

## ГЛОБАЛЬНАЯ ВОЗМУЩЕННОСТЬ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ЕЕ СВЯЗЬ С КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДОЙ

### GLOBAL DISTURBANCE OF EARTH'S MAGNETOSPHERE AND ITS CONNECTION WITH SPACE WEATHER

**Н.А. Куражковская**

*Геофизическая обсерватория «Борок»  
филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Борок, Россия, knady@borok.yar.ru*

**N.A. Kurazhkovskaya**

*Borok Geophysical Observatory, the Branch of Schmidt Institute  
of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,  
Borok, Russia, knady@borok.yar.ru*

**Аннотация.** Исследованы экстремальные состояния глобальной возмущенности магнитосферы: очень спокойное и сильно возмущенное — и их связь с параметрами межпланетной среды. Оценка степени глобальной возмущенности магнитосферы проводилась по месячному и годовому количеству магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней. Выполнено сравнение циклических и сезонных распределений количества магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней и проанализирована их связь с параметрами межпланетной среды с 20-го по 24-й циклы солнечной активности. Показано, что максимальное число магнитно-спокойных дней наблюдается на фазе подъема солнечной активности и в сезон зимнего солнцестояния, а максимальное число магнитно-возмущенных дней — на фазе спада солнечного цикла и в сезон равноденствий. Обнаружено аномальное возрастание числа спокойных дней в 24-м цикле солнечной активности по сравнению с предыдущими циклами. Установлено, что циклическая вариация годового числа спокойных и возмущенных дней определяется поведением и величиной скорости, температуры, динамического давления плазмы солнечного ветра и модулем напряженности межпланетного магнитного поля. Предполагается, что обнаруженный всплеск числа спокойных дней в фазу подъема 24-м солнечного цикла отражает внутренние процессы на Солнце и связанные с ними изменения параметров межпланетной среды. Закономерности циклической и сезонной вариации числа магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней и их связь с параметрами солнечного ветра могут быть использованы для прогноза космической погоды.

**Ключевые слова:** магнитосфера, геомагнитная активность, космическая погода, циклы солнечной активности, магнитно-спокойные и магнитно-возмущенные дни, параметры солнечного ветра.

**Abstract.** This paper deals with extreme conditions of the global magnetosphere disturbance: very quiet and greatly disturbed, and their relationship with interplanetary medium parameters. The degree of global magnetosphere disturbance was estimated from the monthly and annual number of magnetically quiet and magnetically disturbed days. The cyclic and seasonal distributions of magnetically quiet and disturbed days were compared, and their relationship with interplanetary medium parameters in solar cycles 20–24 was analyzed. Magnetically quiet days are shown to be mainly observed at the ascending phase of solar activity and during the winter solstice season. Magnetically disturbed days dominate at the descending phase of the solar cycle and during the equinox season. An anomalously large increase in the number of quiet days was found in solar cycle 24 as compared to previous cycles. It has been established that the cyclic variation in the annual number of quiet and disturbed days is determined by the behavior and magnitude of the speed, temperature, dynamic pressure of solar wind plasma and the interplanetary magnetic field modulus. The detected burst in the number of quiet days during the ascending phase of solar cycle 24 is assumed to reflect internal processes on the Sun and related changes in interplanetary medium parameters. The patterns of cyclical and seasonal variation in the number of magnetically quiet and disturbed days and their relationship with the solar wind parameters can be used to predict space weather.

**Keywords:** magnetosphere, geomagnetic activity, space weather, solar activity cycles, magnetically quiet and magnetically disturbed days, solar wind parameters.

## ВВЕДЕНИЕ

С середины 90-х гг. прошлого столетия многими исследователями начал активно использоваться термин «космическая погода» (space weather), история возникновения которого подробно изложена в работе [Kane, 2006]. Это понятие включает в себя сложный

комплекс условий в околоземном космическом пространстве, связанных с процессами на Солнце и в солнечном ветре (СВ), магнитосфере и ионосфере Земли [Ермолаев, Ермолаев, 2009]. Солнечный ветер, распространяясь от поверхности Солнца, взаимодействует с магнитосферой Земли. Следствием этого взаимодействия являются возмущения магнитосферы,

такие как суббури и магнитные бури, которые и относятся к геомагнитным эффектам космической погоды. В качестве основных агентов, ответственных за развитие магнитных бурь на Земле и влияющих на космическую погоду, рассматривают спорадически возникающие солнечные события — вспышки, корональные выбросы массы (coronal mass ejection, CME). Кроме того, изменение условий в околоземном пространстве может вызываться высокоскоростными рекуррентными потоками (high-speed stream, HSS) из корональных дыр на Солнце и короткими областями взаимодействия быстрого и медленного потоков СВ (corotating interaction regions, CIR) [Borovsky, Denton, 2006; Ермолаев, Ермолаев, 2009]. Для космической погоды характерно чередование спокойных и возмущенных периодов, связанных с проявлением солнечной и геомагнитной активности. Следует отметить, что из-за нестационарности межпланетного магнитного поля и потоков СВ магнитосфера относительно редко бывает в спокойном состоянии.

Наиболее активно исследуется возмущенное состояние магнитосферы, связанное с развитием геомагнитных бурь. Экспериментальные исследования магнитных бурь отражены в многочисленных публикациях, например [Loewe, Prolss, 1997; Zhang et al., 2006; Обридо и др., 2013; Yermolaev et al., 2013; Katus et al., 2015]. Меньше внимания уделяется спокойному состоянию магнитосферы: работы, посвященные его анализу, например [Шевнин, 2003; Ouattara et al., 2009], не так многочисленны, как исследования возмущенного состояния.

Традиционными индикаторами степени возмущенности магнитосферы являются индексы геомагнитной активности, которые позволяют различать ее спокойное или возмущенное состояние и используются для качественной и количественной оценки геомагнитных возмущений как на разных широтах Земли ( $Dst$ ,  $AL$ ,  $AE$ ,  $PC$ ), так и глобальных ( $K_p$ ,  $A_p$ ,  $aa$  и другие) [Ahluwalia, 2000; Ouattara et al., 2009; Nollapp et al., 2014; Tanskanen et al., 2017].

Кроме того, для оценки степени возмущенности магнитосферы используется такая характеристика, как число магнитно-спокойных или магнитно-возмущенных дней [Ouattara et al., 2009; Макаров, 2018]. Число магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней является интегральной характеристикой глобального состояния возмущенности магнитосферы, учитывающей все типы возмущений и адекватно отражающей два экстремальных состояния магнитосферы: очень спокойное и сильно возмущенное. Анализ спокойного или возмущенного состояния магнитосферы проводится как на коротких временных интервалах длительностью от нескольких часов до нескольких дней, так и на интервалах времени, сопоставимых с длительностью одного цикла солнечной активности или превышающих ее. С нашей точки зрения, число магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней является удобной характеристикой спокойного или возмущенного состояния магнитосферы именно на длинных временных интервалах. Исследование закономерностей распределения количества магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней в цикле

солнечной активности представляет интерес также с точки зрения состояния космической погоды на временах, сопоставимых с длительностью солнечного цикла или превышающих ее. Кроме того, подобная статистика может отражать изменение условий на Солнце и в СВ.

Так, в работе [Ouattara et al., 2009] исследована динамика количества спокойных дней в течение более 100 лет. Основным выводом, который следует из этой работы, заключается в том, что с начала геомагнитных наблюдений (1868 г.) прослеживается тенденция к уменьшению количества спокойных дней и, соответственно, к увеличению числа возмущенных дней к концу двадцатого столетия. Исследование динамики числа спокойных и возмущенных дней с максимума 23-го цикла солнечной активности по настоящее время не проводилось, несмотря на то, что глубокий минимум солнечной активности 2008–2009 гг. [Tsurutani et al., 2011] не мог не отразиться на динамике числа спокойных дней в первые десятилетия XXI в. Это делает актуальным исследование закономерностей распределения количества магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней на интервале двух последних десятилетий. Более того, не анализировались параметры межпланетной среды, ответственные за динамику числа магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней в цикле солнечной активности.

Равноденственные максимумы геомагнитной активности известны с начала прошлого века [Cortie, 1912], и для их интерпретации выдвигались различные гипотезы. В публикациях наиболее часто упоминаются три гипотезы. Во-первых, так называемая осевая гипотеза [Cortie, 1912], согласно которой максимальная широта гелиопроекции Земли при ее годовом вращении соответствует сезону равноденствия. Во-вторых «равноденственная» гипотеза [McIntosh, 1959], связывающая максимумы геомагнитной активности в равноденствие с углом наклона между земным магнитным диполем и линией Солнце — Земля. В-третьих, гипотеза, согласно которой полугодовая вариация геомагнитной активности контролируется южной  $B_z$ -компонентой ММП [Russell, McPherron, 1973].

Несмотря на то, что сезонная вариация геомагнитной активности известна давно, закономерности распределения количества магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней в зависимости от сезона практически не отражены в геофизической литературе. Исключение составляет работа [Макаров, 2018], в которой исследовалось сезонное распределение количества магнитно-возмущенных дней со среднесуточным значением геомагнитного индекса  $Dst < -100$  нТл. Согласно работе [Макаров, 2018], сезонное распределение количества сильно возмущенных дней имеет два равноденственных максимума и совпадает с сезонной вариацией сильных геомагнитных бурь. Иными словами, динамика числа магнитно-возмущенных дней в зависимости от сезона аналогична полугодовой вариации геомагнитной активности. Вместе с тем закономерности сезонной вариации числа магнитно-спокойных дней как глобальной характеристики спокойного состояния магнитосферы Земли в литературе не отражены.

Целью данной работы является исследование циклических и сезонных вариаций глобальной возмущенности магнитосферы Земли с 20-го по 24-го циклы солнечной активности на основе анализа закономерностей распределения количества магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней и их связи с параметрами СВ и межпланетного магнитного поля (ММП).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе анализировался временной интервал с 1964 по 2018 г., охватывающий 20–24-й циклы солнечной активности. Рассматривались два экстремальных состояния магнитосферы: очень спокойное и сильно возмущенное. Оценка степени глобальной возмущенности магнитосферы проводилась по месячному и годовому количеству магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней. Для идентификации магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней использовались трехчасовые значения планетарного  $K_p$ -индекса, полученные из Мирового центра данных в Киото [<http://wcd.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>].  $K_p$ -индекс, как известно, характеризует глобальную возмущенность магнитного поля Земли и отражает вклад возмущений всех типов. Заметим, что данные по  $K_p$ -индексу, кроме значений в трехчасовых интервалах времени, включают еще сумму  $K_p$ -индекса ( $\Sigma K_p$ ) за каждые сутки. Сумма  $K_p$ -индекса изменяется в широком диапазоне (от 0 до 60 и более). С нашей точки зрения, именно суммой  $K_p$ -индекса за каждые сутки удобно пользоваться при подсчете числа магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней. При формировании списка магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней использовался следующий критерий: дни рассматривались как очень спокойные, если  $\Sigma K_p$  за сутки составляет  $\sim 0-5$ , и как сильно возмущенные, если  $\Sigma K_p$  за сутки  $> 25$ . Было подсчитано количество очень спокойных и сильно возмущенных дней за каждый месяц и затем за год. Таким образом, за анализируемый временной интервал (55 лет) была составлена выборка из 1752 магнитно-спокойных и 4005 магнитно-возмущенных дней. Умеренно-возмущенные дни оставались за рамками исследования.

Среднегодовые значения чисел Вольфа (отражающих число пятен и групп пятен на Солнце), основных параметров СВ и ММП получены из их 27-дневных средних значений, представленных в базе данных OMNI [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>] за этот же интервал времени. Годовое количество бурь с внезапным и постепенным началом оценивалось по каталогам геомагнитных бурь, полученным с сайтов Мирового центра данных по солнечно-земной физике (Россия) [[http://www.wdcb.ru/stp/data/storms/magnetic\\_storms/](http://www.wdcb.ru/stp/data/storms/magnetic_storms/)] и Kakioka Magnetic Observatory (Япония) [<http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/data-viewer/>].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Динамика числа магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней в цикле солнечной активности

На рис. 1 представлены вариация среднегодовых чисел Вольфа ( $W$ ) и распределение годового числа

магнитно-спокойных ( $N_q$ ) и магнитно-возмущенных ( $N_d$ ) дней за пять последних циклов солнечной активности (20–24-й циклы). Кроме того, в табл. 1 приведены среднегодовые оценки числа магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней, а также максимальное число тех и других дней за каждый цикл солнечной активности. Из рис. 1 видно, что для вариации числа как спокойных (рис. 1, *a*), так и возмущенных (рис. 1, *б*) дней характерно циклическое поведение. Динамика числа спокойных и возмущенных дней не совпадает с динамикой числа солнечных пятен. Однако и для магнитно-спокойных, и магнитно-возмущенных дней типично наиболее частое наблюдение на определенных фазах циклов солнечной активности. Эта закономерность свидетельствует о циклическом характере  $N_q$  и  $N_d$ . Так, максимум  $N_q$  в каждом солнечном цикле приходится на фазу подъема солнечной активности и существенно больше среднегодового числа спокойных дней (табл. 1). Обращает на себя внимание аномально большой рост числа магнитно-спокойных дней в 24-м цикле солнечной активности по сравнению с другими циклами. Так, например, количество очень спокойных дней в 24-м цикле солнечной активности увеличилось более чем в три раза по сравнению с 23-м циклом и примерно на порядок по сравнению с 21-м и 22-м циклами. На наш взгляд, такой скачок числа очень спокойных дней в 24-м цикле является необычным, поскольку в солнечной активности, характеризуемой числами Вольфа, подобной тенденции не наблюдалось. Максимум чисел Вольфа на анализируемом временном интервале изменяется от цикла к циклу не более чем в 1.5–2 раза.

Вариации числа спокойных дней в цикле солнечной активности отличаются от вариаций числа возмущенных дней. Из рис. 1, *б* видно, что распределение количества возмущенных дней в каждом цикле характеризуется наличием двух максимумов: первый, как правило меньший по величине, наблюдается на фазе подъема солнечной активности, второй, существенно больший, — на фазе спада солнечной активности. Этот максимум значительно превышает среднегодовое число магнитно-возмущенных дней в каждом цикле (табл. 1). Таким образом, количество возмущенных дней существенно больше на фазе спада солнечной активности, чем на фазе подъема, и эта тенденция

Таблица 1

Среднегодовое и максимальное число магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней в 20–24-м циклах солнечной активности

| Номер цикла | Среднегодовое $N_q$ за цикл | Максимальное $N_q$ за цикл | Среднегодовое $N_d$ за цикл | Максимальное $N_d$ за цикл |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 20          | 25.8±4.3                    | 60                         | 69.5±10.8                   | 164                        |
| 21          | 8.2±1.2                     | 14                         | 100±12.0                    | 169                        |
| 22          | 11.6±2.2                    | 17                         | 99.5±12.1                   | 157                        |
| 23          | 41.3±9.1                    | 49                         | 65.6±11.8                   | 173                        |
| 24          | 72.3±11.8                   | 155                        | 31.9±6.7                    | 62                         |

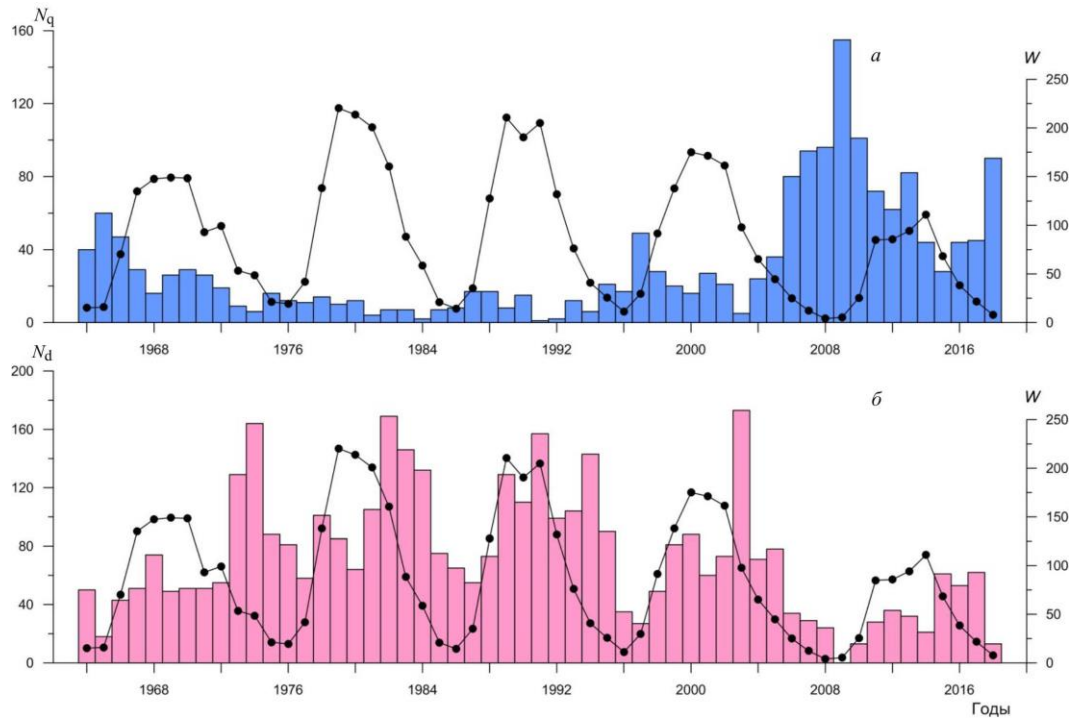


Рис. 1. Распределения годового числа магнитно-спокойных ( $N_q$ , а) и магнитно-возмущенных ( $N_d$ , б) дней, а также вариация среднегодовых чисел Вольфа ( $W$ , темные кружки) в 20–24-м циклах солнечной активности

типична для каждого цикла солнечной активности. Из табл. 1 видно, что максимальное значение  $N_d$ , наблюдаемое на фазе спада солнечного цикла, значительно больше среднегодового числа магнитно-возмущенных дней в каждом цикле примерно в 1.6–2.6 раза. Последнее свидетельствует о том, что максимум числа магнитно-возмущенных дней на фазе спада солнечного цикла не является случайным. Кроме того, прослеживается явная тенденция к снижению количества возмущенных дней в 24-м цикле по сравнению с предыдущими циклами примерно в 2–2.5 раза.

**Сезонная вариация числа магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней**

На рис. 2 показаны распределения количества магнитно-спокойных (а) и магнитно-возмущенных (б) дней в зависимости от сезона за 1964–2018 гг. На этом же рисунке даны сезонные вариации среднего числа спокойных ( $N_{qmean}$ ) и возмущенных ( $N_{dmean}$ ) дней для каждого месяца и показаны стандартные ошибки средних значений. Как видно из рис. 2, а, в сезонном ходе  $N_q$  выделяются максимум в зимний сезон (декабрь) и минимум в летнее солнцестояние (июнь). Аналогичная сезонная закономерность характерна и для  $N_{qmean}$ . Среднее число магнитно-спокойных дней в декабре в более чем два раза превышает их среднее число в июне и, как видно из рис. 2, а, это различие статистически значимо. Надо отметить, что сезонное распределение количества спокойных дней принципиально отличается от аналогичного распределения числа возмущенных дней, для которого характерны два равноденственных максимума (рис. 2, б). Для вариации  $N_{dmean}$  в зависимости от сезона также характерны весенний (март) и осенний

(сентябрь) максимумы. Минимальное число магнитно-возмущенных дней наблюдается летом (июнь). Различие между равноденственными максимумами и летним минимумом в сезонной вариации  $N_{dmean}$  статис-

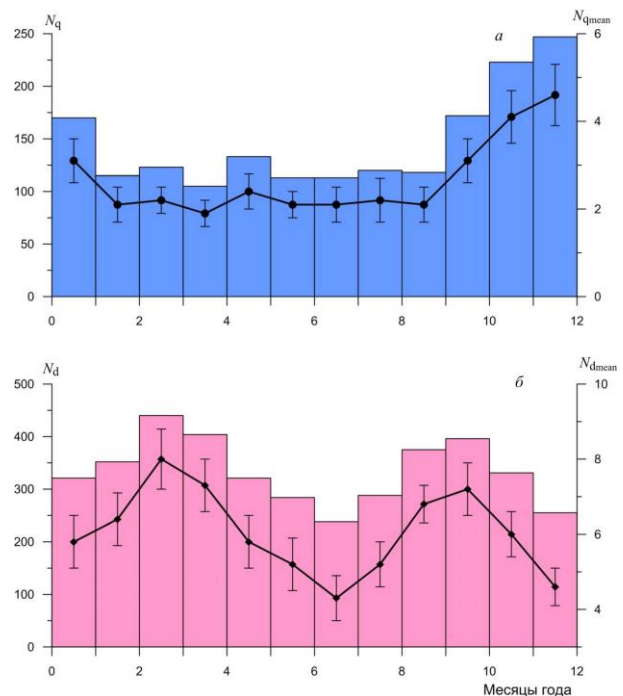


Рис. 2. Зависимость от сезона в 1964–2018 гг. числа магнитно-спокойных ( $N_q$ , а) и магнитно-возмущенных ( $N_d$ , б) дней. Сезонные вариации среднего числа спокойных ( $N_{qmean}$ ) и возмущенных ( $N_{dmean}$ ) дней для каждого месяца показаны кружками и ромбами соответственно. Вертикальными линиями обозначены стандартные ошибки средних значений



тически значимо (рис. 2, б). Полученная нами сезонная зависимость количества возмущенных дней совпадает с аналогичной зависимостью, представленной в работе [Макаров, 2018].

### Связь числа магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней с долговременной вариацией параметров СВ и ММП

Возмущенное состояние магнитосферы обычно связывают с экстремальными условиями в СВ. Представляется интересным поиск корреляционной связи между параметрами СВ, ММП и числом спокойных (возмущенных) дней на длительных интервалах времени. С этой целью было проведено сопоставление среднегодовых значений параметров СВ и ММП с годовым количеством спокойных/возмущенных дней. Рассматривались все основные параметры межпланетной среды и комбинации параметров (в солнечно-эклиптической системе координат): скорость СВ  $V$ ; концентрация  $N$  и температура  $T$  протонов; динамическое давление СВ  $P_{\text{dyn}} = \rho V^2$  ( $\rho$  — плотность плазмы);  $B_x$ -,  $B_y$ -,  $B_z$ -компоненты ММП; модуль напряженности ММП  $\mathbf{B}$ ; широта ММП  $\theta$  (угол между вектором  $\mathbf{B}$  и его проекцией на плоскость эклиптики); долготы ММП  $\varphi$  (угол между проекцией вектора  $\mathbf{B}$  на плоскость эклиптики и  $B_x$ -компонентой ММП);  $E_y$ -компонента электрического поля СВ ( $E_y = -VB_z$ ); параметр  $\beta$ , характеризующий отношение теплового давления к магнитному ( $\beta = NkT/(B^2/8\pi)$ , где  $k$  — постоянная Больцмана); альфвеновское число Маха ( $M_a = VN^{1/2}/20B$ ). Между полученными рядами среднегодовых значений параметров межпланетной среды и годовым числом спокойных и возмущенных дней подсчитывались коэффициенты корреляции  $r$ , приведенные в табл. 2. Кроме того, рассчитывался коэффициент корреляции между числами Вольфа  $W$  и числом спокойных (возмущенных) дней (табл. 2).

Сразу отметим, что коэффициенты корреляции между  $N_q$  и  $W$  ( $r = -0.44$ ), а также между  $N_d$  и  $W$  ( $r = 0.37$ ) оказались относительно низкими, что свидетельствует об отсутствии значимой связи между

количеством магнитно-спокойных (магнитно-возмущенных) дней и числами Вольфа. Из анализа таблицы следует, что наиболее высокие коэффициенты корреляции отмечаются между числом спокойных (возмущенных) дней и параметрами плазмы СВ, такими как скорость, температура и динамическое давление. Судя по коэффициентам корреляции между  $N_q$  и  $V$  ( $r = -0.51$ ),  $N_q$  и  $T$  ( $r = -0.64$ ), а также между  $N_d$  и  $V$  ( $r = 0.78$ ),  $N_d$  и  $T$  ( $r = 0.89$ ) (табл. 2), связь между этими рядами данных статистически значима. Высоки также коэффициенты корреляции между числом спокойных (возмущенных) дней и динамическим давлением СВ ( $r = -0.76$  и  $r = -0.80$  соответственно). Довольно высокая корреляция отмечается между числом спокойных (возмущенных) дней и модулем напряженности ММП ( $r = -0.75$  и  $r = 0.76$ ). Следовательно, связь  $N_d$  и  $N_q$  с  $P_{\text{dyn}}$  и  $\mathbf{B}$  статистически достоверна (табл. 2). Заметим, что коэффициенты корреляции вышеперечисленных параметров с числом возмущенных дней несколько выше, чем с числом спокойных дней.

Низкие коэффициенты корреляции ( $r \sim 0$ ) числа спокойных (возмущенных) дней с  $B_x$ -,  $B_y$ -,  $B_z$ -компонентами ММП и углами  $\theta$  и  $\varphi$ , определяющими ориентацию вектора ММП, явно указывают на отсутствие связи. Низкая корреляция наблюдается также между числом спокойных (возмущенных) дней и концентрацией  $N$  протонов солнечного ветра. Коэффициенты корреляции между некоторыми комбинациями параметров ( $E_y$ ,  $\beta$ ,  $M_a$ ), полученными из основных параметров СВ, и числом спокойных (возмущенных) дней также малы и статистически незначимы. Следовательно, параметры  $N$ ,  $E_y$ ,  $\beta$ ,  $M_a$  не оказывают влияния на число спокойных и возмущенных дней. Характерно, что число спокойных (возмущенных) дней лучше коррелирует с основными параметрами ( $V$ ,  $T$ ,  $\mathbf{B}$ ) СВ и ММП, чем с их производными параметрами ( $E_y$ ,  $\beta$ ,  $M_a$ ).

Мы не будем приводить динамику всех параметров СВ, с которыми проводился корреляционный анализ числа спокойных (возмущенных) дней. В качестве примеров сопоставим вариацию  $N_q$  и  $N_d$  с поведением  $V$ ,  $T$ ,  $P_{\text{dyn}}$  и  $\mathbf{B}$  во время последних пяти солнечных циклов. На рис. 3 приведены вариации годового числа спокойных (а) и возмущенных (б) дней, а также среднегодовые вариации параметров  $V$  (в),  $T$  (г),  $P_{\text{dyn}}$  (д) и  $\mathbf{B}$  (е). Четко видно противофазное поведение годового числа спокойных дней и параметров  $V$ ,  $T$ ,  $P_{\text{dyn}}$  и  $\mathbf{B}$ . Вместе с тем годовое число возмущенных дней изменяется синфазно с этими параметрами. Как отмечалось выше, между числом спокойных (возмущенных) дней и указанными параметрами имеются довольно высокие коэффициенты корреляции, что свидетельствует о том, что связь  $N_q$  и  $N_d$  с этими параметрами не является случайной. Наиболее сильно эффект влияния этих параметров на вариацию числа спокойных (возмущенных) дней виден при переходе от 23-го к 24-му циклу солнечной активности. Например, уменьшение  $P_{\text{dyn}}$  с 2003 по 2009 г. на 54 % и уменьшение  $\mathbf{B}$  за этот же временной интервал всего на 21 % приводит к увеличению числа спокойных дней более чем в 30 раз. Таким образом, уменьшение скорости, температуры,

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между числом магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней и параметрами плазмы СВ и ММП

| Параметры              | $N_q$ | $N_d$ |
|------------------------|-------|-------|
| $W$                    | -0.44 | 0.37  |
| $V$ , км/с             | -0.51 | 0.78  |
| $N$ , см <sup>-3</sup> | -0.48 | 0.30  |
| $T$ , К                | -0.64 | 0.89  |
| $P_{\text{dyn}}$ , нПа | -0.76 | 0.80  |
| $B_x$ , нТл            | 0.09  | -0.02 |
| $B_y$ , нТл            | -0.17 | 0.08  |
| $B_z$ , нТл            | -0.23 | 0.25  |
| $\mathbf{B}$ , нТл     | -0.75 | 0.76  |
| $\theta$ , градус      | -0.15 | 0.09  |
| $\varphi$ , градус     | 0.15  | -0.11 |
| $E_y$ , мВ/м           | 0.07  | -0.12 |
| $\beta$                | 0.47  | -0.46 |
| $M_a$                  | 0.46  | -0.41 |

динамического давления плазмы СВ и модуля напряженности ММП обеспечивает наиболее спокойное состояние магнитосферы. И наоборот, рост  $V$ ,  $T$ ,  $P_{\text{dyn}}$  и  $\mathbf{B}$  приводит к возмущенному состоянию магнитосферы и, соответственно, к увеличению числа магнитно-возмущенных дней. Это подтверждают и относительно высокие коэффициенты корреляции между числом возмущенных дней и  $V$ ,  $T$ ,  $P_{\text{dyn}}$  и  $\mathbf{B}$  (табл. 2).

Таким образом, судя по величине коэффициентов корреляции, циклическая вариация годового числа спокойных и возмущенных дней определяется долговременной динамикой и величиной параметров плазмы СВ ( $V$ ,  $T$ ,  $P_{\text{dyn}}$ ) и модулем напряженности  $\mathbf{B}$ . Ориентация вектора ММП, характеризуемая углами  $\theta$  и  $\varphi$ , величины его  $B_x$ -,  $B_y$ -,  $B_z$ -компонент, плотность протонов  $N$  и комбинации параметров СВ и ММП ( $E_y$ ,  $\beta$ ,  $M_a$ ) не влияют или слабо влияют на долговременную вариацию числа спокойных и возмущенных дней.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В предыдущих разделах нами были проанализированы циклические и сезонные закономерности двух экстремальных состояний возмущенности магнитосферы — очень спокойного и сильно возмущенного. В качестве характеристики глобальной возмущенности магнитосферы использовалось число магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней. С нашей точки зрения, долговременные вариации количества спокойных и возмущенных дней отражают состояние космической погоды за последние пять циклов солнечной активности. Были также выявлены факторы межпланетной среды, контролирующие эти состояния на интервалах времени, превышающих длительность цикла солнечной активности.

В результате проведенного исследования показано, что динамика числа спокойных и возмущенных дней существенно различается в зависимости от фазы солнечных циклов и сезона. Так, максимальное количество магнитно-спокойных дней преимущественно наблюдается на фазе подъема солнечной активности и в сезон зимнего солнцестояния. Наибольшее число магнитно-возмущенных дней отмечается на фазе спада солнечного цикла и в сезон равноденствий. Следует заметить, что полученная циклическая динамика числа спокойных (возмущенных) дней не противоречит известным циклическим закономерностям как солнечной, так и магнитосферной активности. В отличие от работы [Ouattara et al., 2009], в которой отмечалась тенденция к уменьшению количества спокойных дней и увеличению числа возмущенных дней к концу двадцатого столетия, в настоящей работе выявлен циклический характер динамики числа магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней. Более того, обнаружен аномальный рост числа очень спокойных дней в 24-м цикле солнечной активности по сравнению с предыдущими циклами.

Довольно хорошая корреляция годового числа спокойных (возмущенных) дней с параметрами  $V$ ,  $T$ ,

$P_{\text{dyn}}$  свидетельствует о том, что состояние космической погоды определяется характеристиками плазмы СВ. Одним из наиболее важных факторов, определяющих циклическую вариацию числа спокойных (возмущенных) дней, видимо, является скорость СВ, которая находится в хорошем соответствии с температурой протонов и динамическим давлением [Веселовский и др., 1998]. Причем максимальные среднегодовые значения этих параметров приходятся на фазу спада солнечной активности, когда Земля оказывается подвержена воздействию высокоскоростных горячих потоков из полярных корональных дыр. Именно на фазе спада солнечной активности наблюдается наибольшее количество возмущенных дней (рис. 1, б). Минимальные среднегодовые значения параметров  $V$ ,  $T$ ,  $P_{\text{dyn}}$  наблюдаются на фазе роста солнечных циклов, что совпадает с динамикой числа спокойных дней (рис. 1, а).

Наряду со скоростью и динамическим давлением, к геоэффективным параметрам относится  $B_z$ -компонента ММП. Однако неожиданным оказалось отсутствие связи динамики числа магнитно-возмущенных и магнитно-спокойных дней с вариацией  $B_z$ -компоненты ММП в цикле солнечной активности, на что указывают низкие коэффициенты корреляции между  $N_d$ ,  $N_q$  и  $B_z$  (табл. 2). Ранее в работе [Papitashvili et al., 2000] было показано, что между  $B_z$ -компонентой ММП и индексом геомагнитной активности  $K_p$ , независимо от знака  $B_z$ , корреляция очень слаба ( $r < 0.5$ ). Видимо, это влияет и на корреляционные связи между числом магнитно-возмущенных (магнитно-спокойных) дней и  $B_z$ -компонентой ММП. Кроме того, геоэффективность  $B_z$ -компоненты ММП существенно зависит от продолжительности существования и величины южной  $B_z$  ( $B_s$ ) [Zhang, Moldwin, 2014]. Так, экстремальные события  $B_s$  продолжительностью  $> 3$  ч и величиной  $< -10$  нТл не всегда являются источником геомагнитных бурь. Более того, в работе [Zhang, Moldwin, 2014] отмечается, что интегрированная продолжительность и число событий  $B_s$  связаны с числом солнечных пятен только при  $B_z < -5$  нТл. Иными словами, в динамике  $B_z$ -компоненты не прослеживается циклическости, характерной, например, для скорости СВ или модуля напряженности ММП, поэтому отсутствие связи между динамикой  $N_d$ ,  $N_q$  и  $B_z$ -компонентой на интервалах времени, превышающих длительность цикла солнечной активности, вполне закономерно.

Сезонные вариации числа спокойных (возмущенных) дней, вероятно, связаны также с сезонной зависимостью геоэффективных параметров СВ. Так, в работе [Нусинов и др., 2015] в результате анализа частотных распределений часовых значений скорости СВ,  $B_z$ -событий и СМЕ для сезонов года в 23-м цикле солнечной активности показано, что высокоскоростные потоки СВ со скоростью  $V > 500$  км/с наблюдаются чаще летом, чем зимой и в равноденствии. Для распределения  $B_z$ -событий, помимо двух равноденственных максимумов, характерен еще и летний максимум. Кроме того, корональные выбросы массы в СВ наиболее часто наблюдаются в период летнего солнцестояния [Нусинов и др., 2015].

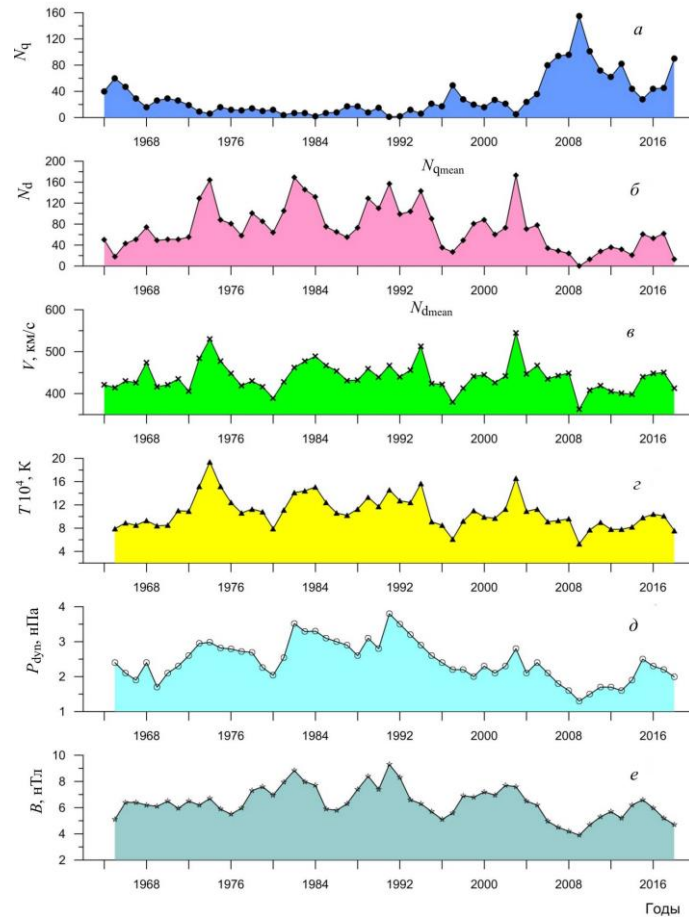


Рис. 3. Вариации годового числа магнитно-спокойных ( $N_q$ , а) и магнитно-возмущенных ( $N_d$ , б) дней, а также среднегодовые вариации параметров плазмы и ММП  $V$  (в),  $T$  (з),  $P_{\text{dyn}}$  (д) и  $B$  (е) в 20–24-м циклах солнечной активности

Одной из разновидностей СМЕ являются магнитные облака [Burlaga et al., 1981], которые приводят к развитию магнитных бурь различной интенсивности и оказывают существенное влияние на сезонную вариацию геомагнитной активности. Геоэффективность магнитных облаков зависит от их ориентации в пространстве, а именно от угла наклона их оси к плоскости эклиптики [Бархатов и др., 2014]. Так, в периоды равноденствия геомагнитная активность увеличивается за счет большого числа магнитных облаков с небольшими углами наклона их оси к плоскости эклиптики. В периоды солнцестояний такие магнитные облака не геоэффективны [Бархатов и др., 2014]. Следовательно, в равноденственные максимумы числа магнитно-возмущенных дней, наряду с прочими геоэффективными структурами СВ, вносят вклад и магнитные облака определенной конфигурации. Исходя из результатов работы [Нусинов и др., 2015], в которой получено подтверждение существования равноденственного и летнего максимумов, можно предположить, что геоэффективность потоков СВ в зимний сезон меньше, чем летом и в равноденствие. Вероятность наблюдения магнитно-спокойных дней зимой может существенно возрастать. В связи с этим становится понятным факт наблюдения максимума числа спокойных дней в зимний сезон (рис. 2, а). Таким образом, впервые обнаруженный в работе [Нусинов и др., 2015] ста-

тистически значимый летний максимум геомагнитной активности никоим образом не проявляется в зависимости числа магнитно-возмущенных дней от сезона (рис. 2, б), а, скорее, совпадает с минимумом числа спокойных дней в летнее солнцестояние (рис. 2, а).

Равноденственные максимумы числа возмущенных дней (рис. 2, б), безусловно, отражают сезонную вариацию скорости СВ, количества  $B_z$ -событий и геомагнитных бурь [Zhang et al., 2006; Vijaya Lekshmi et al., 2011; Нусинов и др., 2015]. Наличие двух равноденственных максимумов в сезонной вариации числа магнитно-возмущенных дней может быть объяснено любой из известных гипотез или их сочетанием, например [Cortie, 1912; McIntosh, 1959; Russell, McPherron, 1973].

В работе [Reeves et al., 2013], в которой анализировалась долговременная вариация скорости СВ, отмечено, что годы с высокой средней скоростью СВ включают больше дней с высокой скоростью и меньше дней с низкой скоростью. Действительно, если среднегодовая скорость СВ влияет на годовое количество спокойных (возмущенных) дней, то в годы с высокой средней скоростью должно наблюдаться больше возмущенных и меньше спокойных дней. Например, из рис. 3, в видно, что 1994-й и 2003-й — годы с высокой среднегодовой скоростью СВ ( $V > 500$  км/с). В эти годы наблюдается больше возмущенных (143 и 173 соответственно), чем спо-



койных (6 и 5 соответственно) дней. Годы 1997-й и 2009-й характеризуются низкой среднегодовой скоростью СВ ( $V < 400$  км/с). Для этих лет типично больше спокойных (49 и 155 соответственно) и меньше возмущенных (27 и 0 соответственно) дней. Следуя работе [Reeves et al., 2013], можно заметить, что именно годовое количество дней с высокой или низкой скоростью СВ определяет долговременную тенденцию числа спокойных (возмущенных) дней.

Геомагнитные бури являются одним из главных факторов космической погоды. В зависимости от источника на Солнце и в СВ, различают бури с внезапным или постепенным началом. Согласно [Обридко и др., 2013], бури с внезапным началом вызываются СМЕ. Источником бурь с постепенным началом являются высокоскоростные потоки солнечного ветра, истекающие из корональных дыр, — HSS. СМЕ и HSS, которые являются причиной глобальных возмущений магнитосферы, влияют на интенсивность и продолжительность геомагнитных бурь [Hutchinson et al., 2011]. На фазе подъема и в максимуме солнечной активности доминируют потоки СМЕ, на фазе спада солнечного цикла геомагнитная активность определяется преимущественно HSS [Holarra et al., 2014]. Исходя из этого, можно предположить, что первый, небольшой максимум в вариации числа возмущенных дней на фазе роста солнечного цикла (рис. 1, б) связан с СМЕ, а второй, значительно больший по величине максимум  $N_d$  на фазе спада солнечного цикла обусловлен HSS.

Это предположение подтверждается сравнением годового числа спокойных (возмущенных) дней с количеством магнитных бурь с внезапным и постепенным началом в цикле солнечной активности. На рис. 4 приведены распределение чисел Вольфа ( $a$ ), динамика  $N_q$  ( $b$ ) и  $N_d$  ( $в$ ), а также вариация количества геомагнитных бурь двух вышеуказанных типов ( $г$ ). Число геомагнитных бурь за 1964–2010 гг. выбиралось из [http://www.wdcb.ru/stp/data/storms/magnetic\_storms/] каталога, после 2010 г. был использован [http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/data-viewer/] каталог. Статистика бурь включала все бури независимо от интенсивности, селекция была только по характеру начала (внезапное или постепенное). Из рис. 4,  $в$ ,  $г$  видно, что практически в каждом солнечном цикле первые небольшие максимумы в вариации числа возмущенных дней соответствуют максимумам числа бурь с внезапным началом. В то же время вторые максимумы числа возмущенных дней в каждом цикле лучше совпадают с максимумами бурь с постепенным началом.

Из результата корреляционного анализа следует, что долговременные вариации как  $N_q$ , так и  $N_d$  лучше соответствуют количеству бурь с постепенным началом. Коэффициенты корреляции между  $N_q$ ,  $N_d$  и  $N_{storm}$  с постепенным началом составляют  $-0.50$  и  $0.70$  соответственно. Вместе с тем коэффициенты корреляции между  $N_q$ ,  $N_d$  и  $N_{storm}$  с внезапным началом существенно меньше:  $-0.37$  и  $0.35$  соответственно. Этот факт также свидетельствует о том, что динамика годового числа спокойных (возмущенных) дней определяется в основном именно рекуррентными

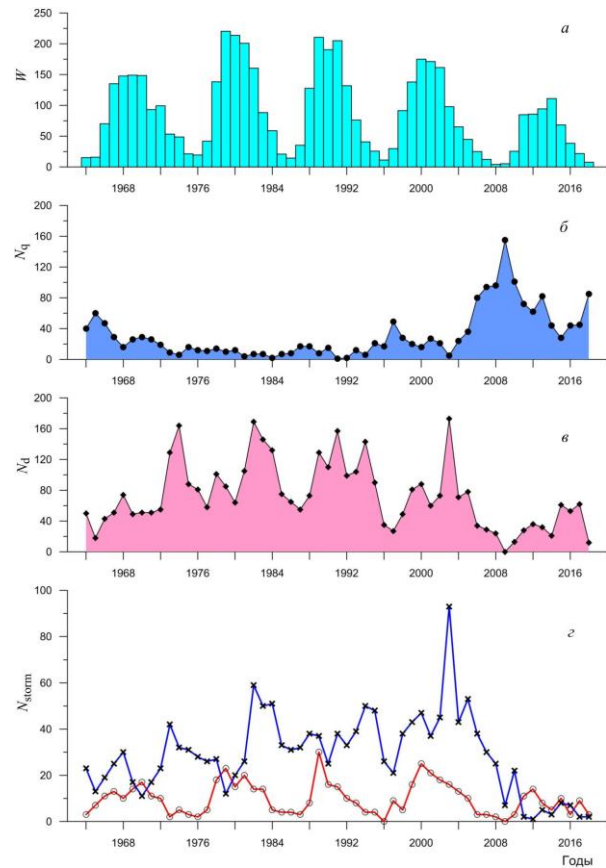


Рис. 4. Распределение чисел Вольфа  $W$  ( $a$ ) и вариации годового числа магнитно-спокойных ( $N_q$ ,  $б$ ) и магнитно-возмущенных ( $N_d$ ,  $в$ ) дней, а также количества геомагнитных бурь ( $N_{storm}$ ,  $г$ ). Бури с внезапным и постепенным началом обозначены светлыми кружками и крестиками соответственно

высокоскоростными потоками СВ из корональных дыр. Более того, за анализируемый период, как следует из каталогов, число бурь с постепенным началом (связанных с корональными дырами) примерно в три раза больше, чем количество бурь с внезапным началом (обусловленных вспышками и СМЕ). Следовательно, основной вклад в степень возмущенности магнитосферы на фазе спада солнечной активности вносят рекуррентные HSS. Поэтому количество магнитно-возмущенных дней доминирует на фазе спада солнечных циклов по сравнению с фазой роста. Тот факт, что число спокойных дней больше на фазе роста солнечной активности, свидетельствует о том, что на этой фазе существенно меньше вклад HSS в геомагнитную активность и значительно меньше магнитных бурь с постепенным началом.

Следует заметить, что к геомагнитным эффектам космической погоды относят также суббури, которые вносят вклад в глобальную возмущенность магнитосферы. Согласно статистическим исследованиям суббурь, например [Newell et al., 2013, 2016; Chu et al., 2015], максимальное количество суббурь наблюдается на фазе спада солнечной активности и в сезон равноденствия. Одним из основных параметров межпланетной среды, определяющих появление суббуревой активности, является скорость СВ, с ростом которой вероятность возникновения



суббурь возрастает [Newell et al., 2016]. По терминологии работы [Дэспирак и др., 2019], «расширенные суббури», являющиеся аналогом классических суббурь, преимущественно наблюдаются во время HSS [Дэспирак и др., 2019]. Таким образом, циклические и сезонные закономерности суббурь, вследствие их связи с высокоскоростными потоками СВ, во многом совпадают со статистикой геомагнитных бурь.

Кроме параметров плазмы СВ на циклическую вариацию числа спокойных (возмущенных) дней оказывает существенное влияние величина и динамика модуля напряженности ММП (рис. 3, е). Заметим, что начиная с 1998 г. (23-й цикл) наблюдается тенденция к уменьшению напряженности магнитного поля солнечных пятен [Penn, Livingston, 2010], которая продолжается и в 24-м цикле солнечной активности. Следствием низкого солнечного магнитного поля является уменьшение ММП. Сочетание низкой скорости СВ (и, следовательно, слабого динамического давления) с низким модулем напряженности ММП и слабыми вариациями  $V_z$ -компоненты ММП [Tsurutani et al., 2011], вероятно, и приводит к аномальному увеличению количества спокойных дней в 24-м цикле солнечной активности по сравнению с предыдущими циклами.

Подтверждением того факта, что к аномальному увеличению числа магнитно-спокойных дней могло привести значительное уменьшение модуля напряженности ММП и динамического давления СВ (как комбинации скорости и концентрации плазмы СВ), является рис. 5, на котором показана зависимость годового числа магнитно-спокойных дней от среднегодовых значений  $V$  и  $P_{\text{dyn}}$ . Видно, что уменьшение средних значений как  $V$ , так и  $P_{\text{dyn}}$  приводит к росту годового числа магнитно-спокойных дней. Данные зависимости наилучшим образом аппроксимируются экспоненциальными функциями с достаточно высокими коэффициентами корреляции, что свидетельствует о нелинейном характере воздействия межпланетной среды на глобальное состояние возмущенности магнитосферы.

Как отмечалось выше, корреляция количества спокойных (возмущенных) дней с числами Вольфа отсутствует. Можно предположить, что основную роль в увеличении количества спокойных дней в 24-м цикле солнечной активности играет не число солнечных пятен и групп пятен, а уменьшение напряженности их магнитного поля со временем [Penn, Livingston, 2010]. Не исключено, что процессы, происходящие внутри Солнца [McIntosh et al., 2019], также приводят к снижению солнечной активности и дают наблюдаемый эффект роста числа спокойных дней. В свою очередь, имеющая место тенденция к уменьшению солнечной и геомагнитной активности с 19-го по 24-й цикл может быть связана с приближением минимума 200-летнего цикла солнечной активности (2050–2060 гг.) [Гвишиани и др., 2015]. Таким образом, статистика магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней, отслеживающая изменение величин параметров СВ и ММП и, следовательно, состояние процессов на Солнце, может быть использована для прогноза космической погоды.

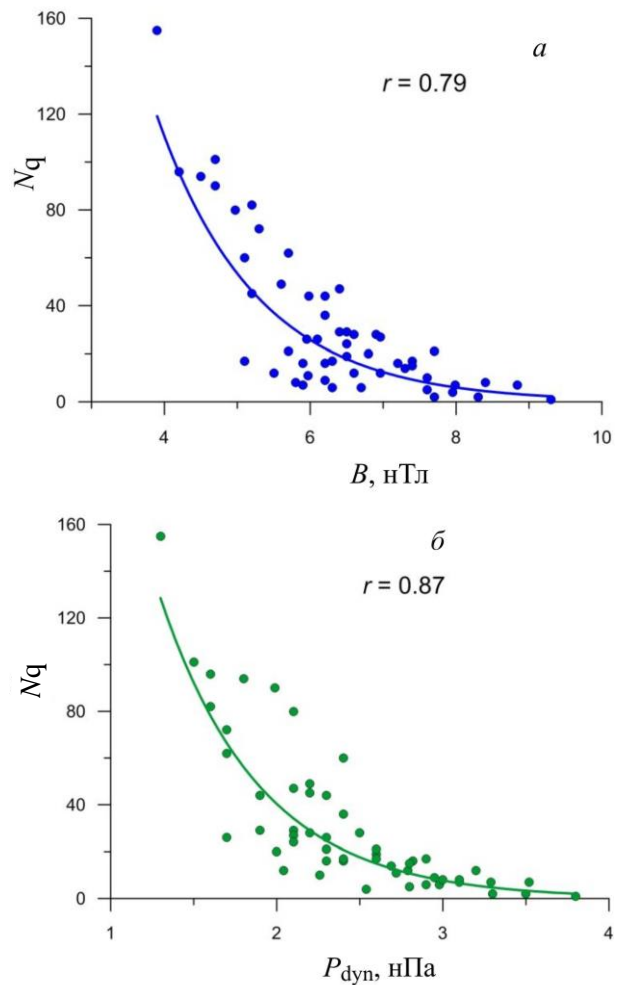


Рис. 5. Зависимость годового числа магнитно-спокойных дней от среднегодовых значений модуля напряженности ММП (а) и динамического давления СВ (б)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в качестве характеристики экстремальных состояний глобальной возмущенности магнитосферы (очень спокойное и сильно возмущенное) на временах, сопоставимых с 11-летним солнечным циклом или превышающих его, можно рассматривать число магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней. Динамика числа магнитно-спокойных и магнитно-возмущенных дней зависит от фазы цикла солнечной активности, сезона и состояния космической погоды. Максимальное число магнитно-спокойных дней преимущественно наблюдается на фазе подъема солнечной активности и в период зимнего солнцестояния. Максимальное число магнитно-возмущенных дней отмечается на фазе спада солнечного цикла и в периоды равноденствий. Обнаружен аномально большой рост числа магнитно-спокойных дней в 24-м цикле солнечной активности по сравнению с предыдущими циклами. Показано, что вариация годового числа спокойных (возмущенных) дней в цикле солнечной активности определяется поведением и величиной скорости, температуры, динамического давления плазмы СВ и модулем напряженности ММП. Обнаруженные закономерности долговременной вариации числа спокойных (возму-

щенных) дней и их связь с параметрами СВ и ММП могут быть использованы для прогноза космической погоды.

Автор выражает благодарность создателям баз данных и каталогов геомагнитных бурь World Data Centre for Geomagnetism (Kyoto), Goddard Space Flight Center (NASA, USA) и Мирового центра данных по солнечно-земной физике (Москва) за возможность использования этих данных, а также Б.И. Клайну за обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена по теме «Влияние космических факторов на развитие экстремальных процессов в магнитосфере Земли» Госзадание № 0144-2014-00116.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б. Проявление ориентации магнитных облаков солнечного ветра в сезонной вариации геомагнитной активности // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 4. С. 286–295. DOI: [10.7868/S0023420614040025](https://doi.org/10.7868/S0023420614040025).
- Веселовский И.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Средние параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на орбите Земли за последние три цикла // Астрономический вестник. 1998. Т. 32, № 4. С. 352–358.
- Гвишиани А.Д., Старостенко В.И., Сумарук Ю.П., и др. Уменьшение солнечной и геомагнитной активности с 19-го по 24-й цикл // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 3. С. 314–322. DOI: [10.7868/S0016794015030098](https://doi.org/10.7868/S0016794015030098).
- Дэспирак И.В., Любич А.А., Клейменова Н.Г. Разные типы потоков солнечного ветра и суббури в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59, № 1. С. 3–9. DOI: [10.1134/S001679401901005X](https://doi.org/10.1134/S001679401901005X).
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофизические процессы и биосфера. 2009. Т. 8, № 1. С. 5–35.
- Макаров Г.А. Гелиоширотные закономерности магнитно-возмущенных дней со среднесуточным значением геомагнитного индекса  $Dst < -100$  нТл // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 3. С. 28–32. DOI: [10.12737/szf-43201803](https://doi.org/10.12737/szf-43201803).
- Нусинов А.А., Руднева Н.М., Гинзбург Е.А., Дремухина Л.А. Сезонные вариации статистических распределений индексов геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 4. С. 511–516. DOI: [10.7868/S0016794015040100](https://doi.org/10.7868/S0016794015040100).
- Обридко В.Н., Канониди Х.Д., Митрофанова Т.А., Шельтинг Б.Д. Солнечная активность и геомагнитные возмущения // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53, № 2. С. 157–166. DOI: [10.7868/S0016794013010148](https://doi.org/10.7868/S0016794013010148).
- Шевнин А.Д. Интервалы геомагнитного спокойствия по индексам  $K_p$  // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43, № 2. С. 225–230.
- Ahluwalia H.S.  $A_p$  time variations and interplanetary magnetic field intensity // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N A12. P. 27,481–27,487. DOI: [10.1029/2000JA900124](https://doi.org/10.1029/2000JA900124).
- Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, A07S08. DOI: [10.1029/2005JA011447](https://doi.org/10.1029/2005JA011447).
- Burlaga L.F., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 6673–6684.
- Chu X., McPherron R. L., Hsu T.-S., Angelopoulos V. Solar cycle dependence of substorm occurrence and duration: Implications for onset // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. P. 2808–2818. DOI: [10.1002/2015JA021104](https://doi.org/10.1002/2015JA021104).
- Cortie A.L. Sunspot and terrestrial magnetic phenomena, 1898–1911 // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1912. V. 73. P. 52–60.
- Holappa L., Mursula K., Asikainen T. A new method to estimate annual solar wind parameters and contributions of different solar wind structures to geomagnetic activity // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. P. 9407–9418. DOI: [10.1002/2014JA020599](https://doi.org/10.1002/2014JA020599).
- Hutchinson J.A., Wright D.M., Milan S.E. Geomagnetic storms over the last solar cycle: A superposed epoch analysis // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, A09211. DOI: [10.1029/2011JA016463](https://doi.org/10.1029/2011JA016463).
- Kane R.P. The idea of space weather – a historical perspective // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 1261–1264. DOI: [10.1016/j.asr.2006.01.014](https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.01.014).
- Katus R.M., Liemohn M.W., Ionides E.L., et al. Statistical analysis of the geomagnetic response to different solar wind drivers and the dependence on storm intensity // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 12. P. 310–327. DOI: [10.1002/2014JA020712](https://doi.org/10.1002/2014JA020712).
- Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N A7. P. 14209–14213. DOI: [10.1029/96JA04020](https://doi.org/10.1029/96JA04020).
- McIntosh D.H. On the annual variation of magnetic disturbance // Philos. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. 1959. V. 251. P. 525–552.
- McIntosh S.W., Leamon R.J., Dikpati M., et al. What the sudden death of solar cycles can tell us about the nature of the solar interior // Solar phys. V. 294, N 88. 2019. DOI: [10.1007/s11207-019-1474-y](https://doi.org/10.1007/s11207-019-1474-y).
- Newell P. T., Gjerloev J. W., Mitchell E. J. Space climate implications from substorm frequency // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. P. 6254–6265. DOI: [10.1002/jgra.50597](https://doi.org/10.1002/jgra.50597).
- Newell P.T., Liou K., Gjerloev J.W., et al. Substorm probabilities are best predicted from solar wind speed // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2016. V. 146. P. 28–37. DOI: [10.1016/j.jastp.2016.04.019](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.04.019).
- Quattara F., Amory-Mazaudier C., Menvielle M., et al. On the long term change in the geomagnetic activity during the 20th century // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 2045–2051. DOI: [10.5194/angeo-27-2045-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-2045-2009).
- Papitashvili V.O., Papitashvili N.E., King J.H. Solar cycle effects in planetary geomagnetic activity: Analysis of 36-year long OMNI dataset // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, N 17. P. 2797–2800. DOI: [10.1029/2000GL000064](https://doi.org/10.1029/2000GL000064).
- Penn M.J., Livingston W. Long-term evolution of sunspot magnetic fields // Proc. IAU Symp. "The Physics of Sun and Star Spots". 2010. V. 273. P. 126–133.
- Reeves G., Morley S., Cunningham G. Long-term variations in solar wind velocity and radiation belt electrons // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. P. 1040–1048. DOI: [10.1002/jgra.50126](https://doi.org/10.1002/jgra.50126).
- Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 92–108.
- Tanskanen E.I., Hynönen R., Mursula K. Seasonal variation of high-latitude geomagnetic activity in individual years // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. P. 10,058–10,071. DOI: [10.1002/2017JA024276](https://doi.org/10.1002/2017JA024276).
- 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  $B_z$  variances, low solar wind speeds and low solar magnetic fields // Ann. Geophys. 2011. V. 29. P. 839–849. DOI: [10.5194/angeo-29-839-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-839-2011).
- Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu J.Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, A11328. DOI: [10.1029/2011JA017042](https://doi.org/10.1029/2011JA017042).
- Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. Occurrence rate of extreme magnetic storms // J.

Geophys. Res: Space Phys. 2013. V. 118. P. 4760–4765. DOI: [10.1002/jgra.50467](https://doi.org/10.1002/jgra.50467).

Zhang J.-C., Liemohn M.W., Kozyra J.U., et al. A statistical comparison of solar wind sources of moderate and intense geomagnetic storms at solar minimum and maximum // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A01104. DOI: [10.1029/2005JA011065](https://doi.org/10.1029/2005JA011065).

Zhang X.-Y., Moldwin M.B. The source, statistical properties, and geoeffectiveness of long-duration southward interplanetary magnetic field intervals // *J. Geophys. Res: Space Phys.* 2014. V. 119. P. 658–669. DOI: [10.1002/2013JA018937](https://doi.org/10.1002/2013JA018937).

URL: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html> (дата обращения 30 января 2019 г.).

URL: [http://www.wdcb.ru/stp/data/storms/mag-netic\\_storms/](http://www.wdcb.ru/stp/data/storms/mag-netic_storms/) (дата обращения 16 января 2019 г.).

URL: <http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/dataviewer/> (дата обращения 16 января 2019 г.).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (дата обращения 30 января 2019 г.).

## REFERENCES

Ahluwalia H.S. A<sub>p</sub> time variations and interplanetary magnetic field intensity. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. A12, pp. 27,481–27,487. DOI: [10.1029/2000JA900124](https://doi.org/10.1029/2000JA900124)

Barkhatov N.A., Revunova E.A., Vinogradov A.B. Effect of orientation of the solar wind magnetic clouds on the seasonal variation of geomagnetic activity. *Cosmic Res.* 2014, vol. 52, no. 4, pp. 269–277. DOI: [10.1134/S0010952514040017](https://doi.org/10.1134/S0010952514040017).

Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A07S08. DOI: [10.1029/2005JA011447](https://doi.org/10.1029/2005JA011447).

Burlaga L.F., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations. *J. Geophys. Res.* 1981, vol. 86, pp. 6673–6684.

Chu X., McPherron R.L., Hsu T.-S., Angelopoulos V. Solar cycle dependence of substorm occurrence and duration: Implications for onset. *J. Geophys. Res: Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 2808–2818. DOI: [10.1002/2015JA021104](https://doi.org/10.1002/2015JA021104).

Cortie A.L. Sunspot and Terrestrial magnetic phenomena, 1898–1911. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1912, vol. 73, pp. 52–60.

Despirak I.V., Lyubchich A.A., Kleimenova N.G. Solar Wind streams of different types and high-latitude substorms. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2019, vol. 59, no. 1, pp. 1–6. DOI: [10.1134/S0016793219010055](https://doi.org/10.1134/S0016793219010055).

Gvishiani A.D., Soloviev A.A., Starostenko V.I., Sumaruk Y.P., Legostaeva O.V. A decrease in solar and geomagnetic activity from cycle 19 to cycle 24. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2015, vol. 55, no. 3, pp. 299–306. DOI: [10.1134/S0016793215030093](https://doi.org/10.1134/S0016793215030093).

Holappa L., Mursula K., Asikainen T. A new method to estimate annual solar wind parameters and contributions of different solar wind structures to geomagnetic activity. *J. Geophys. Res: Space Phys.* 2014, vol. 119, pp. 9407–9418. DOI: [10.1002/2014JA020599](https://doi.org/10.1002/2014JA020599).

Hutchinson J.A., Wright D.M., Milan S.E. Geomagnetic storms over the last solar cycle: A superposed epoch analysis. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A09211. DOI: [10.1029/2011JA016463](https://doi.org/10.1029/2011JA016463).

Kane R.P. The idea of space weather – a historical perspective. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, pp. 1261–1264. DOI: [10.1016/j.asr.2006.01.014](https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.01.014).

Katus R.M., Liemohn M.W., Ionides E.L., Ilie R., Welling D., Sarno-Smith L.K. Statistical analysis of the geomagnetic response to different solar wind drivers and the dependence on storm intensity. *J. Geophys. Res: Space Phys.* 2015, vol. 12, pp. 310–327. DOI: [10.1002/2014JA020712](https://doi.org/10.1002/2014JA020712).

Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behav-

ior of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, no. A7, pp. 14209–14213. DOI: [10.1029/96JA04020](https://doi.org/10.1029/96JA04020).

Makarov G.A. Heliolatitude regularities of magnetically disturbed days with daily average geomagnetic index  $Dst < -100$  nT. *Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, no. 3, pp. 20–23. DOI: [10.12737/stp-43201803](https://doi.org/10.12737/stp-43201803).

McIntosh D.H. On the annual variation of magnetic disturbance. *Philos. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A.* 1959, vol. 251, pp. 525–552.

McIntosh S.W., Leamon R.J., Dikpati M., et al. What the sudden death of solar cycles can tell us about the nature of the solar interior. *Solar phys.* 2019, vol. 294, no. 88. DOI: [10.1007/s11207-019-1474-y](https://doi.org/10.1007/s11207-019-1474-y).

Newell P.T., Gjerloev J.W., Mitchell E.J. Space climate implications from substorm frequency. *J. Geophys. Res: Space Phys.* 2013, vol. 118, pp. 6254–6265. DOI: [10.1002/jgra.50597](https://doi.org/10.1002/jgra.50597).

Newell P.T., Liou K., Gjerloev J.W., Sotirelis T., Wing S., Mitchell E.J. Substorm probabilities are best predicted from solar wind speed. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 146, pp. 28–37. DOI: [10.1016/j.jastp.2016.04.019](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.04.019).

Nusinov A.A., Rudneva N.M., Ginzburg E.A., Dremukhina L.A. Seasonal variations in statistical distributions of geomagnetic activity indices. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2015, vol. 55, no. 4, pp. 493–498. DOI: [10.1134/S0016793215040106](https://doi.org/10.1134/S0016793215040106).

Obriadko V.N., Kanonidi Kh.D., Mitrofanova T.A., Shelting B.D. Solar activity and geomagnetic disturbances. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, no. 2, pp. 147–156. DOI: [10.1134/S0016793213010143](https://doi.org/10.1134/S0016793213010143).

Ouattara F., Amory-Mazaudier C., Menvielle M., Simon P., Legrand J.P. On the long term change in the geomagnetic activity during the 20th century. *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27, pp. 2045–2051. DOI: [10.5194/angeo-27-2045-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-2045-2009).

Papitashvili V.O., Papitashvili N.E., King J.H. Solar cycle effects in planetary geomagnetic activity: Analysis of 36-year long OMNI dataset. *Geophys. Res. Lett.* 2000, vol. 27, no. 17, pp. 2797–2800. DOI: [10.1029/2000GL000064](https://doi.org/10.1029/2000GL000064).

Penn M.J., Livingston W. Long-term evolution of sunspot magnetic fields. *Proc. IAU Symp. The Physics of Sun and Star Spots.* 2010, vol. 273, pp. 126–133.

Reeves G., Morley S., Cunningham G. Long-term variations in solar wind velocity and radiation belt electrons. *J. Geophys. Res: Space Phys.* 2013, vol. 118, pp. 1040–1048. DOI: [10.1002/jgra.50126](https://doi.org/10.1002/jgra.50126).

Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1973, vol. 78, pp. 92–108.

Shevniin A.D. Quiet geomagnetic intervals as inferred from the  $K_p$  index. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2003, vol. 43, no. 2, pp. 210–214. (In Russian).

Tanskanen E. I., Hynönen R., Mursula K. Seasonal variation of high-latitude geomagnetic activity in individual years. *J. Geophys. Res: Space Phys.* 2017, vol. 122, pp. 10,058–10,071. DOI: [10.1002/2017JA024276](https://doi.org/10.1002/2017JA024276).

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  $B_z$  variances, low solar wind speeds and low solar magnetic fields. *Ann. Geophys.* 2011, vol. 29, pp. 839–849. DOI: [10.5194/angeo-29-839-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-839-2011).

Veselovskii I.S., Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Average parameters of the solar wind and interplanetary magnetic field at the Earth's orbit for the last three solar cycles. *Solar System Research.* 1998, vol. 32, no. 4, pp. 310–315.

Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu J.Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A11328. DOI: [10.1029/2011JA017042](https://doi.org/10.1029/2011JA017042).

Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu. Solar and interplanetary sources of geomagnetic storms: space weather aspects.

*Geofizicheskie protsessy i biosfera* [Geophysical processes and biosphere]. 2009, vol. 8, no. 1, pp. 5–35. (In Russian).

Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. Occurrence rate of extreme magnetic storms. *J. Geophys. Res: Space Phys.* 2013, vol. 118, pp. 4760–4765. DOI: [10.1002/jgra.50467](https://doi.org/10.1002/jgra.50467).

Zhang J.-C., Liemohn M.W., Kozyra J.U., Thomsen M.F., Elliott H.A., Weygand J.M. A statistical comparison of solar wind sources of moderate and intense geomagnetic storms at solar minimum and maximum. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, no. A01104. DOI: [10.1029/2005JA011065](https://doi.org/10.1029/2005JA011065).

Zhang X.-Y., Moldwin M.B. The source, statistical properties, and geoeffectiveness of long-duration southward interplanetary magnetic field intervals. *J. Geophys. Res: Space Phys.* 2014, vol. 119, pp. 658–669. DOI: [10.1002/2013JA018937](https://doi.org/10.1002/2013JA018937).

URL: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html> (accessed January 30, 2019).

URL: [http://www.wdcb.ru/stp/data/storms/mag-netic\\_storms/](http://www.wdcb.ru/stp/data/storms/mag-netic_storms/) (accessed January 16, 2019).

URL: <http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/dataviewer/> (accessed January 16, 2019).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (accessed January 30, 2019).

*Как цитировать эту статью*

Куражковская Н.А. Глобальная возмущенность магнитосферы Земли и ее связь с космической погодой. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 1. С. 51–62. DOI: [10.12737/szf-61202005](https://doi.org/10.12737/szf-61202005).