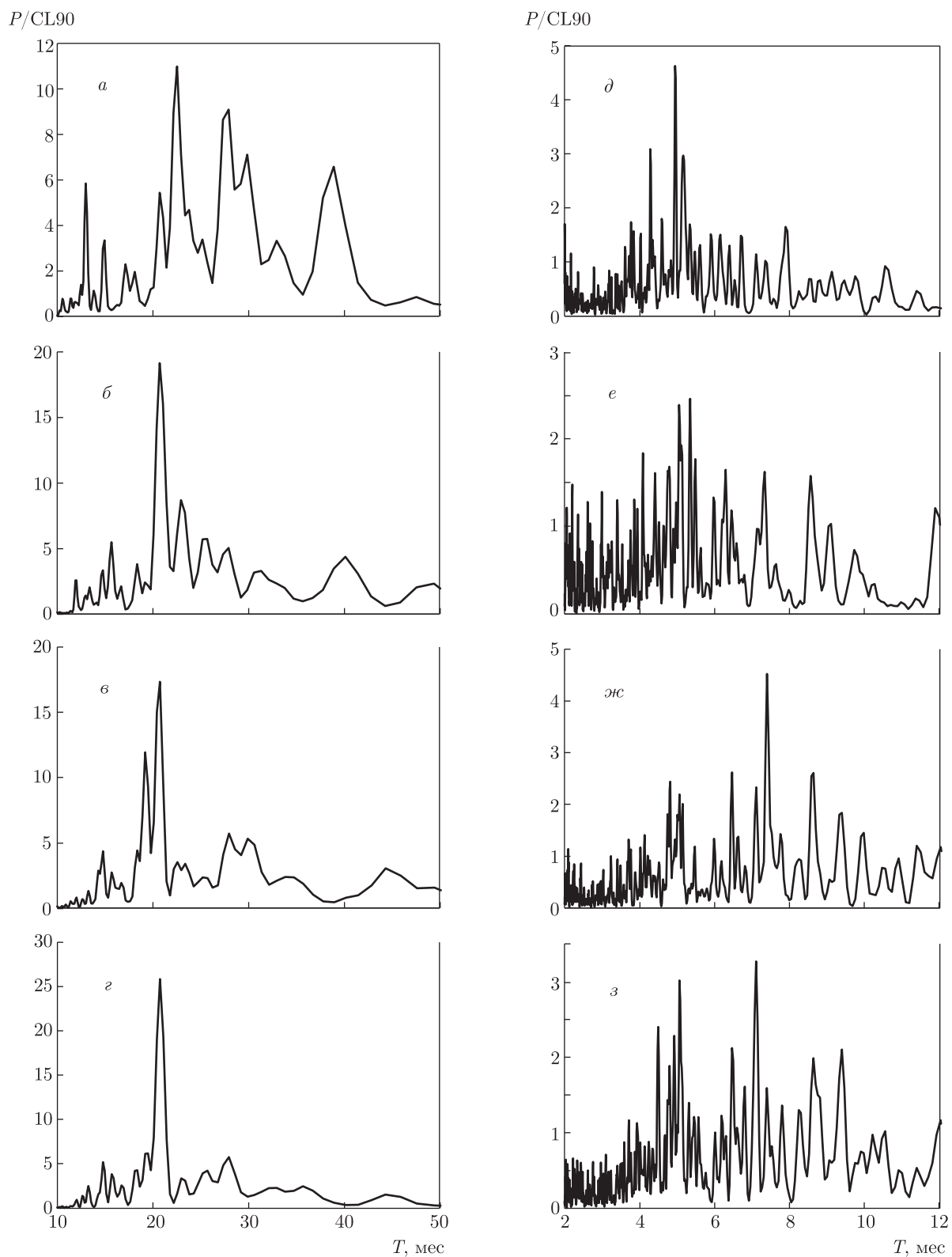


Рис. 5. Периодограммы КДО (слева) и ПТР (справа): $a, д$ — Rz; $б, е$ — B; $в, ж$ — КЛ (MU_{bal}); $г, з$ — КЛ (NM)

Таблица 2. Распределение мощности вариаций в диапазонах 11-летнего цикла (120–150 мес), КДО (18–36 мес) и ПТР (3–9 мес), %

Тип вариации	Rz	B	NM	MU_{bal}	MO_{bal}
11-летн.	100	100	100	100	100
КДО	0.23 ± 0.03	2.13 ± 0.23	3.37 ± 0.25	1.91 ± 0.15	2.37 ± 0.19
ПТР	0.074 ± 0.004	$0.321 \pm .014$	$0.155 \pm .006$	0.082 ± 0.003	0.115 ± 0.005

видны возмущения длительностью 2 года и более, тогда как на периодограммах B и КЛ остались только возмущения с периодом меньше двух лет. Этим объясняется тот факт, что исследователи солнечной активности обсуждают «квазидвухлетнюю вариацию», тогда как специалисты по КЛ утверждают, что в последние десятилетия наблюдались вариации с периодом $T = 1–1.6$ года [36–38]. На Солнце должны были присутствовать квазидвухлетние процессы, магнитный поток которых содержался только в замкнутых петлях.

В периодограмме ПТР для Rz явно выделяется максимум в районе $T = 5$ мес, который обсуждается во многих работах. Он сохраняется в B и КЛ, но здесь появляются другие возмущенные периоды, что говорит о несолнечном происхождении этих вариаций. Периодограммы КЛ сходны между собой (и с периодограммой для MO_{bal} , не показанной на рис. 5), на них больше выражено возмущение в области $T \approx 7$ мес.

КДО и ПТР принадлежат к примыкающим частотным диапазонам и обладают сходными свойствами (мультипиковость, переменчивость во времени, независимость развития в северном и южном полушариях Солнца). Однако передача КДО и ПТР от Солнца в межпланетную среду и их влияние на модуляцию КЛ совершенно различны. Если на периодограммах КДО в межпланетной среде отсутствуют некоторые пики, присущие солнечной активности, то в случае ПТР картина обратная — в районе более полугода видно значительное увеличение мощности в межпланетной среде по сравнению с ПТР на Солнце. Таким образом, КДО и ПТР имеют разную природу, которая в настоящее время далека от понимания.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы особенности передачи в межпланетную среду вариаций солнечной активно-

сти в диапазоне 2–40 мес по сравнению с превалирующим 11-летним циклом. Основные результаты сводятся к следующему.

Временной ход параметров солнечной активности и межпланетной среды, отнесенных к среднему значению за период июнь 1966 г.–декабрь 2019 г., показывает, что масштаб (максимальный размах) 11-летних вариаций на Солнце в 2.5 раза больше, чем в B и в 5 раз больше, чем в КЛ. В свою очередь, масштаб вариаций в B вдвое больше, чем в КЛ.

Коэффициент корреляции спектров мощностей Rz и индукции B ММП для реальных и фильтрованных данных характеризует степень передачи возмущения от Солнца к межпланетной среде. Она максимальна для 11-летнего цикла, который превалирует в данных наблюдений. С уменьшением характерного времени вариации коэффициент корреляции между спектрами мощностей Rz и B уменьшается — передача возмущения от Солнца к межпланетной среде падает.

В спектрах мощностей реальных данных 11-летний цикл превалирует во всех параметрах, но на Солнце (Rz) КДО подавлены в 10 раз сильнее, чем в межпланетной среде (B , КЛ), и это должно быть связано с процессами формирования открытого магнитного потока Солнца, которые пока недостаточно изучены. Следует отметить, что этот вывод получен при использовании только одного индекса солнечной активности Rz, который был выбран, исходя из подобия КДО на разных уровнях солнечной атмосферы [5]. Соотношение амплитуды 11-летнего цикла и КДО/ПТР для других индексов солнечной активности может быть другим и требует дополнительного исследования.

Мощность вариаций в диапазоне ПТР существенно меньше, чем в диапазоне КДО, ПТР сильнее подавлены на Солнце, они хуже, чем КДО, передаются в межпланетную среду. Спектры мощностей КЛ для 11-летних вариаций и КДО прекрасно коррелируют со спектром мощностей B , но для ПТР

коэффициент корреляции падает примерно до 0.4. Корреляция спектров мощностей ПТР между рядами КЛ достаточно высока ($CC \approx 0.7$), но ниже, чем для 11-летних вариаций и КДО, где они приближаются к $CC \approx 1$. Эти особенности являются следствием того, что ПТР плохо передаются от Солнца в межпланетную среду и в них большой вклад вносят местные условия.

Тот факт, что КДО и ПТР не требуют специальных механизмов образования, поскольку полностью соответствуют поведению конвективной турбулентной системы с одним основным периодом [28], не означает, что от исследования этих вариаций можно отказаться. Они дают информацию для изучения процессов передачи вариаций солнечной активности в межпланетную среду и модуляции потоков галактических КЛ. Это делает КДО и ПТР важным инструментом солнечно-земной физики.

Благодарности. Мы благодарны нашим коллегам-сотрудникам лаборатории физики Солнца и космических лучей имени С. Н. Вернова (Долгопрудненской научной станции ФИАН), которые многолетним трудом создали однородные ряды данных о потоках заряженных частиц в атмосфере Земли, а также исследователям, предоставляющим свободный доступ к данным в Интернете: <https://wwwbis.sidc.be/silso/datafiles> (Rz); <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (данные по ММП); <http://cosrays.izmiran.ru> (данные нейтронного монитора, Москва).

Финансирование. Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu. I. Stozhkov, N. S. Svirzhevsky, G. A. Bazilevskaya et al., *Adv. Space Res.* **44**, 1124 (2009).
2. J. M. Wallace, *Rev. Geophys. Space Phys.* **11**, 191 (1973).
3. K. Maeda, *J. Atmos. Sci.* **24**, 320 (1967).
4. K. Sakurai, *Nature* **278**, 146 (1979).
5. G. Bazilevskaya, A.-M. Broomhall, Y. Elsworth, and V. M. Nakariakov, *Space Sci. Rev.* **186**, 356 (2014).
6. G. A. Bazilevskaya, M. S. Kalinin, M. B. Krainev et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **632**, 012050 (2015).
7. M. Krainev, G. Bazilevskaya, M. Kalinin et al., *Proc. Sci., PoS (ICRC2015)* 181 (2015).
8. Y.-M. Wang and N. R. Sheeley, *Astrophys. J.* **590**, 1111 (2003).
9. N. S. Dzhililov, J. Staude, and V. N. Oraevsky, *Astron. Astrophys.* **384**, 282 (2002).
10. E. E. Benevolenskaya, *Astrophys. J.* **509**, L49 (1998).
11. F. Inceoglu, R. Simoniello, R. Arlt, and M. Rempel, *Astron. Astrophys.* **625**, A117 (2019).
12. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **133**, 572 (1961).
13. I. Kostyuchenko and E. Bruevich, *Sol. Phys.* **296**, 8 (2021).
14. E. Rieger, G. Kanbach, C. Reppin et al., *Nature* **312**, 623 (1984).
15. J. Lean, *Astrophys. J.* **363**, 718 (1990).
16. Yu.-Q. Lou, Yu.-M. Wang, Z. Fan et al., *Month. Notes Roy. Astron. Soc.* **345**, 809 (2003).
17. V. V. Lobzin, I. H. Cairns, and P. A. Robinson, *Astrophys. J. Lett.* **754**, L28 (2012).
18. M. Dimitropoulou, D. Strintzi, and X. Moussas, *Proc. IAU Symposium* No. 257 (2008), p. 159.
19. E. Gurgenashvili, T. V. Zaqarashvili, V. Kukhianidze et al., *Astrophys. J.* **826**, 55 (2016).
20. H. V. Cane, I. G. Richardson, and T. T. von Rosenvinge, *Geophys. Res. Lett.* **25**(24), 4437 (1998).
21. H. Mavromichalaki, P. Preka-Papadema, I. Liritzis et al., *New Astron.* **8**, 777 (2003).
22. T. V. Zaqarashvili and E. Gurgenashvili, *Front. Astron. Space Sci.* **5**, 7 (2018).
23. T. Bai, *Astrophys.* **404**, 805 (1993).
24. P. Chowdhury, M.-H. Gokhale, J. Singh, and Y.-J. Moon, *Astrophys. Space Sci.* **361**(2), 54 (2016).
25. T. Barlyaeva, J. Wozjak, P. Lamy et al., *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **177**, 12 (2018).
26. P. R. Singh, C. M. Tiwari, S. L. Agrawal, and T. K. Pant, *Sol. Phys.* **294**, 118 (2019).
27. T. Bai and P. A. Sturrock, *Astrophys. J.* **409**, 476 (1993).
28. P. Frick, D. Sokoloff, R. Stepanov et al., *Month. Notes Royal Astron. Soc.* **491**, 5572 (2020).
29. F. Plunian, G. R. Sarson, and R. Stepanov, *Month. Notes Royal Astron. Soc.* **400**, L47 (2009).
30. Г. А. Базилевская, М. С. Калинин, М. Б. Крайнев и др., *Косм. исслед.* **54**(3), 181 (2016).

31. Y.-M. Wang and N. R. Sheeley, *J. Geophys. Res.* **107**(A10), 1302 (2002).
32. M. Schüssler and I. Baumann, *Astron. Astrophys.* **459**, 945 (2006).
33. L. A. Fisk and J. C. Kasper, *Astrophys. J. Lett.* **894**, L4 (2020).
34. J. A. Linker, R. V. Caplan, C. Downs et al., *Astrophys. J.* **848**, 70 (2017).
35. J. A. Linker, S. G. Heinemann, M. Temmer et al., arXiv:2103.05837 (2021).
36. C. Kato, K. Munakata, S. Yasue et al., *J. Geophys. Res.* **108**(A10), 1367 (2003).
37. K. Kudela, H. Mavromichalaki, A. Papaioannou, and M. Gerontidou, *Solar Phys.* **266**, 173 (2010).
38. V. M. Velasco Herrera, J. Pérez-Peraza, W. Soon, and J. C. Márquez-Adame, *New Astron.* **60**, 7 (2018).