

УДК 53.09

О ДОЛГОВРЕМЕННОЙ МОДУЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 23–24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. В. Г. Янке¹, А. В. Белов¹, Р. Т. Гущина¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: rgus@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Значительный тренд магнитного поля Солнца, начало которого отмечается с конца 22-го цикла солнечной активности, продолжает наблюдаться до настоящего времени. Основные характеристики солнечного магнитного поля и связанного с ним гелиосферного поля имеют определяющее значение для модуляции космических лучей. В долгопериодных вариациях космических лучей в 23–24 циклах отображается ослабление солнечного магнитного поля. Сравнение этих вариаций с вариациями в предыдущих циклах (21–22), позволяет выявить особенности модуляции в последних двух циклах: в настоящее время она самая слабая за все время работы нейтронных мониторов.

DOI: 10.31857/S0367676521090350

ВВЕДЕНИЕ

Солнце – магнитоактивная звезда. Роль магнитного поля в динамике происходящих на Солнце процессов определяющая, его вариации – ключ ко всем активным явлениям, происходящим на Солнце, в солнечной атмосфере и гелиосфере. В результате процесса перестройки общего магнитного поля Солнца происходит начавшийся в конце 22 одиннадцатилетнего цикла солнечной активности тренд в сторону понижения магнитных полей всех структур на Солнце, продолжающийся до настоящего времени (начало 25 цикла). Темп развития и уровень вспышечной активности в последний цикл существенно ниже, чем наблюдалось в предыдущих солнечных циклах, а больших и экстремальных вспышечных событий не было совсем. Наблюдаемое ослабление глобального магнитного поля Солнца и соответствующий тренд гелиосферных характеристик в 23–24 циклах солнечной активности вызывает вопрос об отклике этого явления в долговременной модуляции космических лучей. Наиболее наглядно можно выявить особенности слабой модуляции в 23–24 циклах (1996–2019 гг.) при сопоставлении вариаций космических лучей в этот период с вариациями в предшествующие 21–22 циклы (1976–1996 гг.), что является целью работы. Предлагаемое исследование долговременных вариаций базируется на модели модуляции, объединяющей несколько солнечных индексов.

ДАННЫЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Для сравнения вариаций космических лучей в 21–22 и 23–24 циклах солнечной активности совместно для двух этих периодов на рис. 1а–1е представлены исходные данные временных изменений интенсивности космических лучей и характеристик солнечной и гелиосферной активности. При моделировании модуляции использованы наблюдения вариаций на мировой сети наземных детекторов (~40 нейтронных мониторов), телескопе (станция Нагойя) и результаты зондирования стратосферы [1] (рис. 1е). Спектр долговременных вариаций рассчитан по методике [2], дальнейший анализ выполнен для частиц с жесткостью 10 ГВ ($a10$ амплитуда вариаций в % относительно минимума в 23 цикле (2009 г.). В модели в качестве основных характеристик, отражающих изменения структур солнечного ветра, создающих свой вклад в модуляцию, предлагаются (рис. 1а–1д): полярное магнитное поле Солнца H_{pol} (согласно [3]), площадь низкоширотных корональных дыр AI [4], среднее магнитное поле на поверхности источника солнечного ветра B_{ss} [5] и наклон гелиосферного токового слоя h_{cst} [3] (обоснование выбора характеристик в [6, 7 и ссылки к ним]). Спорадическая солнечная активность в модели описывается СМЕ-индексом [8]. Хорошо виден тренд на понижение в 23–24 цик-

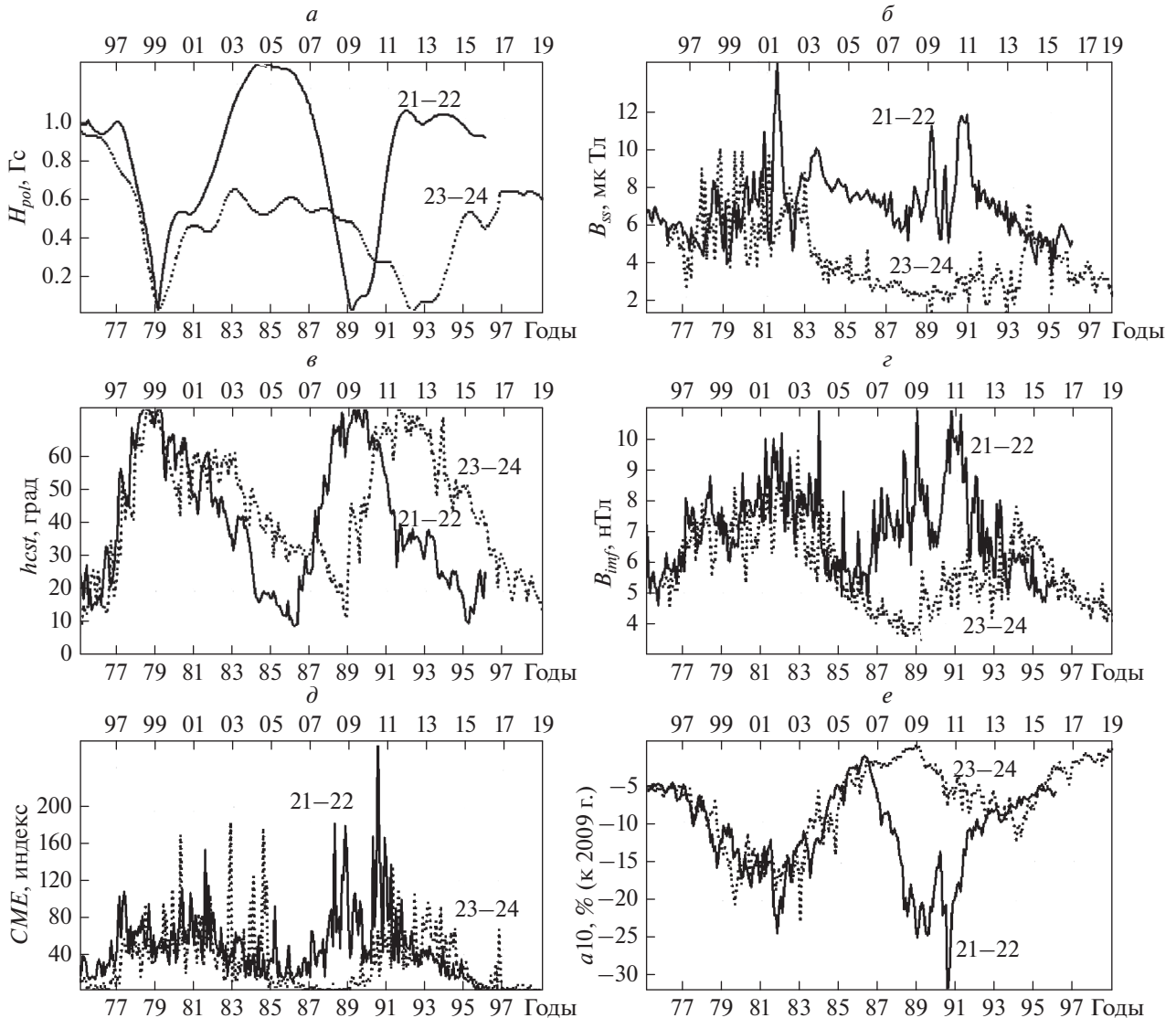


Рис. 1. Временной ход индексов солнечной активности (сплошные кривые – 21–22 циклы; пунктирные – 23–24 циклы): полярное поле Солнца (H_{pol} , Гс) (а); среднее магнитное поле Солнца (B_{ss} , мкТл) (б); наклон гелиосферного токового слоя ($hcst$, градусы) (в); межпланетное магнитное поле (B_{inf} , нТл) (г); CME-индекс (д); вариации плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ (a_{10} , % к 2009 г.) (е). Нижняя ось абсцисс – годы 21–22 циклов солнечной активности, верхняя – 23–24 циклов.

лах СА показателей глобальных процессов на Солнце и гелиосферы (рис. 1а–1д). Это явление на примере развития разных сторон солнечной деятельности отражено во многих работах гелио- и космофизиков (например, [9] и ссылки к ней). В частности, показано: магнитные поля в солнечном ветре над полюсами за последние 30 лет уменьшились примерно втрое. Квадрат радиальной компоненты магнитного поля, усредненной по поверхности источника (B_{ss}) убывает с конца 22-го цикла до небывало низких значений. Ранее нами было показано [6]: замена в эмпирической модели модуляции гелиосферного поля B_{inf} (необходимого для описания модуляции космиче-

ских лучей) на величину среднего магнитного поля B_{ss} не только возможна, но даже улучшает качество модели. Угол наклона токового слоя $hcst$ лучше всего коррелирует с вариациями космических лучей, от него существенно зависит глубина модуляции, токовый слой – самая большая магнитная неоднородность в гелиосфере, с которой взаимодействуют космические лучи, место наиболее эффективного их дрейфа. В последних минимумах активности значения $hcst$ возрастают (от $\sim 9.3^\circ$ в минимуме 22/23 до $\sim 16.6^\circ$ в период, близкий к минимуму 24/25, на рост этой структурной характеристики в минимумах отмечено в работе [10] с предположением о роли дрейфового эффекта

в его создании. В *СМЕ*-индексе отражено количество и скорость *СМЕ*, эта характеристика учитывает влияние спорадической солнечной активности на модуляцию, убывает, особенно в 24 цикле.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Для вышеперечисленных солнечно-гелиосферных характеристик (B_{ss} , H_{pol} , $hcst$, AI , *СМЕ*-индекс) и амплитуды a_{10} вариаций космических лучей с жесткостью 10 ГВ выполнен многопараметрический регрессионный анализ с учетом запаздывания для каждого параметра и выявлена роль каждого из индексов в модуляции. Согласно [11] вклад H_{pol} в вариацию плотности космических лучей $\delta H_{pol} = -0.025 H_{pol}$ введен в амплитуду вариаций a_{10} с помощью поправки δH_{pol} , чтобы учесть модулирующее воздействие индекса H_{pol} . После введения указанной поправки для скорректированной амплитуды $a_{10H_{pol}}$ выполнено моделирование вариаций. В результате получены отдельно для 21–22 и 23–24 циклов: коэффициент корреляции (r), среднеквадратичное отклонение модели (σ), регрессионные характеристики (k) и времена запаздывания ($t_{зап}$) вариаций космических лучей относительно индексов солнечной активности (табл. 1). Получены картины распределения вкладов в создаваемую модуляцию космических лучей от воздействия указанных параметров для 21–22 (рис. 2а) и 23–24 (рис. 2б) циклов. Определяющая роль в создании модуляции в 21–22 циклах принадлежит наклону токового слоя $hcst$, а в 23–24 циклах – B_{ss} . Коэффициент регрессии для наклона токового слоя $hcst$ в модели 23–24 циклов $-0.10\%/^\circ$. Это в ~ 2 раза меньше, чем в 21–22 циклах ($-0.19\%/^\circ$ на градус). Коэффициент регрессии для B_{ss} в 23–24 циклах $-1.88\%/мкТл$, а в 21–22 циклах $-0.76\%/мкТл$. Модуляция космических лучей в последних циклах значительно слабее, чем модуляция в 21–22 цикла. Причиной являются аномалии, возникшие на Солнце и в гелиосфере в последние два цикла вследствие ослабления солнечного магнитного поля и состояния гелиосферы. Анализ 23 цикла со слабой модуляцией космических лучей и 24 цикла с самой низкой 11-летней вариацией за время наблюдения на нейтронных мониторах, может объясняться разным (по сравнению с другими циклами) воздействием на космические лучи конкретных физических процессов (дрейфа, диффузии, конвекции и адиабатического изменения энергии), создающих модуляцию. Взаимодействие главных механизмов модуляции и роль модуляционных характеристик в создании общей модуляции меняется с солнечными циклами [10, 12, 13]. В представленной модели модуляции вклад в общую мо-

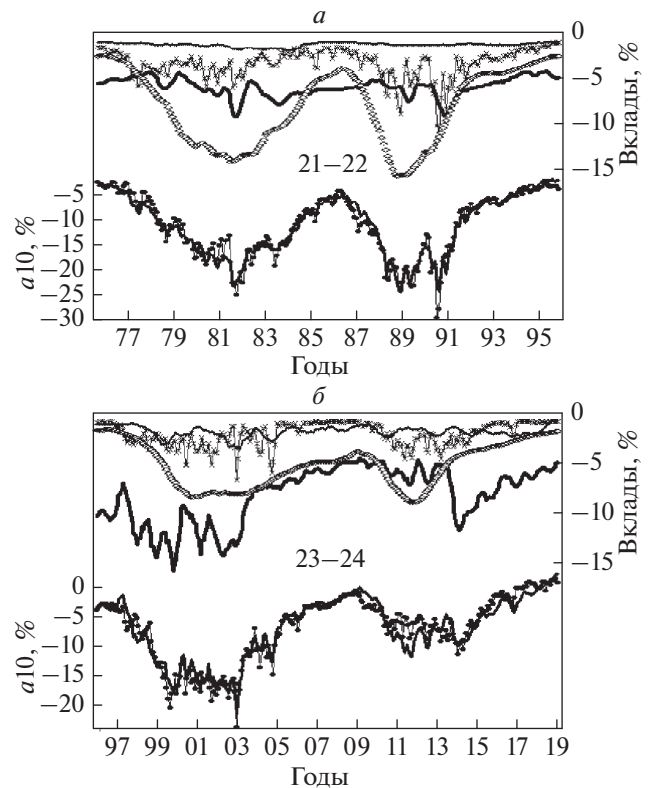


Рис. 2. Амплитуда a_{10} (% к 2009 г.) наблюдаемых вариаций плотности космических лучей с жесткостью 10 ГВ и результат моделирования вариаций (тонкая кривая с точками и сплошная черная в нижней части рисунка); в верхней части рисунка – вклады (%) в полную модуляцию от изменений: наклона токового слоя $hcst$ (кривая со светлыми ромбиками), среднего магнитного поля Солнца B_{ss} (сплошная жирная), *СМЕ*-индекса (тонкая кривая с крестиками) и площади корональных дыр AI (тонкая сплошная); 21–22 (а) и 23–24 (б) циклы солнечной активности.

дуляцию от эффекта дрейфа космических лучей в 24 цикле ниже (обращает внимание период роста и максимума солнечной активности 2010–2014 гг.). В модели модуляции для 23–24 циклов упомянутое выше преобладание вклада от воздействия на космические лучи крупномасштабного магнитного поля на Солнце, выраженное в величине индекса B_{ss} , может говорить о возрастании роли (с учетом связи B_{imf} и B_{ss}) диффузии космических лучей при распространении в гелиосфере с ослабленным межпланетным магнитным полем [13]. Прогностические ожидания: плотность космических лучей в 24 цикле (до 12.2019) не достигла своего максимального значения. Солнце находится в положительной фазе 22-летнего магнитного цикла ($A > 0$) и предстоящий максимум вариаций космических лучей ожидается продолжительным (подобно периодам 1974–1976 гг. и 1994–1997 гг.). Фаза минимума 24/25 в вариациях предположительно может быть достигнута в конце 2020 г. (ес-

Таблица 1. Результаты многопараметрического регрессионного анализа для 21–22 и 23–24 циклов солнечной активности

Циклы	r	σ	k_{hcst}	k_{Bss}	k_{CME}	k_{AI}
21–22 (1976.08–1996.10)	0.97	1.59	–0.19	–0.76	–0.05	–0.009
$t_{зап}$			14	5	1	8
23–24 (1996.11–2019.12)	0.96	1.66	–0.10	–1.88	–0.04	–0.01
$t_{зап}$			20	4	1	8

ли опираться на значения сглаженных чисел пятен и учитывая время запаздывания космических лучей).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 23–24 циклах выявлено уменьшение влияния угла наклона токового слоя $hcst$ на модуляцию космических лучей. Изменение его величины происходит в тех же пределах, что и в других циклах, но эффективность воздействия на модуляцию сильно снижена. В 23–24-ом циклах солнечной активности в общей модуляции космических лучей преобладает воздействие на космические лучи крупномасштабного магнитного поля Солнца, выраженное в индексе B_{ss} , несмотря на снижение самой величины B_{ss} .

Работа базируется на экспериментальных данных УНУ № 85 “Российская национальная сеть станций космических лучей” (Сеть СКЛ). Мы признательны сотрудникам сети станций космических <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стожков Ю.И., Свирижевский Н.С., Базилевская Г.А. и др. Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957–2007). Препринт. Москва: Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева РАН, 2007. 55 с.
2. Belov A.V., Gushchina R.T., Sirotina I.V. // Proc. 23rd ICRC. V. 3. (Calgary, 1993). P. 605.
3. <http://wso.stanford.edu>.
4. Гущина Р.Т., Белов А.В., Тлатов А.Г., Янке В.Г. // Геомагн. и аэронаом. 2016. Т. 56. № 3. С. 275; Gushchina R.T., Belov A.V., Tlatov A.G., Yanke V.G. // Geomagn. Aeronomy. 2016. V. 56. No. 3. P. 257.
5. Obridko V., Shelting B. // Solar phys. 1999. V. 184. P. 187.
6. Гущина Р.Т., Белов А.В., Обридко В.Н. и др. // Геомагн. и аэронаом. 2002. Т. 42. № 6. С. 727; Gushchina R.T., Belov A.V., Obridko V.N. et al. // Geomagn. Aeronomy. 2002. V. 42. No. 6. P. 693.
7. Белов А.В., Гущина Р.Т., Обридко В.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65. № 3. С. 360; Belov A.V., Gushchina R.T., Obridko V.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2001. V. 65. No. 3. P. 395.
8. Белов А.В., Гущина Р.Т. // Геомагн. и аэронаом. 2018. Т. 58. № 1. С. 3; Belov A.V., Gushchina R.T. // Geomagn. Aeronomy. 2018. V. 58. No. 1. P. 3.
9. <https://www.izmiran.ru/library/pushkov2019/pushkov2019abs.pdf>.
10. Гущина Р.Т., Белов А.В., Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. // Геомагн. и аэронаом. 2012. Т. 52. № 4. С. 1; Gushchina R.T., Belov A.V., Obridko V.N., Shelting B.D. // Geomagn. Aeronomy. 2012. V. 52. No. 4. P. 438.
11. Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 165; Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 146.
12. Potgieter M. // ArXiv: 1306.4421v1. 2013.
13. Калинин М.С., Базилевская Г.А., Крайнев М.Б. и др. // Геомагн. и аэронаом. 2017. Т. 57. № 5. С. 592; Kalinin M.S., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B. et al. // Geomagn. Aeronomy. 2017. V. 57. No. 5. P. 549.

About long-term modulation of cosmic rays in the 23–24 solar activity cycles

V. G. Yanke^a, A. V. Belov^a, R. T. Gushchina^a, *

^aPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia

*e-mail: rgus@izmiran.ru

A significant trend in the solar magnetic field, the beginning of which is noted from the end of the 22nd cycle of solar activity, is observed until now. The main characteristics of solar magnetic field and associated heliospheric field have a decisive importance for modulation of cosmic rays. In long-term variations of cosmic rays in 23–24 solar activity cycles the decreasing of solar magnetic field is displayed, and comparison of these variations with variations in previous cycles (21–22), allows us to reveal the features of modulation in the last two cycles, which is the weakest for the entire time of neutron monitors operating.