ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ЕГО ГЕОЭФФЕКТИВНОСТЬ В МИНИМУМАХ ЧЕТЫРЕХ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

В.И. Дегтярев¹, Г.В. Попов², С.Э. Чудненко¹

¹ Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

² Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Информация о статье

Дата поступления
15 сентября 2021 г.

Дата принятия к печати
27 декабря 2021 г.

Дата онлайн-размещения
28 декабря 2021 г.

Ключевые слова

Циклы солнечной активности; корональные эмиссии; солнечный ветер; межпланетное магнитное поле; геоэффективность

Аннотация

В последнее время появился ряд публикаций о продолжительном и глубоком минимуме в цикле 23 солнечной активности. Этот интерес связан с тем, что он оказался самым длинным и глубоким по числу солнечных пятен за всю эпоху исследования космоса. Особенности минимума цикла 23 солнечной активности и начала цикла 24 позволили предположить, что в ближайшие десятилетия может реализоваться минимум солнечной активности подобный минимуму Дальтона или Маундера, ведущий к глобальному изменению земного климата. Такие предположения делают весьма актуальными детальное исследование влияния минимума солнечного цикла 23 на параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля и сравнение этого влияния с аналогичными проявлениями в трех предыдущих циклах. В работе проведена статистическая обработка и анализ доступных в печати и сети Интернет данных по индексам солнечной активности (W и $F10,7$), геомагнитной активности, а также по параметрам солнечного ветра и межпланетного поля. В отличие от других подобных исследований при выборе временных интервалов для всех циклов был использован только один — 12 мес., что позволило исключить годовые и полугодовые вариации параметров солнечного ветра. Для изученных минимумов солнечной активности была рассмотрена геоэффективность возмущенных потоков ICME, CIR и Sheath. Обнаружено монотонное и весьма значительное уменьшение геоэффективности потоков ICME. Обработка данных по среднечасовым значениям параметров солнечного ветра в минимумах геомагнитной активности за четыре цикла подтвердила существенное отличие цикла 23 от предыдущих в поведении магнитного поля. Обсуждавшееся в печати уменьшение от цикла к циклу геоэффективности корональных выбросов заслуживает более детального анализа с привлечением обширных данных об индексах магнитной активности.

SOLAR WIND PARAMETERS AND ITS GEOEFFICIENCY DURING MINIMUMS OF FOUR SOLAR CYCLES

Vitalii I. Degtyarev¹, Georgy V. Popov², Svetlana E. Chudnenko¹

¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation

² Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation

Article info

Received
September 15, 2021

Accepted
December 27, 2021

Available online
December 28, 2021

Abstract

Recently a number of publications have appeared on the long and deep minimum in cycle 23 of solar activity. This interest is due to the fact that it turned out to be the longest and deepest in terms of the number of sunspots in the entire era of space exploration. The features of the minimum of cycle 23 of solar activity and the beginning of cycle 24 made it possible to assume that in the coming decades, a minimum of solar activity similar to the Dalton or Maunder minimum, leading to a global change in the earth's climate, may occur. Such assump-

Keywords

A cycle of solar activity; a solar wind; an interplanetary magnetic field; geoefficiency

tions make a detailed study of the influence of the minimum of solar cycle 23 on the parameters of the solar wind and the interplanetary magnetic field, as well as a comparison of this influence with similar manifestations in the three previous cycles very urgent. The work carried out statistical processing and analysis of data available in print and on the Internet on the indices of solar activity (W and $F10.7$), on geomagnetic activity, as well as on the parameters of the solar wind and interplanetary field. In contrast to other similar studies, when choosing time intervals for all cycles, only one — 12 months was used, which made it possible to exclude annual and semi-annual variations in solar wind parameters. For the considered minima of solar activity, the geoeffectiveness of the disturbed fluxes ICME, CIR, and Sheath was considered. A monotonic and very significant decrease in the geoeffectiveness of the ICME streams was found. Data processing on the hourly average values of the solar wind parameters at the minima of geomagnetic activity for 4 cycles confirmed the significant difference between cycle 23 and the previous ones in the behavior of the magnetic field. The cycle-by-cycle decrease in the geoeffectiveness of coronal ejections discussed in the press deserves a more detailed analysis using extensive data on magnetic activity indices.

Введение

В последнее время появился ряд публикаций о продолжительном и глубоком минимуме в цикле 23 солнечной активности [1–4]. Этот интерес связан с тем, что данный минимум оказался самым длинным и глубоким по числу солнечных пятен за всю эпоху исследования космоса [5; 6]. Необычные условия, сложившиеся в минимуме солнечной активности цикла 23, наблюдались на Солнце, в гелиосфере, а также в магнитосфере, ионосфере и верхней атмосфере Земли [3; 7]. Особенности минимума цикла 23 солнечной активности и начала цикла 24 позволили предположить [8–10], что в ближайшие десятилетия нас может ожидать минимум солнечной активности подобный минимуму Дальтона или Маундера, ведущий к глобальному изменению климата на Земле. Такие предположения делают весьма актуальным исследование условий в минимуме солнечного цикла 23 по сравнению с минимумами других солнечных циклов [1; 4; 5; 11]. Сравнительные исследования касаются как непосредственного наблюдения за условиями на Солнце [11], в межпланетном пространстве [1; 5], так и воздействия солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) на магнитосферу Земли [4]. Минимумы геомагнитной активности (МГА) запаздывали относительно минимума солнечных пятен (МСА) на интервалы в несколько месяцев [там же], поэтому условия в СВ и ММП могут существенно отличаться в МГА относительно МСА.

Цель настоящей работы — обобщить и систематизировать информацию о проявлении аномального солнечного минимума цикла 23 в параметрах СВ и ММП в сравнении

с тремя предыдущими минимумами солнечной и геомагнитной активности. Рассмотрим условия в СВ и ММП как в минимумах солнечной активности, определенных по данным о числе солнечных пятен (W) и индексе солнечного радиоизлучения ($F10.7$), так и в МГА, установленных по данным индексов геомагнитной активности.

Выбор временных периодов и данных для анализа

В большинстве публикаций, посвященных исследованию минимумов солнечной и магнитной активности, анализируемые временные интервалы выбирались произвольным образом, исходя из конкретных задач. Например, в работах [1; 11; 12] для анализа и сравнения минимумов солнечной активности были взяты интервалы времени от 11 до 43 мес.

В настоящем исследовании для определения периодов МСА, МГА и при сравнении условий в СВ в минимумах различных циклов (а также между МСА и МГА для одних и тех же циклов) были использованы одинаковые интервалы времени — один год, что позволило исключить годовые и полугодовые вариации параметров СВ, возникающие из-за изменения положения Земли относительно гелио-экватора при ее орбитальном движении. Результаты выбора анализируемых периодов представлены в табл.

Длительность МСА определялась как длительность периода, в течение которого величина чисел солнечных пятен не превышает $W_{\max} = 15$.

Здесь «месяц минимума» — это месячный интервал минимальных значений чисел солнечных пятен (или индексов геомагнит-

Минимумы солнечных циклов 20–23

Номер цикла	Минимумы солнечных пятен		Минимумы геомагнитной активности	
	Год и месяц минимума	Интервал	Год и месяц минимума	Интервал
20	1976 (06)	1975 (12) – 1976 (11)	1976 (12)	1976 (6) – 1977 (5)
21	1986 (03)	1985 (9) – 1986 (8)	1986 (12)	1986 (6) – 1987 (5)
22	1996 (08)	1996 (2) – 1997 (1)	1997 (7)	1997 (1–12)
23	2009 (02)	2008 (8) – 2009 (7)	2009 (7)	2009 (1–12)

ной активности), определенный методом скользящего среднего с 13-месячным окном усреднения. Годовые периоды минимумов (МСА и МГА) примерно центрированы относительно месяцев минимумов. При этом месяц минимума являлся седьмым месяцем годового интервала. Данные (табл.) показывают, что МГА запаздывают относительно МСА на 5–11 мес.

Используемые для анализа данные по индексам солнечной активности (W и $F10,7$) взяты на сайте <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act>; данные по параметрам СВ и ММП — на сайте <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>, а данные по геомагнитной активности — на <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>.

Средние значения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в минимумах солнечной и геомагнитной активности

Среднегодовые значения параметров СВ и модуля вектора ММП для периодов мини-

мумов геомагнитной и солнечной активности приведены на рис. 1.

Для периодов МСА (обозначены цифрой 1) изменения от минимума к минимуму параметров СВ и модуля вектора ММП имеют некоторое сходство с изменениями числа W и $F10,7$. Значения скорости и плотности СВ и полного вектора ММП увеличиваются на несколько процентов от МСА20 к МСА21, а затем резко уменьшаются к МСА23.

Цифрой 2 (рис. 1) обозначены изменения среднегодовых значений параметров СВ и ММП от одного МГА к другому. Как и для МСА, МГА23 отличается от других рассматриваемых МГА значительным уменьшением n , V и B .

Возмущенные потоки солнечного ветра в минимумах солнечной и геомагнитной активности и их геоэффективность

В пространственной структуре СВ кроме четырех секторов и квазистационарных потоков особое место занимают возмущенные крупномасштабные потоки, представляющие

Рис. 1. Среднегодовые значения скорости V и плотности n солнечного ветра и модуля вектора межпланетного магнитного поля B для минимумов солнечной (1) и геомагнитной (2) активности (для чисел солнечных пятен W и параметра $F10,7$ солнечной активности показаны среднегодовые величины за периоды минимумов солнечной активности)

собой значительные всплески параметров V , n , B и оказывающие поэтому значительное импульсное воздействие на магнитосферу Земли. Регистрация этих потоков проводится по результатам оптических наблюдений за областями их генерации и суммируется в каталогах [1; 2; 13]. Обычно выделяют корональные выбросы массы (ICME или CME), более медленные коротящие потоки CIR и области сжатия Sheath перед быстрыми CME [14–16].

Ниже для трех минимумов солнечной и магнитной активности (циклы 20–22) показано годовое количество крупномасштабных течений ICME и CIR по данным [13] (рис. 2, а, б, в), но для выбранных нами периодов МСА и МГА (см. табл.). Также приведено количество случаев ICME подсчитанных только для периодов МГА циклов 22 и 23 по каталогам [1; 2] (рис. 2, г). Бросается в глаза существенное отличие в количестве случаев ICME в МГА22 по каталогам [1; 2] (рис. 2, а) и по каталогу [13] (рис. 2, г). Это связано с различием классификационных условий выделения случаев крупномасштабных течений СВ, применяемых разными авторами, поэтому неудивительно, что количество случаев ICME по каталогам [1] и [2] различается, но при этом не вызывает сомнения факт существенного уменьшения случаев ICME от периода МГА22 к МГА23.

Сопоставление данных (рис. 2, а, б, в) и (см. рис. 1) показывает, что изменение

количества крупномасштабных потоков СВ от минимума к минимуму солнечной и геомагнитной активности находятся примерно в противофазе с изменениями индексов солнечной активности и параметров СВ.

Результатом взаимодействия возмущенных потоков СВ с магнитосферой Земли являются геомагнитные бури. Крупномасштабные структуры СВ инициируют магнитные бури с разными морфологическими характеристиками [17; 18]. Если за геоэффективность принять отношение числа событий определенного типа, приведших к магнитной буре, к полному числу событий этого типа, то по результатам статистических исследований [19], наибольшей геоэффективностью обладают корональные выбросы массы (55–63 %), а наименьшей — Ejecta (8–14 %), геоэффективность событий CIR около 20 %, а событий Sheath порядка 15 %. Наименьшая величина геоэффективности каждого типа СВ наблюдается вблизи минимума солнечной активности.

Далее приведены результаты нашего расчета геоэффективности потоков ICME для МГА 20–23 циклов (рис. 3). Число событий ICME было взято из каталогов [1; 2; 13], а годовые периоды МГА — из табл. Как видно, для МГА20–22 геоэффективность ICME составляет примерно 14–19 % (рис. 3, а), что не противоречит результатам [19]. Геоэффективность ICME, вычисленная по катало-

Рис. 2. Количество крупномасштабных потоков солнечного ветра вблизи орбиты Земли в минимумах солнечной (1) и геомагнитной (2, 3, 4) активности: а, г — потоки ICME; б — потоки CIR; в — потоки Sheath

Рис. 3. Эффективность корональных выбросов массы для генерации магнитных бурь с $|Dst| > 50$ нТл

гам [1; 2] для МГА22, примерно в 3–4 раза выше, чем по каталогу [19], что и следовало ожидать из-за различия этих каталогов в подходе к идентификации ICME (рис. 3). Понятно также, что геоэффективность потоков ICME сокращается от МГА20 к МГА22, что соответствует и уменьшению величины средних годовых геомагнитных индексов.

Эффективность ICME для МГА23 также уменьшилась по сравнению с МГА22, и весьма значительно — в 2,8–7,4 раза. В целом можно отметить монотонное уменьшение эффективности ICME от МГА20 к МГА23.

Мелкомасштабные флуктуации параметров солнечного ветра в минимумах геомагнитной активности

Мелкомасштабная структура СВ и ММП рассматривалась во многих работах [20; 21], но без корректной привязки к интервалам МГА. На рис. 4 показано подсчитанное нами нормированное распределение часовых значений параметров СВ для четырех МГА, указанных в табл. Видно заметное отличие в распределении всех параметров СВ в МГА23 относительно МГА20–22. Для скорости V это преобладание значений менее 350 км/с и для плотности n — значений менее 6 см^{-3} по сравнению с другими минимумами. Отличается МГА23 от других минимумов и в распределении ММП. Для модуля ММП — это превышение количества случаев с $B < 4$ –5 нТл и значительно меньшее количество случаев с $B > 7$ нТл. Функции распределения V , n и B близки к логнормальному распределению, что согласуется с результатами [21] (для V и n — период 1996–1998 гг.) и [22] (для n — Sheath четыре солнечных цикла).

Функции распределения компонент ММП обнаруживают еще большее, нежели модуль B , отличие от минимума к миниму-

му. Как и для B распределение компонент B_x , B_y и B_z для МГА23 резко отличается от распределений в МГА20–22. Значения компонент ММП для минимума 23 цикла сконцентрированы в основном в области $B_x = 0$ –3 нТл, $B_y = -3$ –2 нТл и $B_z = -1$ –1 нТл. Для МГА20–22 функция распределения B_x и B_y имеет четко выраженный двумодальный характер, тогда как для МГА23 она близка к нормальному распределению. Функция распределения для B_z ММП близка к нормальной функции в период всех рассмотренных МГА, но для МГА23 имеется преобладание величин $B_z = -1$ –1 нТл по сравнению с другими МГА.

Выводы

Как упоминалось, анализ особенностей МСА23 и МГА23 ранее уже проводился [1–5; 11; 12]. Однако в этих работах за МСА и МГА в 22 и 23 солнечных циклах принимались различные по длительности периоды. В настоящей работе для сопоставления данных были выбраны для всех случаев годовые периоды. Это позволило более корректно сопоставить условия в СВ, ММП и в магнитосфере в различных МСА и МГА. Кроме того, наши исследования были распространены на минимумы 20 и 21 солнечных циклов.

Выводы о необычности минимума 23 цикла [1–4] подтверждены нашими статистическими данными. Найдено, что средние значения параметров СВ в минимумах МСА23 и МГА23 существенно меньше, чем в предыдущих минимумах.

Отмеченное уменьшение от минимума к минимуму геоэффективности корональных выбросов массы, особенно заметное при переходе от МГА22 к МГА23, заслуживает более детального анализа, который будет проведен в дальнейшем с привлечением обширных данных об индексах геомагнитной активности.

Рис. 4. Гистограмма среднечасовых параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в минимумах геомагнитной активности

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during the minimum periods following solar cycles 22 and 23 / E.K.J. Kilpua, C.O. Lee, J.G. Luhmann, Y. Li // *Annales Geophysical*. — 2011. — Vol. 29. — P. 1455–1467.
2. Richardson I.G. Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009) : catalog and summary of properties / I.G. Richardson, H.V. Cane. — DOI 10.1007/s11207-010-9568-6 // *Solar Physics*. — 2010. — Vol. 264. — P. 189–237.
3. Russell C.T. How unprecedented a solar minimum? / C.T. Russell, J.G. Luhmann, L.K. Jian. — DOI 10.1029/2009RG000316 // *Reviews of Geophysics*. — 2010. — Vol. 48, no. 2. — RG2004.
4. Tsurutani B.T. The solar and interplanetary causes of the recent minimum in geomagnetic activity (MGA23): a combination of midlatitude small coronal holes, low IMF BZ variances, low solar wind speeds and low solar magnetic fields / B.T. Tsurutani, E. Echer, W.D. Gonzalez. — DOI 10.5194/angeo-29-839-2011 // *Annales Geophysical*. — 2011. — Vol. 29. — P. 839–849.
5. If the Sun is so quiet, why is the Earth ringing? A comparison of two solar minimum intervals / S.E. Gibson, J.U. Kozyra, G. deToma [et al.]. — DOI 10.1029/2009JA014342 // *Journal of Geophysical Research*. — 2009. — Vol. 114. — A09105.
6. Hathaway D.H. The Solar Cycle / D.H. Hathaway // *Living Reviews in Solar Physics*. — 2010. — Vol. 7. — P. 1–65.
7. Love J.J. Geomagnetic detection of the sectorial solar magnetic field and the historical peculiarity of minimum 23–24 / J.J. Love, E.J. Rigler, S.E. Gibson. — DOI 10.1029/2011GL050702 // *Geophysical Research Letters*. — 2012. — Vol. 39. — L04102.
8. Ahluwalia H.S., Ygbuhay R.C. Sunspot cycle 24 and the advent of Dalton-like minimum / H.S. Ahluwalia, R.C. Ygbuhay. — DOI 10.1155/2012/126516 // *Advances in Astronomy*. — 2012.
9. Feulner G. On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth / G. Feulner, S. Rahmstorf // *Geophysical Research Letters*. — 2010. — Vol. 37. — L05707.

10. Nielsen M.L. Is cycle 24 the beginning of a Dalton-like minimum? / M.L. Nielsen, H. Kjeldsen // *Solar Physics*. — 2011. — Vol. 270. — P. 385–392.
11. Coronal field opens at lower height during the solar cycles 22 and 23 minimum periods: IMF comparison suggests source surface should be lowered / C.O. Lee, J.G. Luhmann, J.T. Hoeksema [et al.]. — DOI 10.1007/s11207-010-9699-9 // *Solar Physics*. — 2011. — Vol. 269. — P. 367–388.
12. Dikpati M. Length of a minimum as predictor of next solar cycle's strength / M. Dikpati, P.A. Gilman, R.P. Kane // *Geophysical Research Letters*. — 2010. — Vol. 37. — L06104.
13. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. / Ю.И. Ермолаев, Н.С. Николаева, И.Г. Лодкина, М.Ю. Ермолаев // *Космические исследования*. — 2009. — Т. 47, № 2. — С. 99–113.
14. Geomagnetic storms driven by ICME- and CIR-dominated solar wind / M.H. Denton, J.E. Borovsky, R.M. Skoug [et al.]. — DOI 10.1029/2005JA011436 // *Journal of Geophysical Research*. — 2006. — Vol. 111. — A07S07.
15. Kumar S. Geoeffectiveness of magnetic clouds occurred during solar cycle 23 / S. Kumar, A. Raizada // *Planetary and Space Science*. — 2010. — Vol. 58. — P. 741–748.
16. Statistical relationship between solar wind conditions and geomagnetic storms in 1998–2008 / D. Xu, T. Chen, X.X. Zhang, Z. Liu // *Planetary and Space Science*. — 2009. — Vol. 57. — P. 1500–1513.
17. Солнечная активность и геомагнитные возмущения / В.Н. Обридко, Х.Д. Канониди, Т.А. Митрофанова, Б.Д. Шельтинг // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2013. — Т. 53, № 2. — С. 157–166.
18. Geoefficiency and energy partitioning in CIR-driven and CME-driven storms / N.E. Turner, W.D. Cramer, S.K. Earles, B.A. Emery // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2009. — Vol. 71. — P. 1023–1031.
19. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури / Ю.И. Ермолаев, И.Г. Лодкина, Н.С. Николаева, М.Ю. Ермолаев // *Космические исследования*. — 2010. — Т. 48, № 6. — С. 499–515.
20. Thatcher L.J. Statistical investigation of hourly OMNI solar wind data / L.J. Thatcher, H.-R. Müller. — DOI 10.1029/2011JA017027 // *Journal of Geophysical Research*. — 2011. — Vol. 116. — A12107.
21. Burlaga L.F. Lognormal distributions and spectra of solar wind plasma fluctuations: Wind 1995–1998 / L.F. Burlaga, A.J. Lazarus. — DOI 10.1029/1999JA900442 // *Journal of Geophysical Research*. — 2000. — Vol. 105 (A2). — P. 2357–2364.
22. Dmitriev A.V. Statistical characteristics of the heliospheric plasma and magnetic field at the Earth's orbit during four solar cycles 20–23 / A.V. Dmitriev, A.V. Suvorova, I.S. Veselovsky // *Handbook on Solar Wind: Effects, Dynamics and Interactions* / ed. H.E. Johanson. — New York, 2009. — P. 81–144.

Информация об авторах

Дегтярев Виталий Иванович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: degt@iszf.irk.ru. SPIN-код: 9705-3372, AuthorID: 59521.

Попов Георгий Васильевич — доктор физико-математических наук, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: popov2898@mail.ru. SPIN-код: 3979-6755, AuthorID: 58756.

Чудненко Светлана Эдуардовна — инженер-программист, Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: chud@iszf.irk.ru. AuthorID: 62388.

Для цитирования

Дегтярев В.И. Параметры солнечного ветра и его геоэффективность в минимумах четырех солнечных циклов / В.И. Дегтярев, Г.В. Попов, С.Э. Чудненко. — DOI 10.17150/2500-2759.2021.31(4).508-514 // *Известия Байкальского государственного университета*. — 2021. — Т. 31, № 4. — С. 508–514.

Authors

Vitalii I. Degtyarev — Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: degt@iszf.irk.ru. SPIN: 9705-3372, AuthorID: 59521.

Georgy V. Popov — D.Sc. in Physical and Mathematical Sciences, Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: popov2898@mail.ru. AuthorID: 58756.

Svetlana E. Chudnenko — Software Engineer, Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: chud@iszf.irk.ru. AuthorID: 62388.

For Citation

Degtyarev V.I., Popov G.V., Chudnenko S.E. Solar Wind Parameters and Its Geoefficiency During Minimums of Four Solar Cycles. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2021, vol. 31, no. 4, pp. 508–514. (In Russian). DOI: 10.17150/2500-2759.2021.31(4).508-514.