

СВЯЗЬ РАЗВИТИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ С ПАРАМЕТРОМ β СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

RELATIONSHIP BETWEEN GEOMAGNETIC STORM DEVELOPMENT AND THE SOLAR WIND PARAMETER β

Н.А. Куражковская

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

О.Д. Зотов

Геофизическая обсерватория “Борок”,
филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Борок, Россия, ozotov@inbox.ru

Б.И. Клайн

Геофизическая обсерватория “Борок”,
филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Борок, Россия, klain@borok.yar.ru

N.A. Kurazhkovskaya

Borok Geophysical Observatory,
Branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Borok, Russia, knady@borok.yar.ru

O.D. Zotov

Borok Geophysical Observatory,
Branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Borok, Russia, ozotov@inbox.ru

B.I. Klain

Borok Geophysical Observatory,
Branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Borok, Russia, klain@borok.yar.ru

Аннотация. Исследована динамика параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) во время развития 933 изолированных геомагнитных бурь, наблюдававшихся в период с 1964 по 2010 г. Анализ выполнялся методом наложенных эпох на интервале 48 ч до и 168 ч после момента минимума *Dst*-индекса. Селекция геомагнитных бурь проводилась по типу начала бурь (внезапное или постепенное) и по интенсивности (слабые, умеренные и сильные). Динамика параметров СВ и ММП сопоставлялась с динамикой *Dst*-индекса, являющегося индикатором развития геомагнитных бурь. Показано, что наибольшее количество бурь в цикле солнечной активности наблюдалось в годы минимальных средних значений (близких по величине к 1) параметра β СВ (β — отношение плазменного давления к магнитному). Обнаружено подобие динамики *Dst*-индекса и β -параметра СВ. Продолжительность фазы восстановления бурь следует за характерным временем восстановления параметра β . Установлено, что на главной фазе магнитной бури значение β близко к 1, что отражает максимальную турбулентность плазмы СВ. На фазе восстановления β возвращается к фоновым значениям $\sim 2\text{--}3.5$. Предполагается, что турбулентность плазмы СВ, характеризующаяся величиной параметра β , может играть значительную роль в процессе развития геомагнитных бурь.

Ключевые слова: геомагнитные бури, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, *Dst*-индекс, параметр β , турбулентность.

Abstract. We have analyzed the dynamics of solar wind and interplanetary magnetic field (IMF) parameters during the development of 933 isolated geomagnetic storms, observed over the period from 1964 to 2010. The analysis was carried out using the epoch superposition method at intervals of 48 hrs before and 168 hrs after the moment of *Dst* minimum. The geomagnetic storms were selected by the type of storm commencement (sudden or gradual) and by intensity (weak, moderate, and strong). The dynamics of the solar wind and IMF parameters was compared with that of the *Dst* index, which is an indicator of the development of geomagnetic storms. The largest number of storms in the solar activity cycle is shown to occur in the years of minimum average values (close in magnitude to 1) of the solar wind parameter β (β is the ratio of plasma pressure to magnetic pressure). We have revealed that the dynamics of the *Dst* index is similar to that of the β parameter. The duration of the storm recovery phase follows the characteristic recovery time of the β parameter. We have found out that during the storm main phase the β parameter is close to 1, which reflects the maximum turbulence of solar wind plasma fluctuations. In the recovery phase, β returns to background values $\beta \sim 2\text{--}3.5$. We assume that the solar wind plasma turbulence, characterized by the β parameter, can play a significant role in the development of geomagnetic storms.

Keywords: geomagnetic storms, solar wind, interplanetary magnetic field, *Dst* index, β parameter, turbulence.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное воздействие вариаций солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) на магнитосферу Земли приводит к геомагнитным возмущениям, среди которых наиболее мощными являются магнитные бури. В последние

десятилетия геомагнитные бури рассматриваются как один из основных факторов околоземной космической погоды. Их источниками главным образом являются солнечные возмущения (вспышки и выбросы корональной массы — Coronal Mass Ejection, CME) и коротящие области взаимодействия высокоскоростных потоков плазмы СВ из корональ-

ных дыр на Солнце и медленных потоков СВ (Corotating Interaction Regions, CIR) [Borovsky, Denton, 2006; Tsurutani et al., 2006; Guo et al., 2010]. По своей природе магнитные бури очень разнообразны, традиционно их разделяют на бури с внезапным и с постепенным началом [Акасофу, Чепмен, 1975]. Для бурь первого типа характерно четко выраженное внезапное начало (Sudden Storm Commencement, SSC), которое проявляется в виде резкого скачка всех компонент магнитного поля практически одновременно по всему земному шару. К возникновению магнитных бурь с внезапным началом приводят солнечные вспышки и магнитные облака, вызванные CME [Guo et al., 2010]. Геомагнитные бури с постепенным началом характеризуются плавным ростом всех компонент магнитного поля, и их развитие связано как с высокоскоростными потоками из корональных дыр, так и с областями сжатия CIR [Tsurutani et al., 2006]. Согласно [Обридко и др., 2013], бури с внезапным и с постепенным началом образуют две независимые популяции. Вместе с тем в последние годы появились публикации, в которых селекция магнитосферных возмущений стала проводиться по типам течений СВ (драйверов), например: [Ермолаев и др., 2007, 2010; Yermolaev et al., 2010; Дремухина и др., 2019]. Бури с внезапным началом иногда называют CME-бури, а с постепенным началом — CIR-бури.

Исследованию статистических и морфологических закономерностей геомагнитных бурь посвящены многочисленные публикации, например: [Gonzalez et al., 1994; Loewe, Prölss, 1997; Vennerstroem, 2001; Hutchinson et al., 2011; Haines et al., 2019]. Обширна также литература, в которой отражены исследования условий на Солнце и в межпланетной среде, приводящих к развитию бурь. Во многих работах анализ гелиосферных условий, благоприятных для развития бурь, проводился методом наложенных эпох [Lyatsky, Tan, 2003; Zhang et al., 2006; Ермолаев и др., 2007, 2010; Katus et al., 2015; Дремухина и др., 2019]. Наиболее часто рассматривались такие параметры межпланетной среды, как скорость V ; плотность N ; температура протонов T ; динамическое давление СВ $P_{\text{dyn}} = \rho V^2$ (ρ — плотность плазмы); B_x -, B_y -, B_z -компоненты ММП; модуль напряженности B ; E_y -компонента электрического поля СВ ($E_y = -V_x B_z$). Результаты статистического анализа показали, что поведение параметров различается для разных типов потоков СВ, приводящих к развитию бурь [Ермолаев и др., 2007, 2010; Дремухина и др., 2019].

Среди исследованных параметров СВ и ММП в качестве триггера главной фазы бурь рассматриваются резкие флуктуации P_{dyn} и поворот вертикальной компоненты ММП к югу. В работах [Gonzalez et al., 1994, 1999] отмечается, что отрицательная B_z -компонента ММП ($B_z < 0$) является главным параметром, ответственным за развитие геомагнитных бурь. Кроме того, отрицательная B_z -компонента контролирует продолжительность главной фазы бури и ее интенсивность [Vichare et al., 2005]. Вопрос о том, какой параметр управляет продолжительностью фазы восстановления бури, остается открытым.

Заметно меньше уделяется внимания обсуждению поведения параметра β СВ во время развития бурь (параметр β равен отношению теплового давления к магнитному: $\beta = NkT/(B^2/(8\pi))$). Вместе с тем параметр β используется в качестве одного из критериев идентификации разных типов потоков СВ. Например, крупномасштабные структуры солнечного ветра CIR и CME, приводящие к развитию бурь, характеризуются $\beta > 1$ и $\beta < 0.5$ соответственно [Ермолаев и др., 2009]. В одной из последних работ [Yermolaev et al., 2021] приведены средние значения параметра β для различных драйверов СВ. Кроме того, в числе прочих параметров СВ и ММП, исследованных методом наложенных эпох, в некоторых работах, например [Ермолаев и др., 2007, 2010; Yermolaev et al., 2010], приводится временной ход параметра β во время развития бурь. При этом отмечается, что динамика параметра β при развитии бурь различна в зависимости от типа потока СВ. Согласно [Ермолаев и др., 2010], за 1–2 ч до начала бурь β уменьшается для CME и магнитных облаков, увеличивается для CIR и sheath — области сжатия перед передним фронтом поршня. Такая тенденция поведения β для этих потоков СВ сохраняется до момента достижения минимальных значений Dst . Для остальных типов потоков СВ динамика параметра β остается неизменной по мере развития бурь.

Между тем наши предыдущие исследования [Зотов, Клайн, 2017; Зотов и др., 2018, 2019] показали, что β -параметр СВ играет существенную роль в динамике активности магнитосферы, характеризуемой поведением A_p -индекса. Как известно, индекс A_p отражает планетарную геомагнитную возмущенность. Так, от величины параметра β существенно зависит наблюдение «периодического» или «хаотического» режима в динамике A_p -индекса и, соответственно, в динамике активности магнитосферы в цикле солнечной активности. При значениях β близких к 1 в магнитосфере наблюдался «хаотический», а при $\beta > 1$ — «периодический» режим [Зотов и др., 2019]. Параметр β , определяющий триггерные режимы в динамике активности магнитосферы [Зотов и др., 2019], является характеристикой турбулентности плазмы СВ [Borovsky, Funsten, 2003].

Поскольку активность магнитосферы, кроме планетарных индексов (K_p , A_p и др.), на количественном уровне характеризуется еще и величиной Dst -индекса, возникает вопрос о том, влияет ли и каким образом влияет β -параметр СВ на поведение этого индекса и, следовательно, на геомагнитные бури. Как известно, Dst -индекс является индикатором геомагнитных возмущений в средних и экваториальных широтах и отражает мощность кольцевого тока во время развития геомагнитных бурь. Dst -индекс широко используется для идентификации геомагнитных бурь, оценки их интенсивности и классификации. В соответствии с минимальными отрицательными значениями Dst , различают бури слабые, умеренные и сильные [Gonzalez et al., 1994; Loewe, Prölss, 1997]. В ряде работ исследовалась связь Dst -индекса с параметрами плазмы СВ и ММП [Burton et al., 1975; Wu, Lepping, 2002; Echer et al., 2008]. Результаты исследований показали, что во время геомагнитных

бурь самая высокая корреляция Dst -индекса наблюдается с B_z -компонентой ММП и с E_y -компонентой электрического поля СВ. Последнее явно указывает на то, что существует зависимость Dst от этих параметров. Между Dst -индексом и другими параметрами межпланетной среды (V , P_{dyn} , N) корреляция существенно слабее. О корреляционной связи Dst -индекса с параметром β не говорится, хотя, как упоминалось выше, в некоторых работах, например [Yermolaev et al., 2010], приводятся временные профили Dst -индекса и параметра β без обсуждения их возможной связи. Как правило, в подобных исследованиях параметр β рассматривается на относительно коротких временных интервалах (12 ч до и 24 ч в после начала бури), не позволяющих проследить динамику β на фазе восстановления бури. Кроме того, конкретный анализ одновременных наблюдений Dst -индекса и параметра β во время развития бури не проводился. Не рассматривалось ранее также возможное влияние этого параметра на интенсивность или другие характеристики бурь. В связи с вышесказанным исследование возможной связи динамики Dst -индекса и параметра β представляет несомненный интерес.

В данной работе, не проводя селекцию по типам потоков СВ, вызывающих геомагнитные бури, мы попытались выяснить, оказывает ли какое-либо влияние параметр β на динамику развития бурь различной интенсивности с внезапным и постепенным началом. Для этого будет выполнено совместное исследование динамики параметров плазмы СВ и ММП, в частности β -параметра и Dst -индекса, во время развития геомагнитных бурь.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе использовались среднечасовые данные о параметрах плазмы СВ, ММП и Dst -индексе за период с 1964 по 2010 г. из базы данных OMNI [https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni]. Параметр β в OMNI определяется выражением

$$\beta = \left(\frac{4.16T}{10^5} + 5.34 \right) \frac{N_p}{B^2},$$

где T — температура; N_p — плотность протонов; B — величина магнитного поля. Кроме того, из OMNI взяты среднегодовые числа Вольфа и значения параметра β за период 1964–2020 гг. Информация о магнитных бурях за период 1964–2010 гг. была получена из каталога 1 геомагнитных бурь, представленного на сайте Мирового центра данных по солнечно-земной физике (Москва) [http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_storms.r u.html]. Дополнительно для оценки годового количества бурь использовался каталог 2 геомагнитных бурь Kakioka Magnetic Observatory (Япония) [<http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/data-viewer>] за 2011–2020 гг. В обоих каталогах содержатся сведения о типе начала бури (внезапное или постепенное).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Прежде чем перейти к изложению основных результатов, необходимо сказать о некоторых замеченных закономерностях, которые стимулировали

это исследование. Давно известно, что солнечная активность и геомагнитные бури тесно связаны между собой. Бури как с внезапным, так и с постепенным началом подчиняются одиннадцатилетней цикличности и наблюдаются на разных фазах солнечного цикла. За период с 1964 по 2020 г., согласно данным двух каталогов геомагнитных бурь, наблюдалось 537 бурь с внезапным началом и 1588 бурь с постепенным началом.

Рассмотрим изменение их количества в цикле солнечной активности. На рис. 1 приведены вариации в течение нескольких циклов солнечной активности (20–24-й циклы) среднегодовых чисел Вольфа (a) и годового количества геомагнитных бурь (b) с внезапным (красная кривая) и постепенным (зеленая кривая) началом.

Из рис. 1 видно, что бури с внезапным началом преимущественно наблюдаются на фазе роста и максимума солнечной активности, а с постепенным началом доминируют на фазе спада солнечного цикла. Эта закономерность частоты наблюдения геомагнитных бурь ранее отмечалась, например, в работах [Обридко и др., 2013; Куражковская, 2020]. На этом же рисунке представлена динамика среднегодовых значений параметра β СВ (b). Сопоставляя ход числа бурь и параметра β в цикле солнечной активности, нетрудно увидеть, что, независимо от типа бурь, их максимальное количество в основном приходится на годы минимальной величины β . В эти годы значения β близки к 1, т. е. в потоке плазмы СВ среднее тепловое давление оказывается примерно равным магнитному. Этот факт может косвенно свидетельствовать о связи появления бурь с плазменным параметром СВ.

Другим экспериментальным фактом, указывающим на возможную связь бурь и параметра β , является следующее наблюдение. Во время развития геомагнитных бурь типичная динамика Dst -индекса представляет собой его резкое уменьшение за относительно короткое время (от 2 до 12–15 ч) с последующим медленным восстановлением (от 1 до 7–8 сут) к первоначальному уровню. На рис. 2 в качестве примера показаны вариации параметра β и Dst -индекса в течение двух месяцев (с 1 мая по 30 июня 2005 г.), построенные по среднечасовым данным OMNI. Исходные данные были сглажены скользящим средним по девяти точкам. В этом временном интервале наблюдалось несколько изолированных бурь различной интенсивности с внезапным и постепенным началом. Вблизи начала каждой бури отмечался резкий скачок параметра β , затем следовало его уменьшение по величине, причем практически каждое понижение β до значений равных 1 или меньше 1 совпадало с резким уменьшением Dst -индекса, свидетельствующим о развитии геомагнитной бури. Иными словами, вариации Dst -индекса и параметра β примерно повторяли друг друга. Таким образом, результаты рис. 1 и 2 указывают на тот факт, что не только количество наблюдаемых магнитных бурь, но и процесс их развития, по-видимому, как-то связан с поведением параметра β .

Основываясь на вышеизложенных предположениях, мы провели более детальное исследование

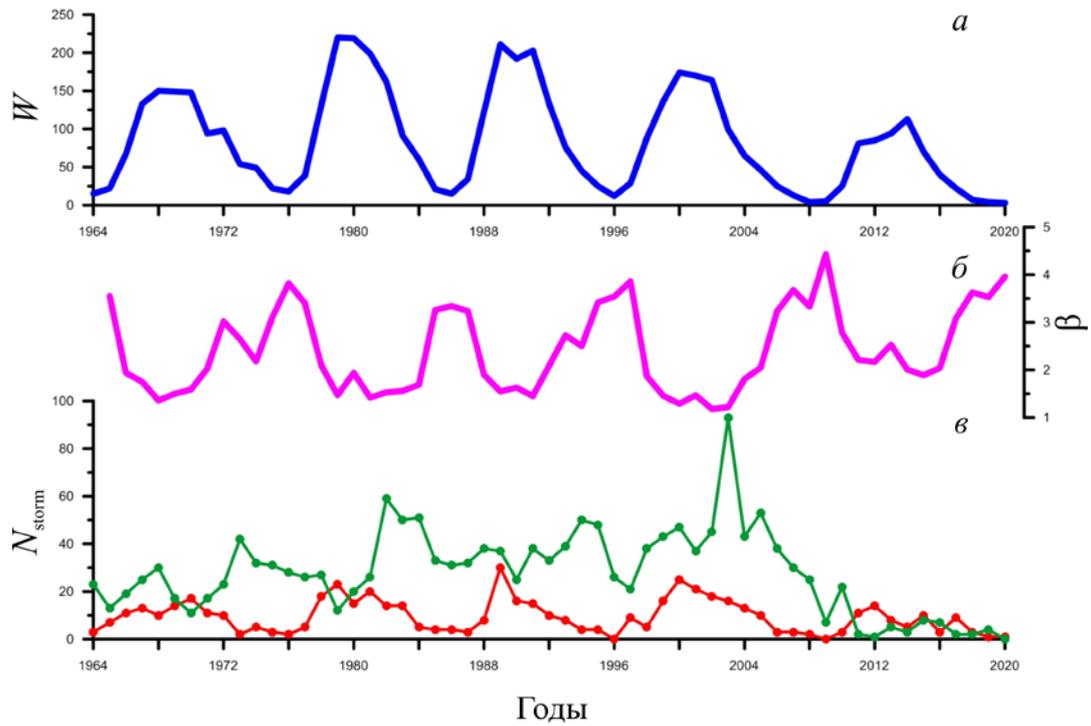


Рис. 1. Вариации среднегодовых чисел Вольфа W (а), параметра β СВ (б) и годового количества геомагнитных бурь N_{storm} (в) с внезапным (красная кривая) и постепенным (зеленая кривая) началом в 20–24-м циклах солнечной активности

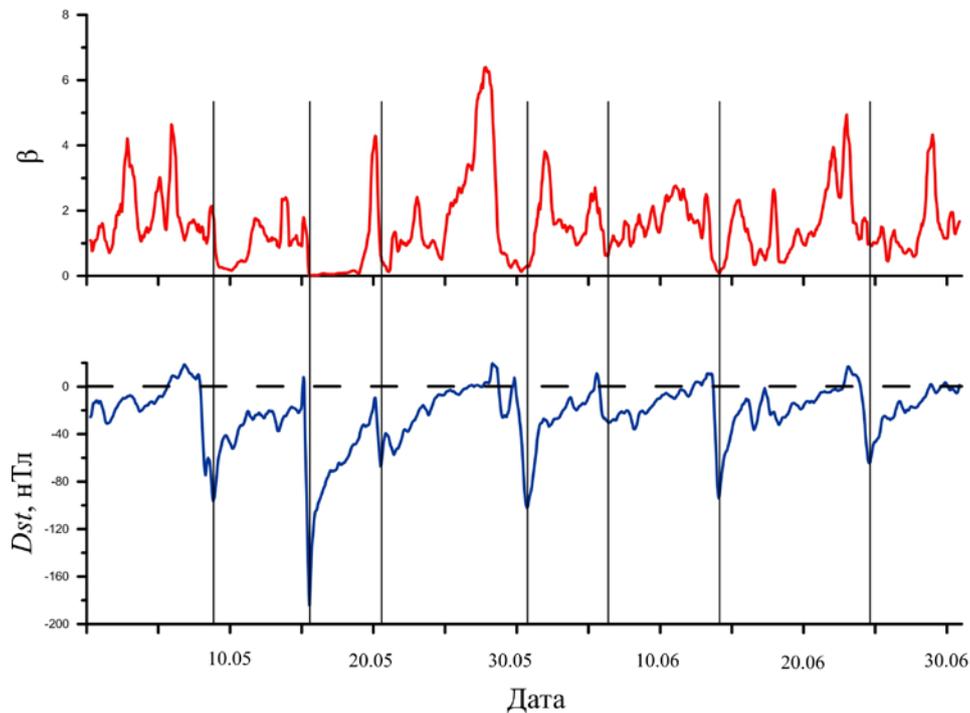


Рис. 2. Вариации среднечасовых значений β -параметра и Dst -индекса в период с 1 мая по 30 июня 2005 г. Вертикальные линии показывают минимумы Dst -индекса

динамики параметров СВ и ММП во время развития геомагнитных бурь. За 1964–2010 гг. из каталога (1) для анализа было отобрано 933 изолированные геомагнитные бури, из них 288 бурь с внезапным началом и 645 бурь с постепенным началом. Бури считались изолированными, если фаза восстановления предыдущей бури не содержала начало последующей бури. Селекция бурь по типу начала проведена в соответствии с каталогом 1, в котором отражена

данная информация. Кроме перечисленных в разделе «Введение» наиболее часто анализируемых межпланетных параметров, мы рассмотрели дополнительно следующие параметры: отношение плотности альфа-частиц к плотности протонов N_α/N_p , параметр β , альвеновское число Маха $M_a = VN^{1/2}/20B$. Анализ параметров межпланетной среды выполнялся методом наложенных эпох. В качестве репера выбирался момент минимума Dst -индекса во время раз-

вития каждой бури. Согласно данным работы [Ермолаев и др., 2007], длительности главных фаз изолированных бурь изменяются от 2 до 15 ч при среднем значении 7 ± 4 ч. Поведение параметров СВ и ММП рассматривалось на интервале 48 ч до и 168 ч после момента минимума Dst -индекса. Выбор временного интервала продолжительностью 48 ч до минимума Dst -индекса обоснован возможностью проанализировать динамику параметров как до начала бури, так и после, на главной фазе. Продолжительность фазы восстановления бури охватывает более длительный интервал 5–7 сут. В связи с этим рассматривалась динамика параметров на интервале 168 ч после времени минимума Dst -индекса. По сравнению с другими исследователями мы проводили анализ данных на более продолжительных временных интервалах (в целом исследование охватывало интервал 9 сут). Селекция геомагнитных бурь проводилась по типу начала бурь (внезапное или постепенное) и по интенсивности, оцениваемой по Dst -индексу.

Динамика всех параметров СВ и ММП во время наблюдения бурь с внезапным и постепенным началом сопоставлялась с вариацией Dst -индекса, также полученной методом наложенных эпох. В целом качественное поведение анализируемых параметров во время развития бурь с внезапным и постепенным началом совпадало с результатами, полученными другими исследователями [Loewe, Prölss, 1997; Zhang et al., 2006], которые в качестве репера выбирали момент минимума Dst -индекса. В связи с этим мы не будем приводить динамику всех параметров во время развития бурь, а, исходя из цели исследования, ограничимся лишь сопоставлением Dst -индекса с некоторыми из них.

На рис. 3 показаны усредненные вариации наиболее геоэффективных параметров СВ, а именно B_z ММП и динамического давления P_{dyn} , а также Dst -индекса и β -параметра во время развития изолированных бурь с внезапным (а) и постепенным началом (б).

Как и ожидалось, особенности динамики данных параметров идентичны для бурь с внезапным и постепенным началом. Имеются лишь различия в пиковых величинах B_z , P_{dyn} и Dst на главной фазе бури, которые вполне закономерны. Согласно [Borovsky, Denton, 2006], бури с внезапным началом, как правило, более интенсивны, чем бури с постепенным началом.

Главная особенность поведения параметров (рис. 3) заключается в том, что B_z ММП и P_{dyn} СВ, подверженные резким флуктуациям вблизи начала бури, восстанавливаются к фоновым значениям достаточно быстро — в течение примерно 48 ч после начала бури. Подобная тенденция отмечается также в поведении модуля напряженности B , E_y -компоненты электрического поля СВ и других межпланетных параметров. Однако фаза восстановления бури (Dst -индекса) продолжается до 5–7 сут. Аналогичный временной интервал восстановления типичен для β -параметра. Как видно на рис. 3, характерные времена восстановления β -параметра существенно больше, чем времена восстановления B_z и P_{dyn} .

Необходимо отметить, что, в отличие от динамики межпланетных параметров (например, B_z , P_{dyn} , B , E_y), изменение параметра β во время развития бурь похоже на типичную Dst -вариацию. Качественное совпадение динамики параметра β и Dst -индекса характерно для бурь как с внезапным, так и с постепенным началом. Поведение усредненных значений представленных параметров (рис. 3) не выходит за границы доверительных интервалов, что свидетельствует о статистической значимости полученного результата. Наблюдается ли подобная закономерность во время развития бурь различной интенсивности?

Для получения ответа на этот вопрос мы разделили бури с внезапным и постепенным началом по величине минимального значения Dst в нанотеслах на слабые ($-50 < Dst \leq -30$), умеренные ($-100 < Dst \leq -50$) и сильные ($Dst \leq -100$) согласно критерию из работы [Loewe, Prölss, 1997]. Для увеличения статистики мы объединили в один класс сильные и очень сильные бури. Количество исследованных изолированных бурь приведено в таблице.

	Количество бурь с внезапным началом	Количество бурь с постепенным началом
Слабые	50	278
Умеренные	134	308
Сильные	104	59

Далее мы сопоставили динамику Dst -индекса и β -параметра во время бурь разной интенсивности с внезапным и постепенным началом (рис. 4). Видно, что время минимума Dst -индекса практически совпадает со временем минимальной величины параметра β . Поведение Dst -индекса и β -параметра, полученное методом наложенных эпох, примерно подобно для бурь различной интенсивности. Оценки точности полученных средних значений Dst -индекса и β -параметра показали, что они не превышают границы доверительных интервалов с вероятностью 0.95, так же как и усредненные данные на рис. 3. Последнее свидетельствует о статистической значимости полученного результата. Достижимый минимум Dst -индекса (интенсивность бури) находится в соответствии с величиной β -параметра: чем меньше значение β на главной фазе бури, тем сильнее по мощности буря. Например, во время развития сильных бурь на главной фазе $\beta < 1$, умеренных $\beta \sim 1$ и слабых $1 < \beta < 2$. Это типично для бурь как с внезапным, так и с постепенным началом. Другими словами, интенсивность бурь в какой-то мере определяется величиной β -параметра.

Характерной особенностью параметра β является то, что его величина значительно различается в возмущенные периоды и на разных фазах развития бури. До начала бури параметр β варьирует в среднем от 2 до 3.5, на главной фазе бури его величина становится близкой к 1, а на фазе восстановления β возвращается к фоновым значениям ~ 2 –3.5 (рис. 4). На рис. 4 для бурь разной интенсивности видны те же характерные особенности фазы восстановления бурь и динамики β , что и на рис. 3. Такое поведение

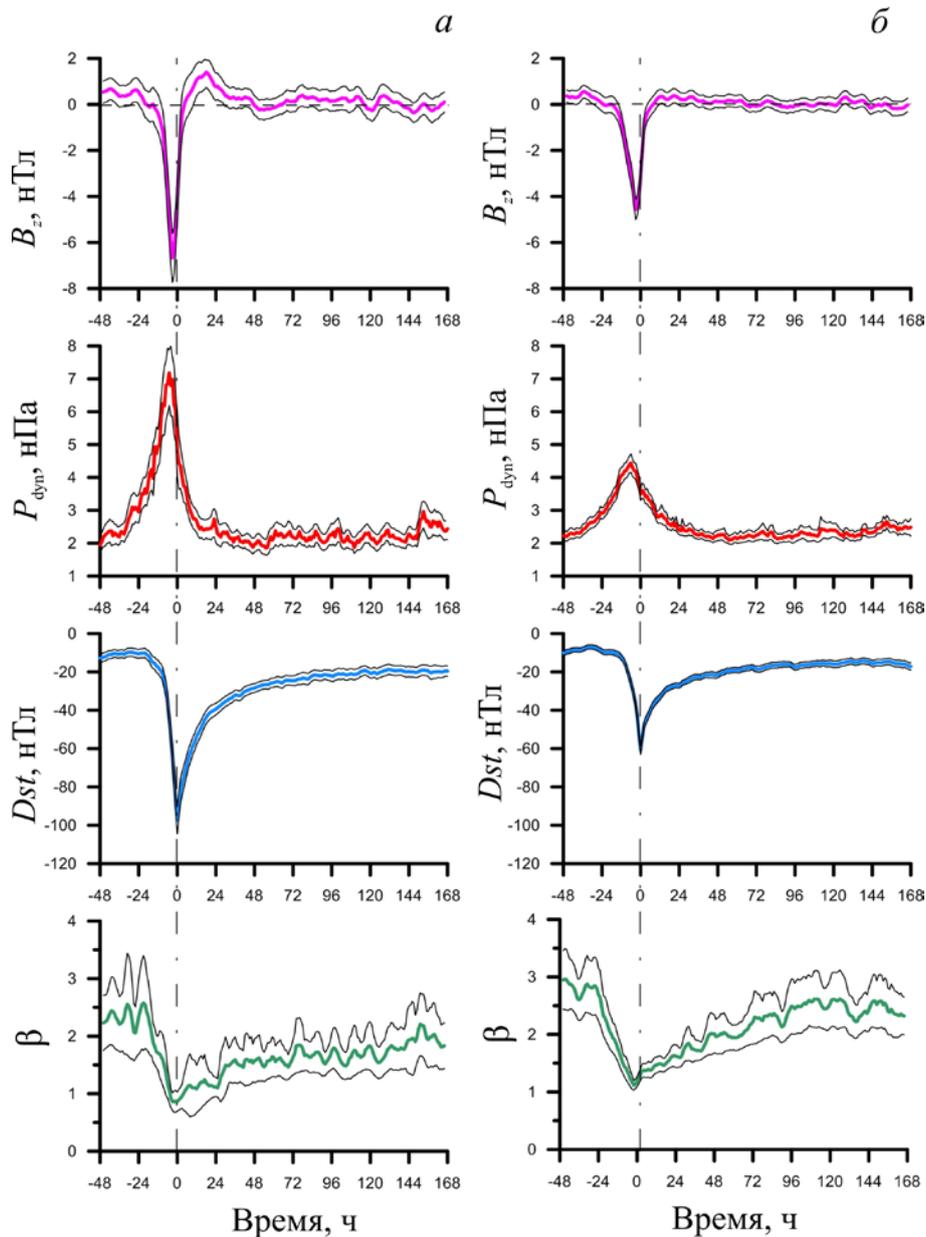


Рис. 3. Усредненная динамика B_z -компоненты ММП, динамического давления СВ P_{dyn} , Dst -индекса и β -параметра во время развития изолированных бурь с внезапным (а) и постепенным началом (б). Доверительные интервалы, соответствующие вероятности 0.95, отмечены черными линиями

Dst -индекса и β -параметра позволяет предположить, что, независимо от интенсивности геомагнитных бурь, продолжительность фазы восстановления бури, по-видимому, контролируется поведением β -параметра. Не исключено, что изменение баланса теплового и магнитного давления определяет развитие главной фазы бури и впоследствии фазы восстановления.

Эволюция значений параметра β , начиная от спокойного периода (до развития бурь) и заканчивая фазой восстановления, хорошо видна на рис. 5, где показаны распределения β -параметра до начала (от -48 до -24 ч), на главной фазе (-24-0 ч) и на фазе восстановления (0-168 ч) изолированных бурь с внезапным (а) и постепенным (б) началом. Выбор продолжительности этих временных интервалов обусловлен среднестатистическим поведением Dst -индекса

(рис. 4). При построении данных распределений мы ограничились рассмотрением величин β в интервале 0~4, поскольку, согласно [Веселовский и др., 2010], в этот диапазон попадает примерно 90 % всех наблюдаемых значений β -параметра. Кроме того, с учетом результатов, представленных на рис. 1-4, для нас представлял интерес анализ поведения β вблизи $\beta=1$. На рис. 5 четко видно изменение положения максимума параметра β на полученных графиках, причем поведение β одинаково для бурь с внезапным и постепенным началом. До начала геомагнитной бури и на фазе восстановления максимум частоты наблюдения β соответствует $\beta > 1$. На главной фазе максимальное число наблюдений β приходится на значения $\beta < 1$ или близкие к 1. Таким образом, разные фазы геомагнитной бури различаются по величине соответствующего им параметра β .

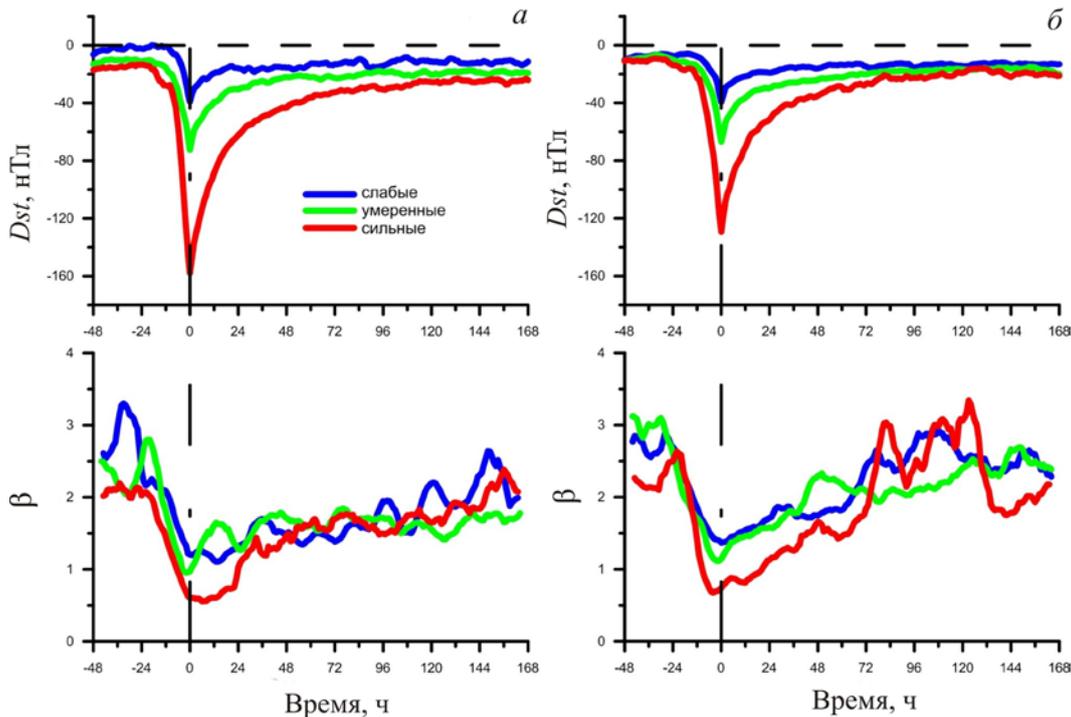


Рис. 4. Динамика Dst -индекса и β -параметра во время развития изолированных бурь различной интенсивности с внезапным (а) и постепенным (б) началом

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования показали, что плазменный параметр β оказывает влияние на глобальную возмущенность магнитосферы, а именно на развитие геомагнитных бурь. В цикле солнечной активности наибольшее количество бурь как с внезапным, так и с постепенным началом наблюдается в годы, когда среднее значение β -параметра близко к 1 (рис. 1). Динамика Dst -индекса, являющегося индикатором геомагнитных бурь, и динамика β -параметра практически идентичны (рис. 3, 4). Отражением факта следования динамики Dst -индекса за поведением β -параметра является статистическая зависимость усредненных значений Dst -индекса от средних значений β -параметра (рис. 6) в ходе развития 288 бурь с внезапным (а) и 645 бурь с постепенным (б) началом. В обоих случаях усреднение проводилось по накопленным часовым данным от момента начала бури в течение 168 ч.

В анализируемые интервалы входили главная фаза и фаза восстановления бурь. Экспериментальные данные достаточно хорошо аппроксимируются ортогональными полиномами третьей степени, о чем свидетельствуют коэффициенты корреляции для бурь с внезапным и постепенным началом, которые в обоих случаях составили $r=0.88$. Это позволяет сделать предположение о существовании связи между вариацией Dst -индекса и β -параметром независимо от типа начала бури. Качественное поведение аппроксимирующих полиномов примерно одинаково для бурь с внезапным и постепенным началом. С увеличением β -параметра уменьшается интенсивность бурь. Различие данных зависимостей состоит в том, что для бурь с внезапным началом

наибольшая интенсивность отмечается при $\beta < 1$, а для бурь с постепенным началом — при $\beta < 1.25$. При $\beta > 2$ рост Dst -индекса практически прекращается. Связь между Dst -индексом и β -параметром имеет нелинейный характер (рис. 6).

Вследствие того, что наиболее геоэффективные параметры B_z и P_{dyn} (а также другие параметры) восстанавливаются в относительно короткое время, они не могут быть ответственны за продолжительность фазы восстановления бури. Судя по полученным нами результатам, одним из факторов, определяющих длительность фазы восстановления бури, может быть β -параметр. С нашей точки зрения, параметр β не только контролирует продолжительность фазы восстановления бурь с внезапным и постепенным началом, но и является одним из важных факторов, влияющих на их интенсивность (рис. 4). Чем меньше величина β на главной фазе бури, тем больше интенсивность возникающей бури. На главной фазе величина параметра β близка к единице независимо от типа бури. Именно при $\beta \sim 1$, согласно [Чернышов и др., 2014], уровень турбулентных флуктуаций в космической плазме достигает максимума. В работе [Wang et al., 2018] по спутниковым наблюдениям исследована зависимость частоты перегибов в спектрах мощности магнитного поля СВ от β -параметра. Частота точки перегиба на спектре мощности магнитного поля является важной характеристикой диссипации турбулентности и определяется не только масштабом, но и амплитудой турбулентных флуктуаций. Согласно [Wang et al., 2018], в СВ наибольшая степень турбулентности достигается при $0.1 < \beta < 1.3$, что не противоречит результатам численного моделирования [Чернышов и др.,

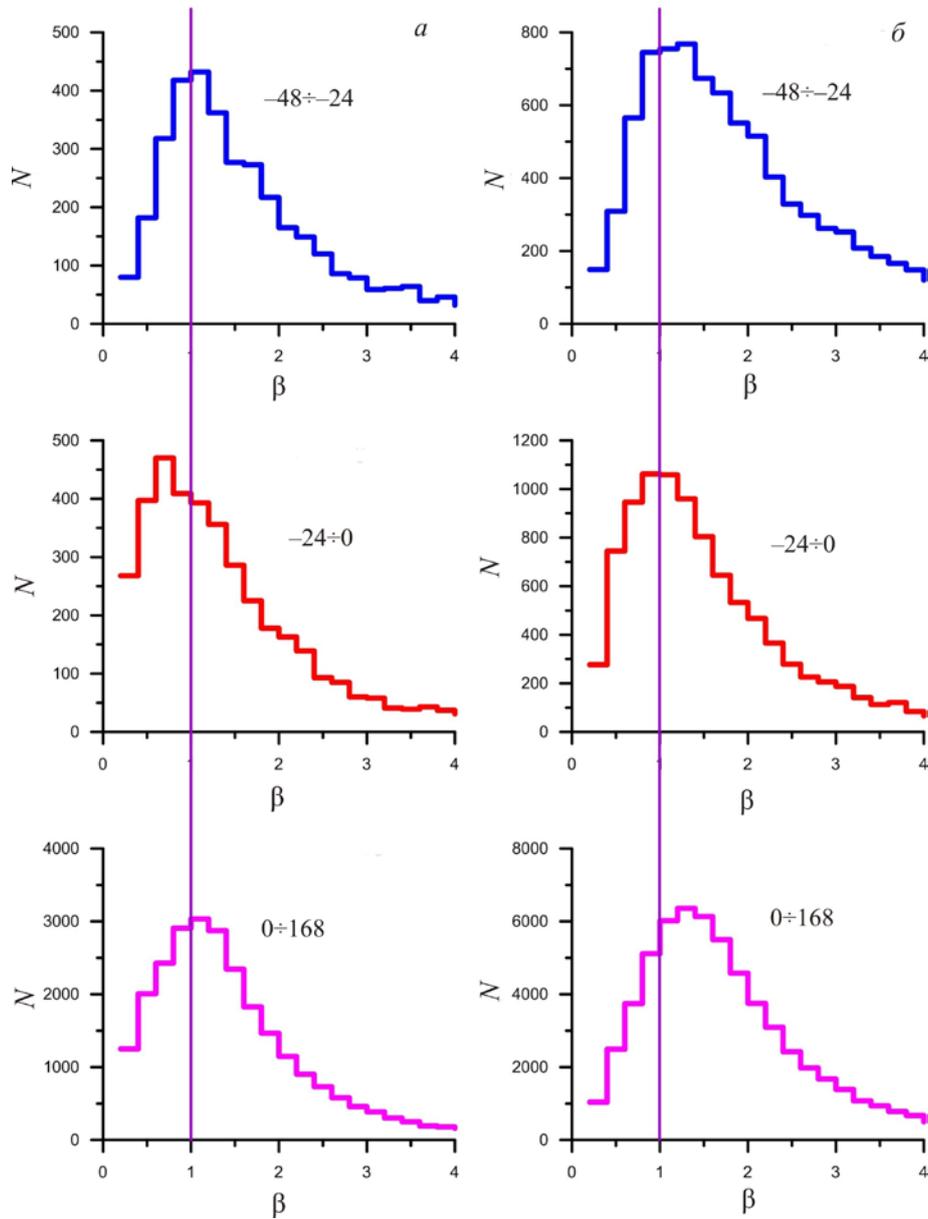


Рис. 5. Распределение величины β -параметра до начала ($-48 \div -24$ ч), на главной фазе ($-24 \div 0$ ч) и на фазе восстановления ($0 \div 168$ ч) изолированных бурь с внезапным (а) и постепенным (б) началом. Вертикальная линия — $\beta = 1$

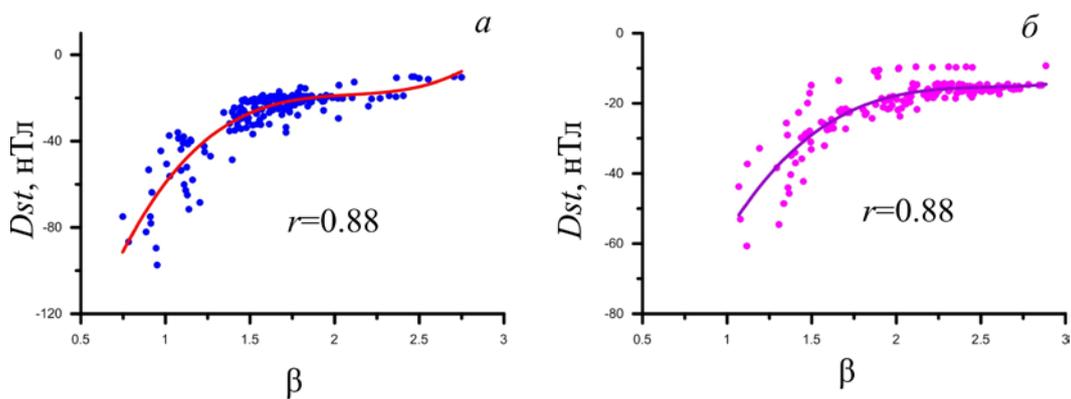


Рис. 6. Зависимость усредненных значений Dst -индекса от средней величины β -параметра в ходе развития бурь с внезапным (а) и постепенным (б) началом

2014]. Аналогичные результаты получены в работе [Šafránková et al., 2021] по исследованию связи турбулентности СВ с величиной параметра β . От величины плазменного параметра β зависит степень турбулентности СВ, магнитослоя и хвоста магнитосферы [Borovsky, Funsten, 2003]. Таким образом, параметр β может быть некой интегральной характеристикой турбулентности межпланетной плазмы, которая так или иначе оказывает влияние на развитие геомагнитных бурь. В свою очередь, согласно [Antonova, 2002; Borovsky, Funsten, 2003; D'Amicis et al., 2010], турбулентность межпланетной плазмы влияет на эффективность процессов взаимодействия СВ с магнитосферой Земли, следствием которых являются геомагнитные возмущения.

Традиционно считается, что доминирующим механизмом возникновения геомагнитных возмущений является пересоединение межпланетного и геомагнитного полей при появлении интенсивной южной компоненты ММП. При этом возникают крупномасштабные электрические поля, которые обеспечивают поступление энергии потока СВ внутрь магнитосферы. В работе [Пулинец и др., 2012] отмечается, что магнитосфера Земли взаимодействует непосредственно не с плазмой СВ, а с плазмой магнитослоя, характерной особенностью которого является высокий уровень турбулентности. Именно турбулентные эффекты магнитослоя определяют во многом динамику процессов на магнитопаузе и формирование крупномасштабной магнитосферной конвекции. В то же время механизм возбуждения конвекции, рассмотренный в работе [Antonova, 2004], не требует проникновения электрического поля СВ внутрь магнитосферы в результате процессов крупномасштабного пересоединения. Таким образом, роль электрического поля (возникающего при переориентации B_z -компоненты ММП) в процессах поступления энергии в магнитосферу во время развития бурь не так однозначна, как представлялось. По нашему мнению, роль, аналогичную роли крупномасштабного электрического поля во время развития бурь, вполне может играть параметр β , учитывая тот факт, что его динамика практически совпадает с Dst -вариацией и отражает уровень турбулентности космической плазмы.

Исходя из наших экспериментальных данных, можно предположить, что геомагнитные бури достигают наибольшей интенсивности при вполне определенном уровне турбулентности плазмы СВ. При $\beta \sim 1$ устанавливается баланс теплового и магнитного давления в магнитосфере, что является благоприятным условием формирования главной фазы развития бури. Когда тепловое давление начинает превышать магнитное, магнитосфера приходит в спокойное состояние. Ни в коей мере не отрицая роли B_z -компоненты и связанной с ней E_y -компоненты электрического поля СВ, а также других параметров межпланетной среды, мы хотели обратить внимание на возможное влияние параметра β на процессы развития геомагнитных бурь. Вероятность того, что другие ключевые параметры межпланетной среды влияют на продолжительность фазы восстановления

геомагнитной бури, существенно меньше. Таким образом, проведенное исследование позволило выявить новые факты, которые необходимо учитывать при моделировании процесса развития бурь (Dst -вариации) и его интерпретации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместный анализ межпланетных параметров и Dst -индекса, отражающего развитие геомагнитных бурь, показал, что из всех параметров СВ и ММП динамика Dst -индекса, независимо от типа начала бурь и их интенсивности, подобна динамике параметра β . Наибольшее количество бурь в цикле солнечной активности наблюдалось в годы минимальных средних значений параметра β (близких по величине к 1). Продолжительность фазы восстановления бури следует за характерным временем восстановления β -параметра. Интенсивность бурь с внезапным и постепенным началом определяется величиной параметра β . Установлено, что на главной фазе бури величина β -параметра близка к 1, что отражает максимальный уровень турбулентных флуктуаций плазмы СВ. До начала бури и на фазе восстановления β изменяется в диапазоне ~ 2 – 3.5 . Предполагается, что турбулентность плазмы СВ, характеризуемая величиной параметра β , может играть значительную роль в процессе развития геомагнитных бурь.

Авторы выражают благодарность за возможность использования каталогов геомагнитных бурь (Мировой центр данных по солнечно-земной физике, Москва), Kakioka Magnetic Observatory (Япония) и базы данных OMNI2 (Goddard Space Flight Center, NASA, USA).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Часть 2. М.: Мир, 1975. 512 с.
- Веселовский И.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Алгебра и статистика солнечного ветра. *Космические исследования*. 2010. Т. 48, № 2. С. 115–130.
- Дремухина Л.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Динамика межпланетных параметров и геомагнитных индексов в периоды магнитных бурь, инициированных разными типами солнечного ветра. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59, № 6. С. 683–695. DOI: 10.1134/S0016794019060063.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям. *Космические исследования*. 2007. Т. 45, № 1. С. 3–11.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. *Космические исследования*. 2009. Т. 47, № 2. С. 99–113.
- Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури. *Космические исследования*. 2010. Т. 48, № 6. С. 499–515.
- Зотов О.Д., Клайн Б.И. Триггерный режим в динамике магнитосферы // Триггерные эффекты в геосистемах: ма-

териалы IV Всероссийской конференции с международным участием (Москва, 6–9 июня 2017 г.) / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Мочаряна. М.: ГЕОС, 2017. С. 442–449.

Зотов О.Д., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Особенности динамики магнитосферы в цикле солнечной активности // Проблемы геокосмоса. Материалы 12-й международной школы-конференции. Санкт-Петербург, Петергоф. 8–12 октября 2018 г. / Отв. редакторы Н.Ю. Бобров, Н.В. Золотова, А.А. Костеров, Т.Б. Яновская. СПб.: Изд-во ВВМ, 2018. С. 320–325.

Зотов О.Д., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Влияние параметра β солнечного ветра на статистические характеристики A_p -индекса в цикле солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 4. С. 55–63. DOI: [10.12737/szf-54201906](https://doi.org/10.12737/szf-54201906).

Куражковская Н.А. Глобальная возмущенность магнитосферы 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).

Обридко В.Н., Канониди Х.Д., Митрофанова Т.А., Шельтинг Б.Д. Солнечная активность и геомагнитные возмущения. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2013. Т. 53, № 2. С. 157–166. DOI: [10.7868/S0016794013010148](https://doi.org/10.7868/S0016794013010148).

Пулинец М.С., Рязанцева М.О., Антонова Е.Е., Кирпичев И.П. Зависимость параметров магнитного поля вблизи подсолнечной точки магнитосферы от межпланетного магнитного поля по данным эксперимента THEMIS. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2012. Т. 52, № 6. С. 769–778.

Чернышов А.А., Карельский К.В., Петросян А.С. Подсеточное моделирование для исследования сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности космической плазмы. *УФН*. 2014. Т. 184, № 5. С. 457–492. DOI: [10.3367/UFNr.0184.201405a.0457](https://doi.org/10.3367/UFNr.0184.201405a.0457).

Antonova E.E. Magnetostatic equilibrium and turbulent transport in Earth's magnetosphere: A review of experimental observation data and theoretical approaches. *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. 2002. Vol. 3, no. 2. P. 117–130.

Antonova E.E. Magnetostatic equilibrium and current systems in the Earth's magnetosphere. *Adv. Space Res.* 2004. Vol. 33. P. 752–760. DOI: [10.1016/S0273-1177\(03\)00636-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00636-7).

Borovsky J.E., Funsten H.O. Role of solar wind turbulence in the coupling of the solar wind to the Earth's magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, iss. A6, 1246. DOI: [10.1029/2002JA009601](https://doi.org/10.1029/2002JA009601).

Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, iss. A7, A07S08. DOI: [10.1029/2005JA011447](https://doi.org/10.1029/2005JA011447).

Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst*. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. P. 4204–4214. DOI: [10.1029/JA080i031p04204](https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204).

D'Amicis R., Bruno R., Bavassano B. Geomagnetic activity driven by solar wind turbulence. *Adv. Space Res.* 2010. Vol. 46. P. 514–520. DOI: [10.1016/j.asr.2009.08.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.08.031).

Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Gonzalez A.L. Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during solar cycle 23 (1996–2006). *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, iss. A5, A05221. DOI: [10.1029/2007JA012744](https://doi.org/10.1029/2007JA012744).

Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99, no. A4. P. 5771–5792. DOI: [10.1029/93JA02867](https://doi.org/10.1029/93JA02867).

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 88. P. 529–562. DOI: [10.1023/A:1005160129098](https://doi.org/10.1023/A:1005160129098).

Guo J., Feng X., Zhang J., et al. Statistical properties and geoefficiency of interplanetary coronal mass ejections and

their heaths during intense geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115, A09107. DOI: [10.1029/2009JA015140](https://doi.org/10.1029/2009JA015140).

Haines C., Owens M.J., Barnard L., et al. The variation of geomagnetic storm duration with intensity. *Solar Phys.* 2019. Vol. 294, 154. DOI: [10.1007/s11207-019-1546-z](https://doi.org/10.1007/s11207-019-1546-z).

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).

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. Vol. 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. Vol. 102, no. A7. P. 14209–14213. DOI: [10.1029/96JA04020](https://doi.org/10.1029/96JA04020).

Lyatsky W., Tan A. Solar wind disturbances responsible for geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, iss. A3, 1134. DOI: [10.1029/2001JA005057](https://doi.org/10.1029/2001JA005057).

Šafránková J., Němeček Z., Němec F., et al. Anisotropy of magnetic field and velocity fluctuations in the solar wind. *Astrophys. J.* 2021. Vol. 913, no. 2, 80. 12 p. DOI: [10.3847/1538-4357/abf6c9](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abf6c9).

Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., et al. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A07S01. DOI: [10.1029/2005JA011273](https://doi.org/10.1029/2005JA011273).

Vennerstroem S. Interplanetary sources of magnetic storms: A statistical study. *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106, no. A12. P. 29,175–29,184. DOI: [10.1029/2001JA000004](https://doi.org/10.1029/2001JA000004).

Vichare G., Alex S., Lakhina G.S. Some characteristics of intense geomagnetic storms and their energy budget. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. A03204. DOI: [10.1029/2004JA010418](https://doi.org/10.1029/2004JA010418).

Wang X., Tu C.-Y., He J.-S., Wang L.-H. Ion-scale spectral break in the normal plasma beta range in the solar wind turbulence. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123. P. 68–75. DOI: [10.1002/2017JA024813](https://doi.org/10.1002/2017JA024813).

Wu C.-C., Lepping R.P. Effect of solar wind velocity on magnetic cloud-associated magnetic storm intensity. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, iss. A11, 1346. DOI: [10.1029/2002JA009396](https://doi.org/10.1029/2002JA009396).

Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. Specific interplanetary conditions for CIR-, Sheath-, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis. *Ann. Geophys.* 2010. Vol. 28. P. 2177–2186. DOI: [10.5194/angeo-28-2177-2010](https://doi.org/10.5194/angeo-28-2177-2010).

Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Dremukhina L.A., et al. What solar-terrestrial link researchers should know about interplanetary drivers. *Universe*. 2021. Vol. 7, 138. DOI: [10.3390/universe7050138](https://doi.org/10.3390/universe7050138).

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. Vol. 111, A01104. DOI: [10.1029/2005JA011065](https://doi.org/10.1029/2005JA011065).

URL: https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni (дата обращения 8 сентября 2020 г.).

URL: http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_storms.ru.html (дата обращения 8 сентября 2020 г.).

URL: <http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/data-viewer> (дата обращения 19 января 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Куражковская Н.А., Зотов О.Д., Клайн Б.И. Связь развития геомагнитных бурь с параметром β солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 25–34. DOI: [10.12737/szf-74202104](https://doi.org/10.12737/szf-74202104).