

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.012

ГЕОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОСФЕРНОГО КОЛЬЦЕВОГО ТОКА И ПЛАЗМЕННЫЙ ПАРАМЕТР β СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Г.А. Макаров

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия; e-mail: gmakarov@ikfia.ysn.ru

Аннотация. По среднегодовым значениям рассмотрены связи геомагнитных индексов Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ с плазменным параметром β солнечного ветра в период с 1981 по 2015 гг. Получено, что с ростом солнечной активности уменьшается параметр β , что означает повышение магнитного давления солнечного ветра и, соответственно, увеличение геомагнитной активности вследствие роста уровня турбулентности солнечного ветра. Установлено, что индексы зависят от параметра β : их абсолютные величины уменьшаются с ростом β независимо от знака северо-южной компоненты межпланетного магнитного поля. Уменьшение индексов с ростом β происходит, вероятно, из-за перехода магнитосферы в спокойное состояние вследствие возрастающего преобладания в солнечном ветре теплового давления над магнитным давлением и уменьшения уровня турбулентности солнечного ветра.

1. Введение

Геомагнитные индексы Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ разработаны для характеристики магнитосферного кольцевого тока. Dst отражает интенсивность кольцевого тока [Sugiura and Kamei, 1991], индексы $SYM-H$ и $ASY-H$ позволяют выделять симметричную и асимметричную компоненты кольцевого тока [Iyemori et al., 1992]. Подробно методика определения индекса Dst приведена в работе [Sugiura and Kamei, 1991], а индексов $SYM-H$ и $ASY-H$ в работе [Iyemori et al., 2010]. В настоящее время выявлены вклады в индексы Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$, кроме кольцевого тока, также токов магнитопаузы, хвоста магнитосферы и продольных токов [Alexeev et al., 1996; Maltsev et al., 1996; Kalegaev et al., 2005; Tsyganenko and Sitnov, 2005].

Связь между индексами $SYM-H$, $SYM-D$, $ASY-H$, $ASY-D$ и межпланетными параметрами по одноминутным данным рассмотрена в работах [Weygand and McPherron, 2006] и [Iyemori et al., 2010], авторы которых выявили, что в значениях индексов наблюдаются смещения. Согласно определению, данному в этих работах, смещение — это ненулевое значение индекса при магнитно-спокойных условиях. Было предположено, что смещения представляют собой суммарный вклад кольцевого тока и токовых систем магнитопаузы и хвоста, присутствующих в магнитосфере в спокойные от магнитных бурь периоды. В [Singh et al., 2013] исследовано влияние плавно и резко изменяющихся условий северо-южной компоненты ММП на низкоширотные индексы $ASY-H$ и $ASY-D$ во время магнитных суббурь. В [Shi et al., 2006] обнаружено, что при отрицательной северо-южной компоненте ММП повышение динамического давления солнечного ветра дополнительно увеличивает асимметрию кольцевого тока. Результаты также показывают, что возмущения горизонтальной составляющей геомагнитного поля на средних широтах вокруг местного полудня или полуночи, а также индекса $ASY-H$ часто содержат значительный вклад продольных токов. В [Макаров, 2022] на большом статистическом материале были рассмотрены зависимости индексов $SYM-H$ и $ASY-H$ от ключевых межпланетных параметров и получено, что при описании связи $ASY-H$ и $SYM-H$ с северо-южной компонентой ММП необходимо учитывать вклад модуля ММП.

Изменения геомагнитных возмущений и межпланетных параметров в цикле солнечной активности многократно были предметом исследований, и их основные закономерности хорошо известны (см., например, [Обридко и др., 2013; Richardson et al., 2000; Yermolaev et al., 2018]). В работе [Куражковская, 2020] обращено внимание на роль β -параметра солнечного ветра в развитии геомагнитной бури. Параметр β представляет собой отношение теплового давления в солнечном ветре к магнитному. В [Куражковская и др., 2021] установлена нелинейная связь индекса Dst от средней величины β в ходе развития магнитных бурь. В [Ермолаев и др., 2009] предложено использовать параметр β для идентификации разных типов потоков солнечного ветра.

В настоящей работе рассматривается зависимость индексов $SYM-H$ и $ASY-H$, а также Dst от северо-южной компоненты ММП и параметра β по среднегодовым значениям.

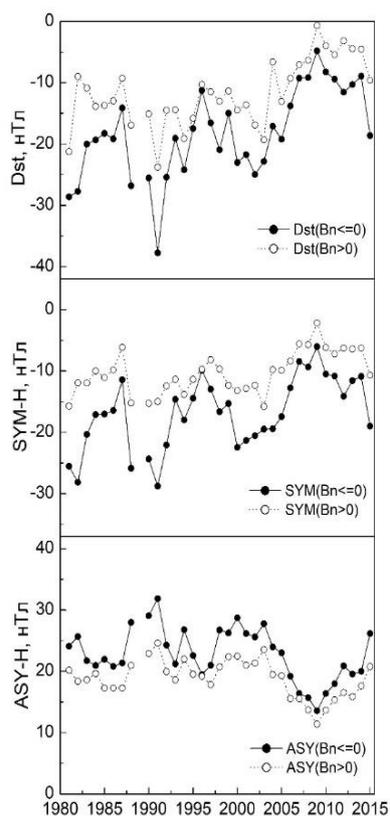


Рисунок 1. Изменения геомагнитных индексов Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ в период 1981-2015 гг., когда $B_n \leq 0$ (сплошные линии), и когда $B_n > 0$ (пунктирные линии).

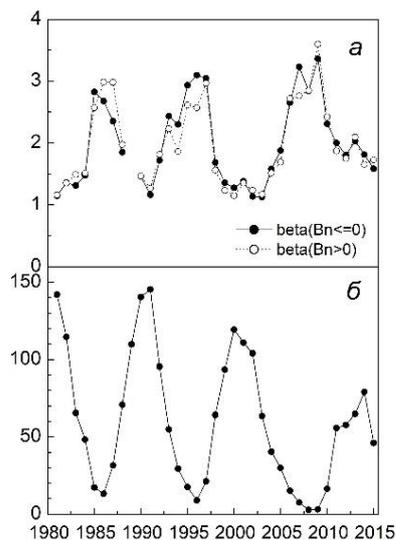


Рисунок 2. Изменения параметра β (а), и числа солнечных пятен Ri (б) в период 1981-2015 гг., когда $B_n \leq 0$ (сплошные линии), и когда $B_n > 0$ (пунктирные линии).

2. Используемые экспериментальные данные

В работе рассматриваются вариации среднегодовых значений геомагнитных индексов Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ и межпланетных параметров в период с 1981 по 2015 годы. Сведения об индексах взяты из Мирового центра данных по геомагнетизму (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>), а о солнечном ветре и числе солнечных пятен из Центра данных космической физики НАСА (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) в этой базе данных представлены в системе координат RTN .

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены изменения среднегодовых значений геомагнитных индексов Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ для случаев противоположных знаков северо-южной B_n -компоненты ММП – когда $B_n \leq 0$ и когда $B_n > 0$. Отчетливо видно, что при $B_n \leq 0$ значения всех 3-х индексов по абсолютной величине заметно больше, чем при $B_n > 0$ в течение всего периода. Этот факт большей геоэффективности межпланетного магнитного поля (ММП) с $B_n \leq 0$ хорошо известен.

Сравнение вариаций каждого индекса для случаев $B_n \leq 0$ и $B_n > 0$ на рис. 1 показывает, что они подобны и коэффициенты их корреляции высоки: для Dst $r = 0.871$, $SYM-H$ $r = 0.863$, $ASY-H$ $r = 0.943$. Аналогично при разных знаках B_n ММП изменяются среднегодовые значения ключевых параметров солнечного ветра V , B , B_n . Исходя из этого, вероятно, что подобие вариаций индексов при разных знаках B_n обусловлено их связью с числом солнечных пятен.

Сопоставление годовых изменений геомагнитных индексов (рис. 1) и числа солнечных пятен Ri (рис. 2, б) показывает, что Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ меняются относительно Ri одинаковым образом, то есть их наибольшие возмущения наблюдаются в годы максимума солнечной активности. Кросс-корреляционный анализ по выявлению сдвигов между временными рядами геомагнитных индексов без разделения данных по знаку B_n -компоненты ММП относительно ряда чисел солнечных пятен Ri показал, что, действительно, изменения всех трех индексов и Ri происходят практически синхронно. Так, например, при сдвиге ряда индекса Dst на 1 год влево относительно ряда Ri коэффициент корреляции $r = -0.638$, без сдвига $r = -0.637$, на 1 год вправо $r = -0.380$, на 2 года вправо $r = -0.122$; при сдвиге ряда $SYM-H$ получаются следующие r : -0.762 , -0.762 , -0.520 , -0.224 соответственно; при сдвиге ряда $ASY-H$ имеем 0.642 , 0.703 , 0.576 , 0.322 соответственно. Ранее связь индекса Dst с солнечной активностью была подробно исследована в работах [Echer et al., 2011; Yermolaev et al., 2013] при изучении развития геомагнитных бурь. В [Echer et al., 2011] получено, что геомагнитные бури имеют двухпиковое распределение: один пик близок к солнечному максимуму, а другой – в начале фазы спада, в [Yermolaev et al., 2013] показано, что возникновение магнитных бурь определяется различными типами межпланетных структур.

На рис. 2 представлены также изменения параметра β (а), характеризующего соотношение тепловой и магнитной энергий в солнечном ветре при разных знаках B_n ММП. Можно видеть, что изменения β практически совпадают и коэффициент их взаимной корреляции $r = 0.946$. Параметр β тесно коррелирует с числом солнечных пятен Ri , при сравнении изменений между β и Ri вне зависимости от направления ММП $r = -0.828$, то есть β и Ri изменяются в противофазе. Получено уравнение регрессии

$\beta = -0.013 \cdot Ri + 2.755$: с ростом числа солнечных пятен Ri параметр β уменьшается. Уменьшение β отражает рост магнитного давления в солнечном ветре и, соответственно, рост уровня геомагнитной активности. Отметим, что значения β больше 1 и это, вероятно, указывает на превышение теплового давления над магнитным давлением при долговременном осреднении характеристик солнечного ветра. В годы большой солнечной активности растет B и, соответственно, уменьшается параметр β . Уменьшение β отражает возрастание магнитного давления и, соответственно, максимальную турбулентность плазмы солнечного ветра. Такая закономерность описана в работах [Куражковская и др., 2021, Куражковская и Куражковский, 2023].

На рис. 3 показаны зависимости индексов от параметра β при противоположных знаках Bn ММП и приведены коэффициенты корреляции r между индексами и β . Видно, что все три индекса при южном ММП заметно больше по величине, чем при северном. Видно также, что абсолютные величины индексов уменьшаются по абсолютной величине с ростом β независимо от знака Bn ММП. Наиболее тесные связи с β проявляют $SYM-H$ и $ASY-H$ индексы, при этом $SYM-H$ сильнее зависит от β при $Bn \leq 0$ ($r = 0.744$), чем при $Bn > 0$ ($r = 0.677$), а $ASY-H$, наоборот, более выраженно связан с β при $Bn > 0$ ($r = -0.741$), чем при $Bn \leq 0$ ($r = -0.719$). Индекс Dst , аналогично $SYM-H$, но в меньшей степени, заметно коррелирует с β при $Bn \leq 0$ ($r = 0.629$) и слабее при $Bn > 0$ ($r = 0.456$). Уменьшение индексов по абсолютной величине с ростом β , вероятно, происходит из-за возрастающего преобладания в солнечном ветре теплового давления над магнитным давлением.

Графики на рис. 3 можно аппроксимировать линейными функциями: при $Bn \leq 0$ $Dst = 6.59 \cdot \beta - 31.45$, $SYM-H = 6.29 \cdot \beta - 29.46$, $ASY-H = -4.44 \cdot \beta + 31.71$, при $Bn > 0$ $Dst = 3.69 \cdot \beta - 18.92$, $SYM-H = 3.47 \cdot \beta - 17.14$, $ASY-H = -3.34 \cdot \beta + 25.45$. Коэффициенты регрессии в уравнениях индексов $SYM-H$ и Dst при $Bn \leq 0$ примерно в 1.8 раза больше, чем при $Bn > 0$. Такое соотношение коэффициентов регрессии можно понимать как то, что симметричная компонента кольцевого тока при переходе от возмущенного состояния магнитосферы в наиболее спокойное, то есть при повышении β , ослабевает сильнее при $Bn \leq 0$, чем при $Bn > 0$. В случае индекса $ASY-H$ соотношение коэффициентов различается в 1.3 раза и при $Bn \leq 0$ асимметричная компонента кольцевого тока при переходе магнитосферы в спокойное состояние также ослабевает быстрее, чем при $Bn > 0$, но с меньшей скоростью, чем симметричная компонента. Подобные соотношения получаются и для свободных членов уравнений регрессии индексов и β .

Полученная в настоящей работе зависимость Dst от β в общем виде согласуется с результатом [Куражковская и др., 2021], учитывая то обстоятельство, что мы оперировали среднегодовыми значениями данных, когда при суммировании нивелируются эффекты фаз бури и межпланетных потоков разных типов. В

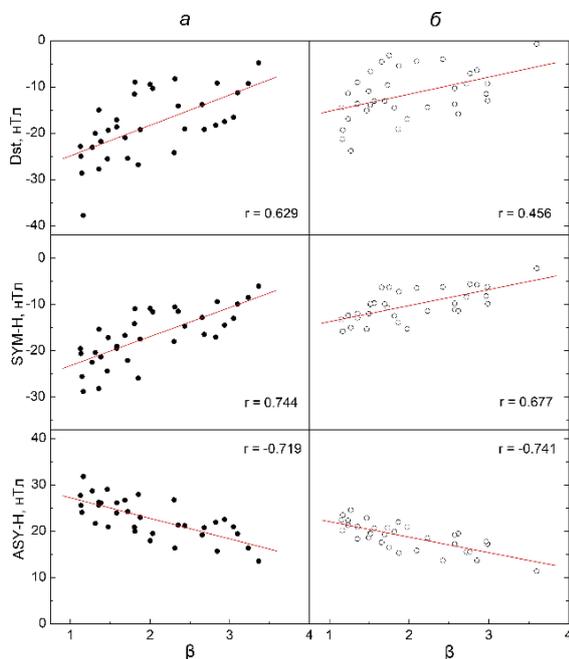


Рисунок 3. Зависимости индексов Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ от параметра β при $Bn \leq 0$ (а) и $Bn > 0$ (б), r – коэффициенты линейной корреляции.

цитируемой работе по среднечасовым данным установлено подобие динамики Dst и β в процессе развития геомагнитных бурь с постепенными и внезапными началами и показано, что между Dst и β связь имеет нелинейный характер.

4. Заключение

Исследование связей геомагнитных индексов Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ по их среднегодовым значениям с параметрами солнечного ветра в период с 1981 по 2015 гг. показало, что они соответствуют известным закономерностям: при южном направлении ($Bn \leq 0$) межпланетного магнитного поля (ММП) среднегодовые значения геомагнитных индексов Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ по абсолютной величине заметно больше, чем при северном направлении ($Bn > 0$) ММП в течение всего рассмотренного периода. Этот факт большей геоэффективности ММП с $Bn \leq 0$ хорошо известен. Здесь получено, что при $Bn \leq 0$ индекс Dst по величине в среднем в 1.8 раза, индекс $SYM-H$ в 1.7 раза, а индекс $ASY-H$ в 1.2 раза, больше, чем при $Bn > 0$; как и ожидалось, среднегодовые значения индекса $SYM-H$, подобно Dst , изменяются относительно числа солнечных пятен Ri в противофазе, а $ASY-H$ синфазно – экстремумы индексов наблюдаются в годы максимумов и минимумов Ri ; с ростом солнечной активности уменьшается параметр β , что означает повышение магнитного давления солнечного ветра и, соответственно, увеличение геомагнитной активности вследствие роста уровня турбулентности солнечного ветра.

Основные результаты настоящей работы:

Получено, что вариации среднегодовых значений каждого из индексов Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ при южном и северном направлениях ММП подобны и коэффициенты их корреляции высоки: для Dst $r = 0.871$, для $SYM-H$ $r = 0.863$, для $ASY-H$ $r = 0.943$. Подобие вариаций индексов при разных знаках Vn обусловлено, вероятно, их связью с числом солнечных пятен.

Установлено, что индексы $SYM-H$ и $ASY-H$ зависят от параметра β солнечного ветра и их абсолютные величины уменьшаются с ростом β независимо от знака северо-южной компоненты межпланетного магнитного поля. Уменьшение индексов с ростом β происходит, вероятно, из-за перехода магнитосферы в спокойное состояние вследствие возрастающего преобладания в солнечном ветре теплового давления над магнитным давлением и уменьшения уровня турбулентности солнечного ветра.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации 122011700182-1).

Литература

- 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.
- 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
- 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
- Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю. Эффект гистерезиса между индексами геомагнитной активности (Ap , Dst) и параметрами межпланетной среды в 21–24 циклах солнечной активности // *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 73–82. DOI: 10.12737/szf-93202308
- Макаров Г.А. Геомагнитные индексы $ASYH$ и $SYMH$ и их связь с межпланетными параметрами // *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 4. С. 38–45. DOI: 10.12737/szf-84202203
- 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
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., Feldstein Y.I., Grafe A. Magnetic storms and magnetotail currents // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, No. A4. P. 7737–7747. <https://doi.org/10.1029/95JA03509>
- Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Statistical studies of geomagnetic storms with peak $Dst \leq -50$ nT from 1957 to 2008 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2011. Vol. 73. P. 1454–1459. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.04.021>
- Iyemori T., Araki T., Kamei T., Takeda M. Mid-latitude geomagnetic indices ASY and SYM (provisional) // *Data Anal. Cent. For Geomagn. and Space Magn.* 1992. Faculty of Sci., Kyoto Univ., Kyoto, Japan.
- Iyemori T., Takeda M., Nose M., et al. Mid-latitude geomagnetic indices “ ASY ” and “ SYM ” for 2009 (Provisional). Internal Report of Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism. Kyoto University, Japan, 2010. Available at <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf> (дата обращения 5 октября 2021 г.).
- Kalegaev V.V., Ganushkina N.Y., Pulkkinen T.I., Kubyshkina M.V., Singer H.J., Russell C.T. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms // *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 523–533. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-523-2005>
- Maltsev Y.P., Arykov A.A., Belova E.G., Gvozdevsky B.B., Safargaleev V.V. Magnetic flux redistribution in the storm time magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, No. A4. P. 7697–7704.
- Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V. Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, No. A8. P. 18,203–18,213. <https://doi.org/10.1029/1999JA000400>
- Shi Y., Zesta E., Lyons L.R., et al. Statistical study of effect of solar wind dynamic pressure enhancements on dawn-to-dusk ring current asymmetry // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. A10216. <https://doi.org/10.1029/2005JA011532>
- Singh A.K., Sinha A.K., Pathan B.M., Rajaram R., Rawat R. Effect of prompt penetration on the low latitude ASY indices // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2013. Vol. 94. P. 34–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.12.015>
- Sugiura M., Kamei T. Equatorial Dst index 1957–1986 // *IAGA Bull.* 1991. No. 40. 14 p.
- Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. A03208. <https://doi.org/10.1029/2004JA010798>
- Weygand J.M., McPherron R.L. Dependence of ring current asymmetry on storm phase // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. A11221. <https://doi.org/10.1029/2006JA011808>
- Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. Occurrence rate of extreme magnetic storms // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2013. Vol. 118. P. 4760–4765. <https://doi.org/10.1002/jgra.50467>
- Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y., Riazantseva M.O., Rakhmanova L.S. Statistic study of the geoeffectiveness of compression regions CIRs and Sheaths // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2018. Vol. 180. P. 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.01.027>
- URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 29 марта 2022 г.)
- URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html> (дата обращения 29 марта 2022 г.)