

Научная статья

УДК 551.58:551.590.21

EDN [IYFNPM](#)

DOI 10.17150/2411-6262.2022.13(1).17

В.И. Дегтярев¹, Г.В. Попов²✉¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация² Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская ФедерацияАвтор, ответственный за переписку: Г.В. Попов, popov2898@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В МИНИМУМАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

АННОТАЦИЯ. Проведен анализ геомагнитной обстановки в минимумах солнечной (МСА) и геомагнитной (МГА) активности солнечных циклов 20-23. Показано, что МГА23 отличается не только наиболее низкими средними значениями всех геомагнитных индексов, но и функциями распределения их флуктуаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Солнечная активность, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, геомагнитные индексы, магнитные бури.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ. Дата поступления 2 февраля 2022 г.; дата принятия к печати 21 марта 2022 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2022 г.

Original article

V.I. Degtyarev¹, G.V. Popov²✉¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russian Federation² Baikal State University, Irkutsk, Russian FederationCorresponding author: G.V. Popov, popov2898@mail.ru

MODELING THE GEOEFFICIENCY OF SOLAR WIND IN SOLAR ACTIVITY MINIMA

ABSTRACT. The analysis of geomagnetic conditions in minima solar (MSA) and geomagnetic (MGA) activity of solar cycles 20-23 is carried out. It is shown, that MGA23 differs not only by the lowest average values of all geomagnetic indexes, but also in functions of distribution of their fluctuations.

KEYWORDS. A solar activity, a solar wind, interplanetary magnetic field, geomagnetic indexes, magnetic storms.

ARTICLE INFO. Received February 2, 2022; accepted March 21, 2022; available online April 30, 2022.

Введение

Последний из минимумов солнечной активности (МСА) выделялся своей необычностью среди других. Необычные условия, сложившиеся в минимуме солнечной активности цикла 23 (МСА23), наблюдались на Солнце, в гелиосфере, а также в магнитосфере, ионосфере и верхней атмосфере Земли (см., [1–3]). Характеристики потоков солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП), а также их сравнение для разных МСА были рассмотрены в ряде работ (см. [4–7] и ссылки в них). В гораздо меньшей степени был выполнен сравнительный анализ геомагнитной активности в последних минимумах солнечных циклов. Так, например, Love et al. [3] исследовали. [2] сравнили основные параметры СВ, ММП

© Дегтярев В.И., Попов Г.В., 2022

Baikal Research Journal

электронный научный журнал Байкальского государственного университета

и магнитной активности в минимумах геомагнитной активности (МГА) циклов 22 и 23 и обсудили причины этих минимумов. Было отмечено [2], что в минимуме геомагнитной активности солнечного цикла рекуррентность aa -индексов геомагнитной активности в минимумах 11-23 циклов, а Tsurutani et al 23 (МГА23) зарегистрированы самые низкие ap индексы в истории их регистрации.

Цель настоящей работы — дополнить информацию о проявлении аномального солнечного минимума цикла 23 в геомагнитной активности. Минимум цикла 23 будет рассматриваться в сравнении с предыдущими тремя минимумами солнечных циклов. Мы сопоставим ситуацию в геомагнитной активности, как в минимумах солнечной, так и в минимумах геомагнитной активности. Для более корректного сопоставления (и исключения вариаций связанных с орбитальным движением Земли вокруг Солнца) так же, как в [7] выбраны (см. табл. 1) годовые периоды минимумов солнечной активности (МСА) и минимумов геомагнитной активности (МГА).

При анализе использованы данные по индексам солнечной активности (W и $F10,7$) публикуемые на сайте <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act>. Данные по параметрам СВ и ММП получены на сайте <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. Данные по индексам геомагнитной активности взяты на сайтах: <http://wdc.kugi.kyoto-ac.jp/wdc/Sec3.html> и ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEO-MAGNETIC_DATA.

Таблица 1

Временные интервалы минимумов 20-23 солнечных циклов

Номер цикла	Интервал МСА (год, месяц)	Интервал МГА (год, месяц)	Сдвиг МГА относительно МСА (месяцы)
20	1975 (12)–1976 (11)	1976 (06)–1977 (05)	6
21	1985 (09)–1986 (08)	1986 (06)–1987 (05)	9
22	1996 (02)–1997 (01)	1997 (01)–1997 (12)	11
23	2008 (08)–2009 (07)	2009 (01)–2009 (12)	5

1. Результаты

1.1. Средние характеристики геомагнитных индексов в минимумах солнечной и геомагнитной активности

Среднегодовые значения геомагнитных индексов PC , ΣK_p и aa для периодов минимумов геомагнитной и солнечной активности приведены на рис. 1. В верхней части рисунка (слева) показано изменение числа солнечных пятен и индекса солнечного радиоизлучения $F10,7$.

Изменения среднегодовых величин геомагнитных индексов от минимума к минимуму солнечной активности (на рис.1 обозначены цифрой 1) несколько отличаются от изменений среднегодовых индексов солнечной активности. При этом уменьшение величин всех приведенных индексов геомагнитной активности начинается от МСА20 и продолжается до МСА23. Особенно резкое уменьшение среднегодовых величин индексов геомагнитной активности видно при переходе от МСА22 к МСА23 (примерно в 2 раза).

Цифрой 2 на рис. 1 обозначены изменения среднегодовых значений геомагнитных индексов в минимумах геомагнитной активности (в периоды МГА — см. табл. 1). Сопоставление этих изменений с соответствующими изменениями в минимумах солнечной активности (МСА) показывает, что все среднегодовые величины геомагнитных индексов в периоды МГА меньше, чем в периоды МСА (вообще говоря, это и должно следовать из определения МГА).

Существенно, что для всех приведенных на рис. 1 индексов геомагнитной активности отмечается резкое уменьшение среднегодовых величин от минимумов МСА и МГА цикла 22 к минимумам цикла 23. При этом изменение в величинах геомагнитных индексов значительно превышает изменения, наблюдавшиеся (см. подробности в [7]) в параметрах СВ и межпланетного магнитного поля (ММП). При переходе от МСА22 к МСА23 уменьшение параметров СВ (скорости V_{sw} и плотности n), а также значений В ММП составляет, соответственно, ~6 %, ~52 % и ~28 %. А значения геомагнитных индексов изменяются гораздо сильнее: индексы PC , Kp и aa уменьшаются примерно в 1,6 раза, а индекс AE (на рис. 1 он не показан) падает 2 раза.

В периоды МГА уменьшение параметров СВ (V_{sw} и n) и модуля межпланетного поля от МГА22 к МГА23 составляет, соответственно, ~4 %, ~52 % и ~28 %. Геомагнитных индексы: индекс AE уменьшается в 2,4 раза, индексы PC и aa — в 1,8 раза, ΣKp — на ~50 %. Характерно, что подобная ситуация отмечается и на фазах спада солнечной активности за 1,5–2 года перед минимумами солнечной активности.

Непропорциональное уменьшение среднегодовых величин индексов геомагнитной активности в периоды МГА и МСА относительно уменьшений среднегодовых параметров СВ и ММП (см. [7]) есть результат проявления существенной нелинейности системы в целом (это во первых) и существенной нелинейности самих индексов (во-вторых), так что отмеченный факт не является удивительным

Из рис. 1 видно, что временной ход разных геомагнитных индексов отличается друг от друга. Особенно велико это различие между индексами ΣKp и PC , что связано с особенностями определения различных индексов геомагнитной активности и их связи с параметрами СВ и ММП. Если индекс PC характеризует ве-

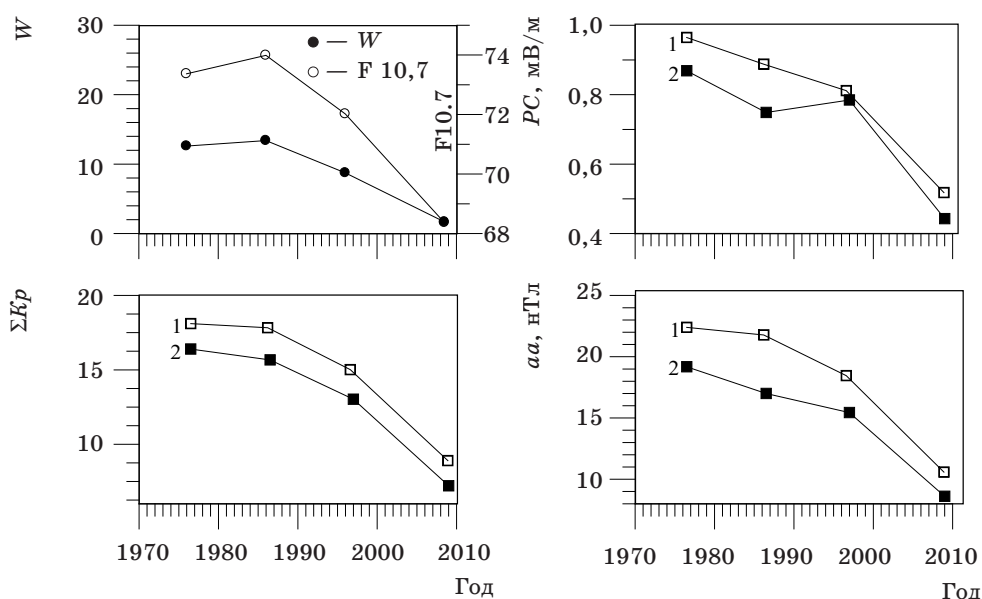


Рис. 1. Средние величины геомагнитных индексов PC , ΣKp и aa для минимумов солнечной (1) и геомагнитной (2) активности. Для чисел солнечных пятен и параметра $F10,7$ солнечной активности показаны среднегодовые величины за периоды минимумов солнечной активности

личину геоэффективного межпланетного электрического поля, воздействующего на магнитосферу, и связан с динамическим давлением солнечного ветра [8], то индекс ΣKp отражает изменения в глобальной системе токов, текущих в магнитосфере (см., например, [9]).

1.2. Геомагнитные бури в минимумах геомагнитной активности

Геомагнитные бури являются проявлением взаимодействия потоков солнечного ветра с магнитосферой Земли. Количество магнитных бурь варьирует в течение цикла солнечной активности. Максимальное количество магнитных бурь, вызванных взаимодействием с магнитосферой корональных выбросов массы (ICME), наблюдается в период максимума солнечного цикла, а бурь вызванных коротящими потоками (CIR) в период спадающей фазы цикла [10]. Минимальное количество магнитных бурь наблюдается в минимуме солнечной активности. Для минимумов солнечной активности превалируют магнитные бури вызванные CIR. Наличие магнитных бурь в минимумах солнечной и магнитной активности носит в некоторой степени случайный характер, в зависимости от положения Земли относительно высокоскоростного потока СВ из корональных дыр. При этом, как показал Hathaway [11], некоторый вид солнечных вспышек, ответственных за корональные выбросы масс, может появиться случайным образом на любой фазе солнечного цикла, включая солнечный минимум.

Исходя из этого, для увеличения статистики случаев магнитных бурь в различных минимумах мы использовали двухгодичные периоды (МГА*), которые включали годовые периоды минимумов геомагнитной активности и годовые периоды, предшествующие МГА. Фактически периоды МГА* включали в себя периоды МГА и расширенные периоды МСА (см. табл. 1).

На рис. 2,а показано число магнитных бурь с интенсивностями $Dst < -50$ нТл и $Dst < -80$ нТл в период минимумов солнечной и геомагнитной активности 20–23 солнечных циклов. Для бурь с $Dst < -50$ нТл изменение количества бурь от МГА21* к МГА23* подобно изменению параметров СВ в минимумах солнечной и

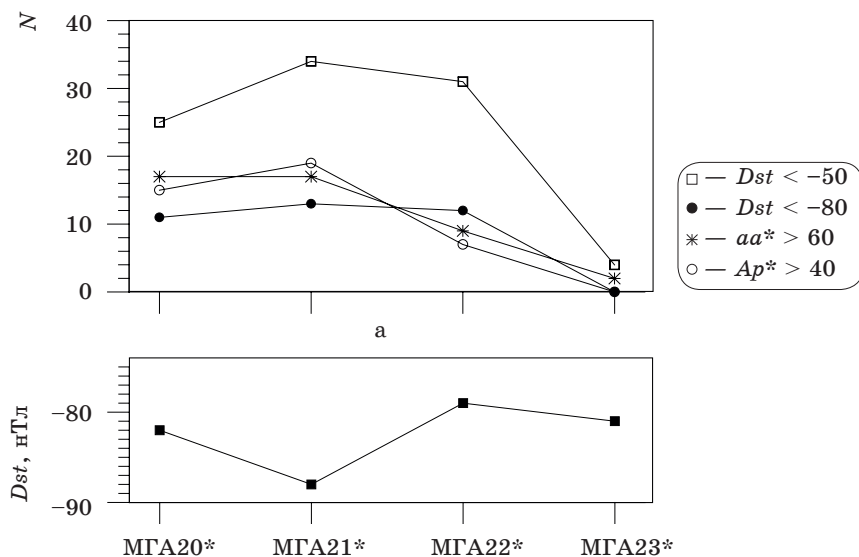


Рис. 2. Количество магнитных бурь (а) и их средняя интенсивность (б) в минимумах солнечной активности. Магнитные бури были определены по индексам Dst , aa и Ap .

геомагнитной активности. (см. [7]). Число магнитных бурь с $Dst < -80$ нТл примерно одинаково для МГА20*–22*.

Интересно отметить, что годовое количества бурь, определенных по индексам геомагнитной активности Ap и aa , близко к количеству магнитных бури определенных по Dst индексу ($Dst < -80$ нТл), а по характеру изменения от минимума к минимуму подобно изменению индексам солнечной активности и скорости СВ (см. рис. 1 и [7]). Наличие магнитной бури по данным индексов Ap и aa определялось по критериям: $aa^* > 60$ нТл и $Ap^* > 40$, где aa^* и Ap^* — среднесуточные значения aa и Ap индексов, соответственно. Такое сопоставление результатов определения наличия магнитных бурь по данным различных индексов геомагнитной активности полезно для сравнения геомагнитной активности в МГА23 с другими минимумами и важно с точки зрения реконструкции условий в минимумах геомагнитной и солнечной активности за прошедшие циклы. Рис. 2,а позволяет сделать вывод, что количество магнитных бурь с различной интенсивностью существенно уменьшается в МГА23* по сравнению с другими минимумами. При этом средняя интенсивность магнитных бурь примерно одинакова (в пределах статистической ошибки) для всех минимумов и находится в пределах 80-90 нТл (см. рис. 2,б).

1.3. Распределение величин индексов геомагнитной активности в 20-23 минимумах геомагнитной активности

На интенсивность возмущения геомагнитного поля, выраженного в индексах геомагнитной активности, влияет не только средняя величина параметров СВ и ММП, но также и их флуктуации (см., например, [12–15]). Флуктуации параметров СВ и ММП модулируют поступление энергии и частиц из солнечного ветра в магнитосферу, что и проявляется в геомагнитных индексах. Например, даже непродолжительное появление южной компоненты ММП может приводить к развитию магнитной суббури при общем северном направлении межпланетного магнитного поля [16]. Таким образом, флуктуации в параметрах СВ и ММП приводят к флуктуациям в индексах геомагнитной активности.

На рис. 3 показано распределение индексов геомагнитной активности по их величине в МГА20-23. Распределение всех приведенных геомагнитных индексов в МГА23 резко отличается от других минимумов. Видно, что в МГА23 значительно увеличилась частота наблюдения низких значений PC , Kp и AE индексов геомагнитной активности по сравнению с МГА20-22, а величина Dst индекса в основном сосредоточена в диапазоне -20 ч $+20$ нТл.

Функции распределения индексов геомагнитной активности по их величине можно, как это делалось для параметров СВ и ММП (см., например, [17-18]), аппроксимировать стандартными вероятностными функциями. Анализ результатов, представленных на рис. 3, с помощью критерия Пирсона показал, что для всех четырех минимумов геомагнитной активности распределение PC и Dst индексов лучше всего аппроксимируется логнормальным законом. Вид функции распределения AE индексов также близок к логнормальному распределению для всех МГА. Для aa и Kp индексов геомагнитной активности отмечается эволюция типа функции распределения от минимума к минимуму геомагнитной активности. Функции распределения aa индекса для МГА20-21 лучше всего описываются гамма-функцией, хотя и близки к логнормальному распределению. Для МГА22 вид функции распределения подобен логнормальному, а для МГА23 лучшее представление — экспоненциальным видом. Для Kp вид функции распределения также эволюционирует при переходе от МГА20 к МГА23. Если для МГА20-21 функция распределения Kp индекса ближе всего к нормальному распределению (или подобна гамма-функции), то для МГА22-23 она принимает экспоненциальный вид.

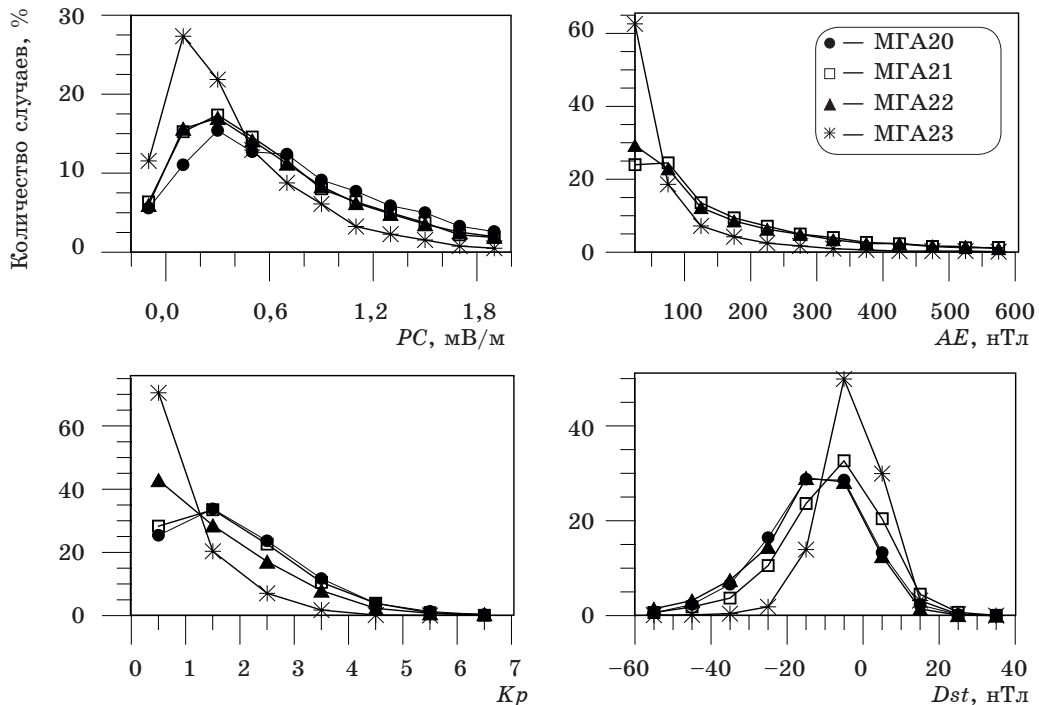


Рис. 3. Гистограмма часовых величин PC -, Dst -, AE -индексов и 3х-часовых значений Kp в минимумах геомагнитной активности

При анализе статистических характеристик флуктуаций параметров СВ и ММП авторы [17–18] использовали четыре момента логнормальной функции распределения: амплитуду (A), дисперсию (σ), асимметрию (Sk) и эксцесс (K). Проведенный нами расчет показал, что между статистическими моментами функций распределения параметров СВ и ММП и аналогичными моментами для индексов геомагнитной активности имеется тесная связь. В табл. 2 в качестве примера приведены коэффициенты корреляции между моментами логнормальных распределений индексов PC и Dst и соответствующими моментами логнормальных распределений скорости СВ (V), модуля ММП (B), рассчитанных для МГА20–23. Здесь же приведены коэффициенты корреляции между моментами нормальной функции распределения, подобранной для B_z , и моментами логнормальной функции распределения, подобранной для aa индекса. Наиболее тесная связь отмечается между параметрами функции распределения для геомагнитных индексов и модуля B межпланетного магнитного поля (а также плотности n солнечного ветра).

2. Обсуждение результатов и выводы

В настоящей работе мы рассмотрели характеристики геомагнитного поля в минимуме геомагнитной и солнечной активности солнечного цикла 23 и сопоставили их с соответствующими характеристиками в минимумах трех предыдущих (20–22) солнечных циклов. Для корректного сопоставления данных были выбраны годовые периоды минимальной магнитной и солнечной активности.

Как отмечали авторы работы [2] (и ссылки в ней), МГА23 был экстремальным по нескольким аспектам солнечных и межпланетных явлений, в том числе и по

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между параметрами функции распределений скорости (V) и плотности (n) СВ, В и В z ММП и геомагнитных индексов (для периодов МГА20-23)

Моменты	$B-Dst$	$B-PC$	$Bz-aa$	$V-Dst$	$V-PC$	$n-Dst$	$n-PC$
A	0,999	0,937	0,340	0,395	0,423	0,964	0,942
σ	0,812	0,767	0,585	0,489	0,440	0,948	0,917
Sk	0,847	0,971	0,358	0,475	0,764	0,845	0,936
K	-0,335	-0,362	0,613	-0,518	-0,243	-0,384	-0,517

геомагнитной активности. Этот вывод об экстремальности минимума 23 цикла в настоящей работе подтвержден статистическими данными. Среднегодовые значения индексов геомагнитной активности в МГА23 и МСА23 были самые низкие по сравнению с минимумами циклов 20-22 (рис. 1), также как и количество геомагнитных бурь разной интенсивности (рис. 2). Авторы [19], исследуя активность аврорального электроджета (по индексу AE) в период глубокого минимума солнечного цикла 23 пришли к выводу, что в 2008–2009 гг. даже механизмы магнитосферно-ионосферной связи существенно отличались от других периодов. Исследуя весьма длинный ряд данных по aa -индексу, Love et al. [3] отметили, что период МСА23 отличался выдающейся 9- и 6,7-дневной его рекуррентностью.

Результаты нашего анализа функций распределения индексов геомагнитной активности (рис. 3) подтверждают необычность МГА23. В МГА23, по сравнению с тремя предыдущими минимумами, функцию распределения индексов Kp и aa можно аппроксимировать экспоненциальным законом, в то время как для других МГА — нормальным законом или гамма-функцией. Необычность этих характеристик магнитной активности вполне согласуется с особенностями функций распределения флуктуаций значений параметров СВ и ММП (см. рис. 4 в [7]).

О наличии тесной корреляционной связи между флуктуациями межпланетных параметров и средними величинами геомагнитных индексов известно уже давно (см., [12; 13; 20] и др.). Наши расчеты (см. табл. 2) показали, что тесная связь существует также между всеми моментами функций распределения индексов геомагнитной активности и межпланетных параметров. Это дает возможность использовать наши результаты для реконструкции состояния геомагнитной активности в докосмическую эпоху, когда измерений параметров СВ и ММП еще не было. Особенно это важно для эпигноза В z компонента ММП, так как этот параметр в значительной степени несет ответственность за генерацию магнитных бурь [21]. Основой для эпигноза функций распределения межпланетных параметров могут служить aa индексы геомагнитной активности, значения которых имеются, начиная с 1868 г.

Список использованной литературы

1. 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, iss. 2. — RG2004.
2. 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 Geophysicae. — 2011. — Vol. 29. — P. 839–849.

3. 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.
4. 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. de Toma [et al.]. — DOI 10.1029/2009JA014342 // *Journal of Geophysical Research*. — 2009. — Vol. 114. — A09105.
5. 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 Geophysicae*. — 2011. — Vol. 29. — P. 1455–1467.
6. 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.
7. Дегтярев В.И. Солнечный ветер в минимумах солнечной и геомагнитной активности за прошедшие 35 лет / В.И. Дегтярев, Г.В. Попов, С.Э. Чудненко // *Вопросы естествознания*. — 2014. — № 3. — С. 85–93.
8. Трошичев О.А. РС-индекс — наземный индикатор поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра / О.А. Трошичев // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2010. — № 2 (85). — С. 102–116.
9. Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности : справ. пособие / Н.А. Заболотная. — Москва : Изд-во ЛКИ, 2007. — 88 с.
10. Miyoshi Y. Solar cycle variations of outer radiation belt and its relationship to solar wind structure dependences / Y. Miyoshi, R. Kataoka // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2011. — Vol. 73, no. 1. — P. 77–87.
11. Hathaway D.H. The Solar Cycle / D.H. Hathaway // *Living Reviews in Solar Physics*. — 2010. — Vol. 7. — P. 1–65.
12. Ballif J.R. Further evidence on the correlation between transverse fluctuations in the interplanetary magnetic field and Kp / J.R. Ballif, D.E. Jones, P.J. Coleman // *Journal of Geophysical Research*. — 1969. — Vol. 74, iss. 9. — P. 2289–2301.
13. Garret H.B. Influence of solar wind variability on geomagnetic activity / H.B. Garret, A.J. Dessler, T.W. Hill // *Journal of Geophysical Research*. — 1974. — Vol. 79, iss. 31. — P. 4603–4610.
14. Lemaire J. Penetrating of solar wind plasma elements into the magnetosphere / J. Lemaire, M. Roth // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 1978. — Vol. 40. — P. 331.
15. Wing S. Effects of interplanetary magnetic field z component and the solar wind dynamic pressure on the geosynchronous magnetic field / S. Wing, D.G. Sibeck. — DOI 10.1029/97JA00150 // *Journal of Geophysical Research*. — 1997. — Vol. 102, no. A4. — P. 7207–7216.
16. Kane R.P. Interplanetary and geomagnetic parameters during January 16–26, 2005 / R.P. Kane // *Planetary and Space Science*. — 2012. — Vol. 62. — P. 97–99.
17. 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, no. A2. — P. 2357–2364.
18. 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* : Ch. 2. / ed. H.E. Jøhanson. — New York, 2009. — P. 81–144.
19. Auroral electrojets during deep solar minimum at the end of solar cycle 23 / T.I. Pulkkinen, E.I. Tanskanen, A. Viljanen. — DOI 10.1029/2010JA016098 // *Journal of Geophysical Research*. — 2011. — Vol. 116, no. A04207.
20. Жиромский Б.В. Спектры вариаций Vz-компоненты ММП в высокоскоростных потоках солнечного ветра и интенсивность полярных магнитных возмущений / Б.В. Жиромский // *Магнитосферные исследования*. — Москва, 1982. — № 1. — С. 29–31.
21. Echer E. Interplanetary origins of moderate (-100 nT $<$ Dst ≤ -50 nT) geomagnetic storms during solar cycle 23 (1996–2008) / E. Echer, B.T. Tsurutani, W.D. Gonzalez. — DOI 10.1029/2012JA018086 // *Journal of Geophysical Research*. — 2013. — Vol. 118. — P. 385–392.

References

1. Russell C.T., Luhmann J.G., Jian L.K. How Unprecedented a Solar Minimum? *Reviews of Geophysics*, 2010, vol. 48, iss. 2, RG2004. DOI: 10.1029/2009RG000316.
2. Tsurutani B.T., Echer E., Gonzalez W.D. 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. *Annales Geophysicae*, 2011, vol. 29, pp. 839–849. DOI: 10.5194/angeo-29-839-2011.
3. Love J.J., Rigler E.J., Gibson S.E. Geomagnetic Detection of the Sectorial Solar Magnetic Field and the Historical Peculiarity of Minimum 23–24. *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, L04102. DOI: 10.1029/2011GL050702.
4. Gibson S.E., Kozyra J.U., de Toma G., Emery B.A., Onsager T., Thompson B.J. If the Sun is so Quiet, Why is the Earth Ringing? A Comparison of Two Solar Minimum Intervals. *Journal of Geophysical Research*, 2009, vol. 114, A09105. DOI: 10.1029/2009JA014342.
5. Kilpua E.K.J., Lee C.O., Luhmann J.G., Li Y. Interplanetary Coronal Mass Ejections in the Near-Earth Solar Wind During the Minimum Periods Following Solar Cycles 22 and 23. *Annales Geophysicae*, 2011, vol. 29, pp. 1455–1467.
6. Lee C.O., Luhmann J.G., Hoeksema J.T., Sun X., Arge C.N., de Pater I. Coronal Field Opens at Lower Height During the Solar Cycles 22 and 23 Minimum Periods: IMF Comparison Suggests Source Surface Should be Lowered. *Solar Physics*, 2011, vol. 269, pp. 367–388. DOI: 10.1007/s11207-010-9699-9.
7. Degtjarev V.I., Popov G.V., Chudnenko S.Je. Solar Wind During Minima of Solar and Magnetic Activity for Past 35 Years. *Voprosy estestvoznaniya = Questions of Natural Science*, 2014, no. 3, pp. 85–93. (In Russian).
8. Tposhichev O.A. PC-Index as a Ground-Based Indicator of Solar Wind Energy Entering the Magnetosphere. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*, 2010, no. 2, pp. 102–116. (In Russian).
9. Zabolotnaja N.A. *Indexes of Geomagnetic Activity*. Moscow, LKI Publ., 2007. 88 p.
10. Miyoshi Y., Kataoka R. Solar Cycle Variations of Outer Radiation Belt and its Relationship to Solar Wind Structure Dependences. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, vol. 73, no. 1, pp. 77–87.
11. Hathaway D.H. The Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 2010, vol. 7, pp. 1–65.
12. Ballif J.R., Jones D.E., Coleman P.J. Further Evidence on the Correlation between Transverse Fluctuations in the Interplanetary Magnetic Field and Kp. *Journal of Geophysical Research*, 1969, vol. 74, iss. 9, pp. 2289–2301.
13. Garret H.B., Dessler A.J., Hill T.W. Influence of Solar Wind Variability on Geomagnetic Activity. *Journal of Geophysical Research*, 1974, vol. 79, iss. 31, pp. 4603–4610.
14. Lemaire J., Roth M. Penetrating of Solar Wind Plasma Elements into the Magnetosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1978, vol. 40, pp. 331.
15. Wing S., Sibeck D.G. Effects of Interplanetary Magnetic Field Z Component and the Solar Wind Dynamic Pressure on the Geosynchronous Magnetic Field. *Journal of Geophysical Research*, 1997, vol. 102, no. A4, pp. 7207–7216. DOI: 10.1029/97JA00150.
16. Kane R.P. Interplanetary and Geomagnetic Parameters During January 16–26, 2005. *Planetary and Space Science*, 2012, vol. 62, pp. 97–99.
17. Burlaga L.F., Lazarus A.J. Lognormal Distributions and Spectra of Solar Wind Plasma Fluctuations: Wind 1995–1998. *Journal of Geophysical Research*, 2000, vol. 105, no. A2, pp. 2357–2364. DOI: 10.1029/1999JA900442.
18. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Veselovsky I.S. Statistical Characteristics of the Heliospheric Plasma and Magnetic Field at the Earth's Orbit during Four Solar Cycles 20–23. In Johanson H.E. (ed.). *Handbook on Solar Wind: Effects, Dynamics and Interactions*. Ch. 2. New York, 2009, pp. 81–144.
19. Pulkkinen T.I., Tanskanen E.I., Viljanen A., Partamies N., Kauristie K. Auroral Electrojets during Deep Solar Minimum at the End of Solar Cycle 23. *Journal of Geophysical Research*, 2011, vol. 116, no. A04207. DOI: 10.1029/2010JA016098.
20. Zhiromskij B.V. Spectra of Variations of the Bz-Components of the MMP in High-Speed Solar Wind Flows and the Intensity of Polar Magnetic Disturbances. In *Magnetospheric Studies*. Moscow, 1982, vol. 1, pp. 29–31. (In Russian).

21. Echer E., Tsurutani B. T., Gonzalez W. D. Interplanetary Origins of Moderate ($-100 \text{ nT} < \text{Dst} \leq -50 \text{ nT}$) Geomagnetic Storms during Solar Cycle 23 (1996–2008). *Journal of Geophysical Research*, 2013, vol. 118, pp. 385–392. DOI: 10.1029/2012JA018086.

Информация об авторах

Дегтярев Виталий Иванович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт солнечно-земной физики, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация, degt@iszf.irk.ru, SPIN-код: 9705-3372, Scopus Author ID: 7005883980.

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

Authors

Vitalii I. Degtyarev — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, degt@iszf.irk.ru, SPIN-Code: 9705-3372, Scopus Author ID: 7005883980.

George V. Popov — D.Sc. in Physics and Mathematics, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, popov2898@mail.ru. SPIN-Code: 3979-6755, AuthorID RSCI: 58756.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Для цитирования

Дегтярев В.И. Моделирование геоэффективности солнечного ветра в минимумах солнечной активности / В.И. Дегтярев, Г.В. Попов. — DOI 10.17150/2411-6262.2022.13(1).17. — EDN [IYFNPM](#) // Baikal Research Journal. — 2022. — Т. 13, № 1.

For Citation

Degtyarev V.I., Popov G.V. Modeling the Geoefficiency of Solar Wind in Solar Activity Minima. *Baikal Research Journal*, 2022, vol. 13, no. 1. (In Russian). EDN: [IYFNPM](#). DOI: 10.17150/2411-6262.2022.13(1).17.