

УДК 523.62-726

ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ В ПЕРИОДЫ ИНВЕРСИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 6 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

© 2023 г. М. В. Подзолко^{1, *}, В. В. Калегаев^{1, 2}, К. А. Устинов²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: spacerad@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Рассмотрены характеристики солнечных протонных событий в периоды инверсии магнитного поля Солнца в 19–24 циклах солнечной активности. В каждом из этих солнечных циклов найдены интервалы времени длительностью 8–12 месяцев, приходящиеся на время инверсии поля Солнца, во время которых число солнечных событий, суммарный и максимальный флюенс протонов ниже и энергетические спектры мягче, чем в равные по длительности периоды времени до и после этого. В большинстве рассмотренных циклов указанные периоды наступают после максимума цикла или во время локальных “минимумов Гневывшева”.

DOI: 10.31857/S0367676523701806, EDN: OSLIEN

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим характеристики солнечных протонных событий (СПС) в периоды инверсии магнитного поля Солнца, которая происходит в каждом 11-летнем солнечном цикле вблизи максимума его активной фазы.

Имеется ряд публикаций, посвященных изучению локальных особенностей гелиосферной модуляции галактических космических лучей в периоды инверсии магнитного поля Солнца, (например, [1–5] и др.). Однако публикаций, где исследуются характеристики солнечных космических лучей (СКЛ) в периоды инверсии поля Солнца, довольно мало.

В работах [6, 7] показано, что в периоды инверсии магнитного поля Солнца, определенные по данным наблюдений Солнца в 17–22 солнечных циклах, не происходили солнечные события с высокими энергиями протонов, регистрируемые наземными нейтронными мониторами (GLE: Ground Level Enhancement) и на стратосферных аэростатах. В [8] показано, что в 21–22 солнечных циклах периоды инверсии поля Солнца совпадают с локальными периодами уменьшения числа СПС и “минимумами Гневывшева” солнечной активности. В [9] обнаружено,

что в 21–23 солнечных циклах в периоды инверсии, определенные с точностью до 1 календарного года по данным наблюдений полярного магнитного поля Солнца обсерватории Wilcox, число СПС и суммарный флюенс протонов с энергиями >30 МэВ в СПС по данным измерений спутника IMP-8 были заметно ниже, чем в годы до и после этого.

В настоящей работе на основе анализа данных экспериментальных измерений потоков СКЛ на высокоорбитальных спутниках и наземных наблюдений Солнца в 1956–2017 гг. анализируются характеристики СПС, включая флюенсы и энергетические спектры протонов, в периоды инверсии магнитного поля Солнца в 19–24 солнечных циклах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Использованные экспериментальные данные проиллюстрированы на рис. 1.

В работе использовалась составленная нами база данных, содержащая сведения о ~450 СПС в 19–24 солнечных циклах, включающие время события, величину интегрального флюенса протонов с различными энергиями и характеристики

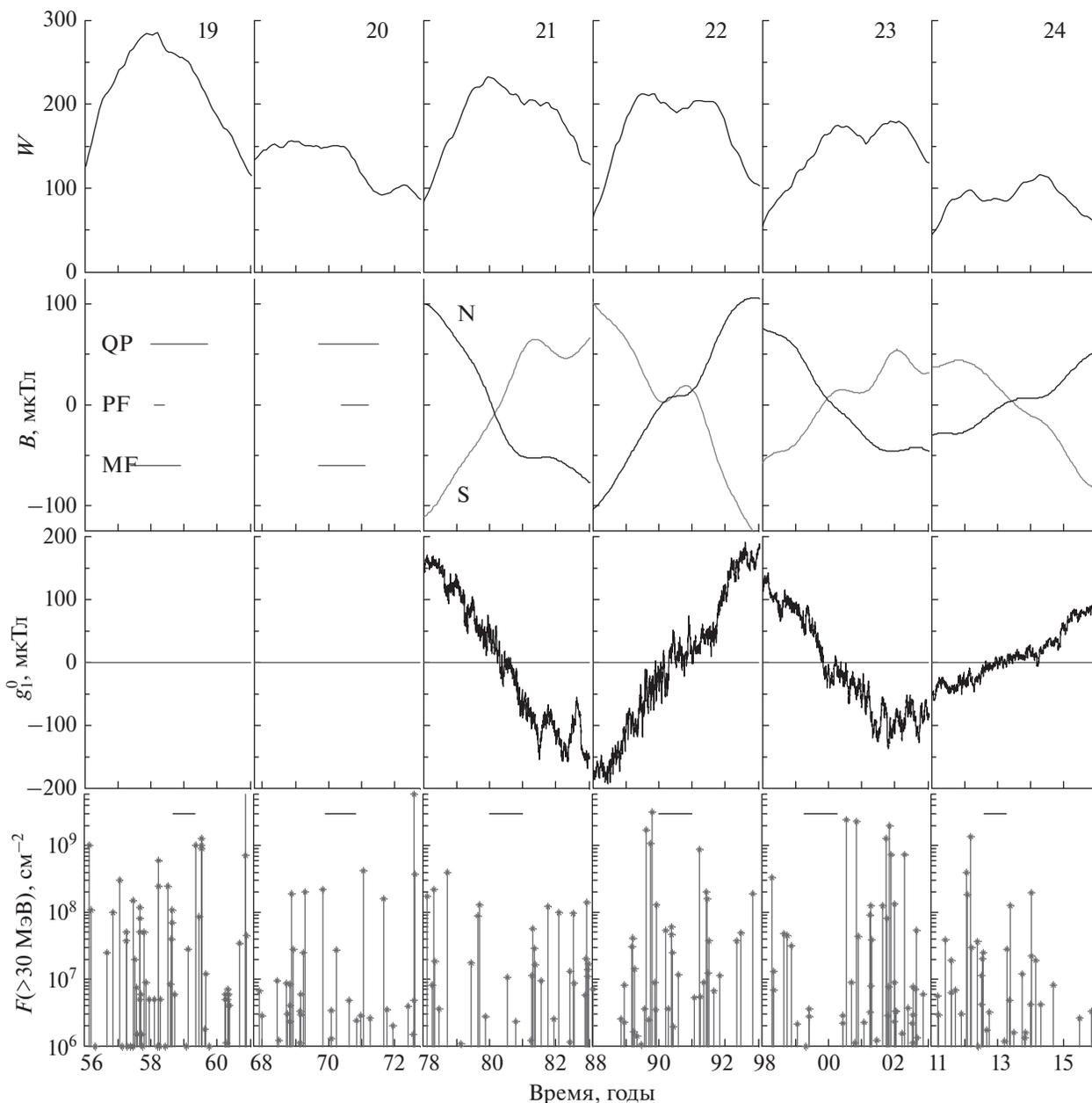


Рис. 1. Временные ряды сглаженных чисел Вольфа W и вертикальных компонент северного и южного полярного поля Солнца $B_{N,S}$, главного гауссового коэффициента магнитного поля Солнца g_{10} , и флюенсов F протонов с $E > 30$ МэВ в СПС в 19–24 циклах солнечной активности. Для 19–20 циклов показаны периоды инверсии по ранним наблюдениям полярного поля (MF), числа полярных факелов (PF) и положения волокон (QP) [7]. Найденные периоды понижения числа и флюенсов СПС во время инверсии поля показаны горизонтальными линиями на нижнем графике.

солнечной вспышки. Она использовалась ранее в ряде работ, где анализировалась величина, энергетическое, временное и гелиодолготное распределение флюенсов протонов в СПС (например, [10–13]). Для 19 и 20 циклов сведения об СПС и величинах флюенсов протонов с $E > 30$ МэВ в них для базы данных взяты из различных опубликованных каталогов [14, 15]. Для СПС с 1970-х гг. по настоящее время флюенсы протонов с различны-

ми энергиями рассчитаны на основе данных долговременных измерений потоков протонов на высокоорбитальных спутниках серий IMP [16] и GOES [17] и космическом аппарате ACE в точке либрации L1 системы Солнце-Земля [18].

Для определения периодов инверсии магнитного поля Солнца в 21–24 солнечных циклах использовались ряды сглаженных значений верти-

кальных компонент B_N и B_S северного и южного полярного магнитного поля Солнца и главного гауссова коэффициента g_{10} поля Солнца по данным обсерватории Wilcox [19]. Для 19–20 циклов использовались данные более ранних наблюдений Солнца, систематизированные в работе [7].

Также использовался ряд сглаженных значений международных чисел Вольфа солнечных пятен новой версии 2.0 [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

В [9] было показано, что в периоды инверсии магнитного поля Солнца в 21–23 циклах, определенные с точностью до 1 календарного года, имеет место понижение числа СПС и суммарных флюенсов протонов с $E > 30$ МэВ. В настоящей работе предпринято развитие предыдущего исследования. В 19–24 солнечных циклах найдены интервалы времени длительностью 8–12 календарных месяцев, характеризующиеся следующими свойствами:

- интервал приходится на время инверсии магнитного поля Солнца: в 21–24 циклах значения $|B_N - B_S|$ и g_{10} приближаются к 0; в 19–20 циклах интервал частично совпадает с периодами инверсии, определенными по данным более ранних наблюдений Солнца [7];

- наблюдается уменьшение числа СПС (учитывались СПС с флюенсом $\geq 10^6$ см⁻²) и значительное, на ≥ 1 –2 порядка величины, снижение суммарных флюенсов протонов с $E > 30$ МэВ в СПС за этот период, по сравнению с периодами равной длительности до и после этого;

- в указанные периоды максимальный флюенс протонов с $E > 30$ МэВ в СПС, в зависимости от мощности солнечного цикла, ≤ 1 –6 $\cdot 10^7$ см⁻², тогда как в периоды равной длительности до и после этого происходили мощные СПС с флюенсами $> 10^8$ – 10^9 см⁻².

Найденные интервалы времени показаны на рисунке горизонтальными линиями на нижнем графике. Как видно из рис. 1, на эти интервалы действительно приходится время инверсии магнитного поля Солнца, и во время них заметно уменьшение числа СПС и значительное, не менее чем на порядок величины, снижение максимальных флюенсов.

Также были проанализированы энергетические спектры суммарных интегральных флюенсов протонов с энергиями от >1 до >60 МэВ в СПС в найденные периоды времени и до, и после них в 21–24 циклах. Спектры для 21–23 циклов строили с использованием данных спутника IMP-8, для 24 цикла – GOES 13–15. Рассчитывали аппроксимацию энергетических спектров сте-

пенной функцией $F(>E) = CE^\gamma$. Обнаружено, что в найденные периоды времени показатель степени γ уменьшается, т.е. спектры становятся более мягкими.

В табл. 1 сведены найденные периоды инверсии магнитного поля Солнца и понижения числа и флюенсов СПС, число событий, величины суммарных и максимальных флюенсов протонов с $E > 30$ МэВ в СПС и показателей энергетических спектров в периоды инверсии и равные по длительности периоды до и после этого в 19–24 солнечных циклах.

Также из сравнения со значениями сглаженных чисел Вольфа на рисунке видно, что в рассмотренных солнечных циклах найденные периоды времени расположены после максимума (19, 20 циклы), либо во время локального минимума между 2 “максимумами Гневывшева” (21, 22, 24 циклы); исключением является только 23 солнечный цикл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа данных спутниковых измерений потоков протонов СКЛ и наблюдений Солнца в 19–24 солнечных циклах найдены интервалы времени длительностью 8–12 месяцев, на которые приходится инверсия магнитного поля Солнца, и во время которых наблюдается понижение числа и флюенсов СПС. В эти периоды времени число солнечных событий меньше, суммарные и максимальные флюенсы протонов в них существенно, на ≥ 1 –2 порядка величины, ниже, а энергетические спектры в диапазоне энергий от >1 до >60 МэВ – мягче, чем за равные по длительности периоды до и после этого. В большинстве рассмотренных циклов указанные периоды наступают после максимума сглаженных чисел Вольфа, или в циклах с 2 “максимумами Гневывшева” – во время локальных минимумов между ними.

Данный результат представляется весьма примечательным, в том числе для прикладных задач. Фактически показано существование вблизи максимума активной фазы 19–24 циклов достаточно длительных интервалов времени, когда происходит значительное понижение флюенсов протонов СКЛ.

Авторы не берутся назвать физическую причину данного явления. Например, в [6], оно вызвано уменьшением эффективности ускорения протонов на Солнце в силу структурных изменений поля в период инверсии. В продолжение данного исследования предполагается проанализировать в т.ч. частоту и мощность солнечных вспышек и

Таблица 1. Число СПС с флюенсом $\geq 10^6$ см $^{-2}$, суммарный и максимальный флюенсы протонов с $E > 30$ МэВ, и показатель энергетического спектра γ флюенсов протонов с $E > 1-60$ МэВ в периоды до, во время и после инверсии магнитного поля Солнца в 19–24 солнечных циклах

Цикл	Параметр	До инверсии	Во время инверсии	После инверсии
19	Время	01.1958–08.1958	09.1958–04.1959	05.1959–12.1959
	N СПС	12	3	8
	$\text{sum}F$	$1.3 \cdot 10^9$	$3.5 \cdot 10^7$	$4.3 \cdot 10^9$
	$\text{max}F$	$6 \cdot 10^8$	$2.8 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^9$
20	Время	01.1969–11.1969	12.1969–10.1970	11.1970–09.1971
	N СПС	7	4	5
	$\text{sum}F$	$4.6 \cdot 10^8$	$4.0 \cdot 10^7$	$5.9 \cdot 10^8$
	$\text{max}F$	$2.2 \cdot 10^8$	$2.7 \cdot 10^7$	$4.2 \cdot 10^8$
21	Время	01.1979–12.1979	01.1980–12.1980	01.1981–12.1981
	N СПС	4	2	7
	$\text{sum}F$	$2.3 \cdot 10^8$	$1.3 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^8$
	$\text{max}F$	$1.2 \cdot 10^8$	$1.1 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^8$
	γ	–1.4	–1.8	–1.4
22	Время	01.1989–12.1989	01.1990–12.1990	01.1991–12.1991
	N СПС	14	8	10
	$\text{sum}F$	$6.2 \cdot 10^9$	$2.0 \cdot 10^8$	$1.3 \cdot 10^9$
	$\text{max}F$	$3.2 \cdot 10^9$	$6.0 \cdot 10^7$	$8.9 \cdot 10^8$
	γ	–0.9	–1.3	–1.1
23	Время	04.1998–03.1999	04.1999–03.2000	04.2000–03.2000
	N СПС	8	3	9
	$\text{sum}F$	$4.8 \cdot 10^8$	$8.0 \cdot 10^6$	$5.0 \cdot 10^9$
	$\text{max}F$	$3.4 \cdot 10^8$	$3.5 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^9$
	γ	–1.4	–1.6	–0.9
24	Время	12.2011–07.2012	08.2012–03.2013	04.2013–11.2013
	N СПС	10	3	8
	$\text{sum}F$	$2.1 \cdot 10^9$	$6.0 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^8$
	$\text{max}F$	$1.4 \cdot 10^9$	$3.1 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^8$
	γ	–1.3	–2.5	–1.6

характеристики активных областей в периоды инверсии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайнев М.Б., Стожков Ю.И., Чарахчян Т.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т. 48. № 11. С. 2099.
2. Крайнев М.Б. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55. С. 1942.
3. Krainev M.B., Bazilevskaia G.A., Makhmutov V.S. // Proc. 27th ICRC (Hamburg, 2001). P. 3847.
4. Охлопков В.П., Стожков Ю.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 7. С. 1009; Okhlopkov V.P., Stozhkov Yu.I. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2007. V. 71. No. 7. P. 977.
5. Крайнев М.Б. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 185; Krainev M.B. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 166.
6. Nagashima K., Sakakibara S., Morishi I. // Geomagn. Geoelectr. 1991. V. 43. No. 8. P. 685.
7. Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Сладкова А.И. // Тр. конф. “Современные проблемы солнечной цикличности” (Санкт-Петербург, 1997). С. 362.
8. Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Флюкигер Е. и др. // Труды конф. “Новый цикл активности Солнца” (Санкт-Петербург, 1998). С. 95.
9. Гецелев И.В., Охлопков В.П., Чучков Е.А. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2004. № 3. С. 25.
10. Гецелев И.В., Подзолко М.В., Веселовский И.С. // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. № 2. С. 145; Getselev I.V.,

- Podzolkо M.V., Veselovsky I.S.* // Sol. Sys. Res. 2009. V. 43. No. 2. P. 136.
11. *Гецелев И.В., Охлопков В.П., Чучков Е.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. Т. 67. № 4. С. 486.
12. *Podzolkо M.V.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1181. No. 1. Art. No. 012016.
13. *Подзолко М.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 594; *Podzolkо M.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 535.
14. *Долгинова Ю.Н.* Солнечно-земная физика. Т. 2. М.: ИЗМИРАН, 1972.
15. *Акиньян С.Т., Базилевская Г.А., Ишков В.Н. и др.* Каталог солнечных протонных событий 1970–1979 гг. М.: ИЗМИРАН, 1982.
16. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>.
17. <http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes>.
18. <http://izwl.caltech.edu/ACE>.
19. <http://wso.stanford.edu>.
20. <http://sidc.be/silso>.

Characteristics of solar proton events during the periods of Sun's magnetic field reversal in the last 6 solar cycles

M. V. Podzolkо^{a, *}, V. V. Kalegaev^{a, b}, K. A. Ustinov^b

^a*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: spacerad@mail.ru*

Characteristics of solar proton events during the periods of Sun's magnetic field reversal in 19–24 solar activity cycles have been considered. In each of these solar cycles periods of time with duration of 8–12 months have been found, during which the number of solar events, total and maximal proton fluences were lower and the energy spectra were softer, than during the periods of equal duration before and after that. In most of the considered cycles the mentioned periods occurred after the cycle maximum or during the local “Gnevyshev minima”.