

## КРУПНОМАСШТАБНЫЕ СВЯЗИ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДЕКСОВ *SYM-H* И *ASY-H* С СЕВЕРО-ЮЖНОЙ КОМПОНЕНТОЙ ММП И БЕТА-ПАРАМЕТРОМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

### LARGE-SCALE RELATIONSHIPS OF THE GEOMAGNETIC INDICES *SYM-H* AND *ASY-H* WITH THE NORTH-SOUTH IMF COMPONENT AND THE SOLAR WIND BETA PARAMETER

**Г.А. Макаров**

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

**G.A. Makarov**

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and  
Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, gmakarov@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** По среднегодовым значениям рассмотрены связи геомагнитных индексов *SYM-H*, *ASY-H*, а также *Dst* с параметрами солнечного ветра (СВ) в 1981–2015 гг. Используемые данные были разделены на две выборки по знаку северо-южной компоненты  $B_n$  межпланетного магнитного поля (ММП). Получено, что вариации среднегодовых значений каждого из индексов *Dst*, *SYM-H* и *ASY-H* при южном и северном направлениях ММП подобны и коэффициенты их линейной корреляции  $r$  высоки: 0.871, 0.863 и 0.943 соответственно. Подобие вариаций индексов при разных знаках  $B_n$  обусловлено, вероятно, их связью с числом солнечных пятен. Установлено, что *Dst*, *SYM-H* и *ASY-H* зависят от параметра  $\beta$  СВ: их абсолютные величины уменьшаются с ростом  $\beta$  независимо от знака  $B_n$ . Это, вероятно, обусловлено переходом магнитосферы в спокойное состояние вследствие возрастающего преобладания в СВ теплового давления над магнитным давлением и уменьшения уровня турбулентности. Обнаружено, что наиболее тесные связи с  $\beta$  проявляют *SYM-H* и *ASY-H*, при этом *SYM-H* сильнее зависит от  $\beta$  при южном ММП ( $r=0.744$ ), чем при северном ( $r=0.677$ ). Наоборот, для *ASY-H*  $r=-0.741$  при северном ММП и  $-0.719$  при южном. Аналогично *SYM-H* *Dst* (в меньшей степени) заметно коррелирует с  $\beta$  при южном ММП ( $r=0.629$ ) и слабее при северном ( $r=0.456$ ).

**Ключевые слова:** геомагнитные индексы *Dst*, *SYM-H* и *ASY-H*, геомагнитная активность, магнитосферный кольцевой ток, межпланетные параметры.

**Abstract.** Using annual average values, the relationships are examined of the geomagnetic indices *SYM-H*, *ASY-H*, and *Dst* with solar wind parameters in 1981–2015. The data used was divided into two samples according to the sign of the north-south component  $B_n$  of the interplanetary magnetic field (IMF). Variations in the annual average values of each of the *Dst*, *SYM-H*, and *ASY-H* indices for southward and northward IMF have been found to be similar and their linear correlation coefficients  $r$  to be high: 0.871, 0.863, and 0.943 respectively. The similarity between variations of the indices with different signs of  $B_n$  is probably due to their connection with the number of sunspots. It has been established that *Dst*, *SYM-H*, and *ASY-H* depend on the solar wind parameter  $\beta$ : their absolute values decrease with increasing  $\beta$ , regardless of  $B_n$  sign. The decrease in the indices with increasing  $\beta$  is likely to be caused by the transition of the magnetosphere to a quiet state due to the increasing predominance of thermal pressure over magnetic one in the solar wind and a decrease in the level of solar wind turbulence. *SYM-H* and *ASY-H* have been found to reveal the closest relationships with  $\beta$ , whereas *SYM-H* more strongly depends on  $\beta$  for southward IMF ( $r=0.744$ ) than for northward IMF ( $r=0.677$ ). On the contrary, for *ASY-H*  $r=-0.741$  at northward IMF and  $r=-0.719$  at southward IMF. Similar to *SYM-H*, *Dst* (to a lesser extent) significantly correlates with  $\beta$  at southward IMF ( $r=0.629$ ) and weaker at northward IMF ( $r=0.456$ ).

**Keywords:** geomagnetic indices *Dst*, *SYM-H*, and *ASY-H*, geomagnetic activity, magnetospheric ring current, interplanetary parameters.

## ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные индексы *Dst*, *SYM-H* и *ASY-H* используются для характеристики магнитосферного кольцевого тока: *Dst* отражает его интенсивность [Sugiura, Kamei, 1991], *SYM-H* и *ASY-H* позволяют выделять симметричную и асимметричную компоненты [Yumori et al., 1992]. Подробно методика определения *Dst* приведена в [Sugiura, Kamei, 1991], а *SYM-H*

и *ASY-H* — в [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>]. Важно отметить, что *SYM-H* представляет собой по сути усредненные отклонения  $H$ - и  $D$ -составляющих геомагнитного поля от спокойного уровня на станциях наблюдения с поправкой на геомагнитную широту, в то время как *ASY-H* определяется как диапазон между максимальными и минимальными значениями  $H$ - и  $D$ -составляющих после вычета из поля

возмущения соответствующих симметричных частей. Как правило,  $SYM-H$  имеет отрицательные значения подобно  $Dst$ , а  $ASY-H$  всегда положителен.

В настоящее время определены вклады в  $Dst$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$ , кроме кольцевого тока, также токов магнитопаузы, хвоста магнитосферы и продольных токов [Alexeev et al., 1996; Maltsev et al., 1996; Greenspan, Hamilton, 2000; Kalegaev et al., 2005; Dubyagin et al., 2014; Tsyganenko, Sitnov, 2005].

Хорошо известна сильная зависимость геомагнитной активности от скорости солнечного ветра (СВ), модуля, южной и азимутальной компонент, а также изменчивости межпланетного магнитного поля (ММП). В качестве геоэффективных характеристик рассматриваются межпланетное электрическое поле, поток электромагнитной энергии СВ, а также различные комбинации параметров межпланетной среды. Подробные обзоры современного состояния влияния межпланетных параметров на геомагнитную активность можно найти, в частности, в [Newell et al., 2007; Liemohn et al., 2018, Lockwood, McWilliams, 2021].

Связь между  $SYM-H$ ,  $SYM-D$ ,  $ASY-H$ ,  $ASY-D$  и межпланетными параметрами по одномоментным данным рассмотрена в работах [Weygand, McPherron, 2006; <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>], авторы которых обнаружили смещения в значениях индексов. Согласно определению, данному в этих работах, смещение — это ненулевое значение индекса при магнитоспокойных условиях. Было сделано предположение, что смещения представляют собой суммарный вклад кольцевого тока и токовых систем магнитопаузы и хвоста, присутствующих в магнитосфере в спокойные от магнитных бурь периоды. В [Макаров, 2021] получены оценки величин смещений в  $SYM-H$  и  $ASY-H$  для условий  $Dst \geq 0$  и при рассмотрении их регрессионных соотношений с  $Dst$ .

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 СВ дополнительно увеличивает асимметрию кольцевого тока. Результаты показывают также, 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 [Haidusek et al., 2017] на основе системы SWMF был смоделирован прогноз геомагнитных индексов  $K_p$ ,  $SYM-H$ ,  $AL$  и обнаружено, что модель отлично справляется с предсказанием  $SYM-H$  со среднеквадратичной ошибкой 17–18 нТл. В [Bhaskar, Vichare, 2019] на основе искусственной нейронной сети реализован успешный прогноз  $SYM-H$  и  $ASY-H$  во время девяти геомагнитных бурь 24-го солнечного цикла. В качестве входных данных использовались скорость и плотность СВ, а также ММП. Во время главной фазы сильных бурь отмечаются заметные отклонения, что указывает на влияние внутренних факторов, таких как магнитосферные процессы. В [Макаров, 2022] на большом статистическом материале

были рассмотрены зависимости  $SYM-H$  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.

Многие исследования были посвящены изменениям геомагнитных возмущений и межпланетных параметров в солнечном цикле. Основные закономерности таких изменений хорошо известны (см., например, [Обридко и др., 2013; Richardson et al., 2000; Yermolaev et al., 2018]). В [Куражковская, 2020] внимание уделяется роли  $\beta$ -параметра СВ в развитии геомагнитной бури. Параметр  $\beta$  представляет собой отношение теплового давления СВ к магнитному  $\beta = ((4.16T/10^5) + 5.34)N/B^2$ , где  $T$  — температура;  $N$  — плотность протонов;  $B$  — модуль ММП. В [Куражковская и др., 2021] установлена нелинейная связь  $Dst$  от средней величины  $\beta$  в ходе развития магнитных бурь. В [Ермолаев и др., 2009] предложено использовать  $\beta$  для идентификации потоков СВ разных типов.

В настоящей работе по среднегодовым значениям рассматривается зависимость  $SYM-H$ ,  $ASY-H$  и  $Dst$  от северо-южной компоненты ММП и параметра  $\beta$ .

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДААННЫЕ

Исследуются вариации среднегодовых значений геомагнитных индексов  $Dst$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$  и межпланетных параметров в 1981–2015 гг. Из рассмотрения исключены данные 1989 г. из-за отсутствия сведений об авроральных индексах, связь с которыми еще будет анализироваться. Сведения об индексах взяты с сайта Мирового центра данных по геомагнетизму [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>], а о солнечном ветре и числе солнечных пятен — Центра данных космической физики НАСА [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>]. Компоненты ММП в этой базе данных представлены в системе координат RTN: ось R направлена радиально от Солнца, ось T — в сторону вращения Солнца, а ось N является векторным произведением осей R и T. На нулевой гелиографической широте оси N и солнечного вращения параллельны. Системы координат RTN и GSE на околоземных расстояниях отличаются противоположными направлениями осей R и X, а также T и Y соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны изменения среднегодовых значений геомагнитных индексов  $Dst$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$  (а) для случаев противоположных знаков северо-южной  $B_n$ -компоненты ММП:  $B_n \leq 0$  и  $B_n > 0$ , а также отношения индексов ( $\delta$ ) для ситуации  $B_n \leq 0$  к ситуации  $B_n > 0$ . Видно, что при  $B_n \leq 0$  значения всех трех индексов по абсолютной величине заметно больше, чем при  $B_n > 0$  в течение всего периода. Этот факт большей геоэффективности ММП с  $B_n \leq 0$  хорошо известен (например, [Базаржапов и др., 1979]). Отмеченная закономерность наглядно видна на графиках отноше-

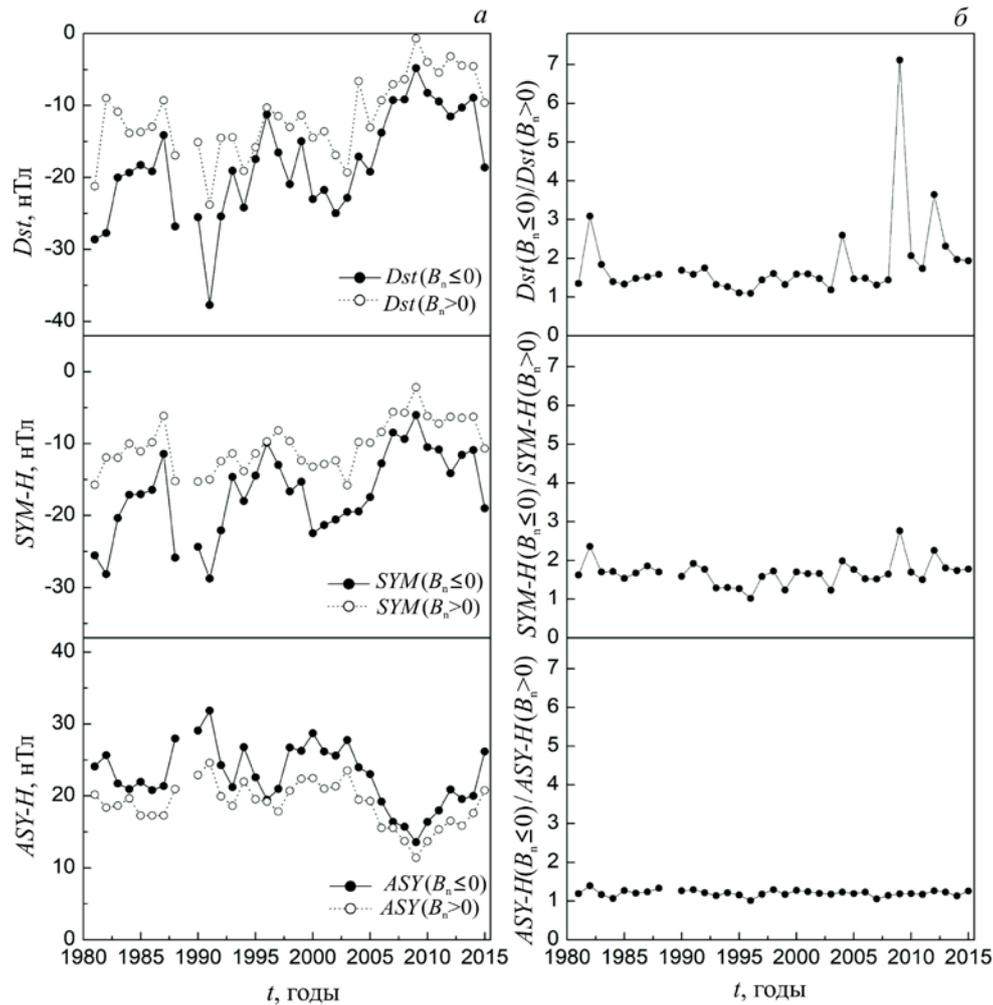


Рис. 1. Изменения среднегодовых значений геомагнитных индексов  $Dst$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$  в 1981–2015 гг. для случаев противоположных знаков  $B_n$  ММП:  $B_n \leq 0$  (сплошные линии),  $B_n > 0$  (пунктирные линии) (а); отношения индексов для  $B_n \leq 0$  и  $B_n > 0$  (б)

ний: отношения больше единицы, и при  $B_n \leq 0$   $Dst$  по величине в среднем в 1.8,  $SYM-H$  в 1.7,  $ASY-H$  в 1.2 раза больше, чем при  $B_n > 0$ . Резкий выброс отношения  $Dst$  (правая верхняя панель) обусловлен минимальным значением абсолютной величины этого индекса в 2009 г. при  $B_n > 0$ .

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  $Dst$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$   $r = 0.871 \pm 0.028$ ,  $0.863 \pm 0.029$  и  $0.943 \pm 0.013$  соответственно. Аналогично при разных знаках  $B_n$  ММП изменяются среднегодовые значения  $B$  ММП, коэффициент корреляции при их сравнении  $r = 0.973$ ; для северо-южной компоненты ММП  $B_n$   $r = -0.863$  (рис. 2, а и в соответственно), а также для других ключевых параметров СВ: скорости, плотности и температуры протонов  $r = 0.946$ ,  $0.931$  и  $0.924$  соответственно. При этом известно, что межпланетные параметры определяются уровнем солнечной активности [Коваленко, 1983]. Можно предположить, что подобие вариаций индексов при разных знаках  $B_n$  обусловлено их связью с числом солнечных пятен.

Сопоставление годовых изменений геомагнитных индексов (см. рис. 1, а) и числа солнечных пятен  $R_i$  (см. рис. 2, з) показывает, что  $Dst$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$  меняются относительно  $R_i$  одинаковым образом, т. е. 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  $R_i$  показал, что изменения всех трех индексов и  $R_i$  происходят практически синхронно. Так, при сдвиге ряда  $Dst$  на 1 год влево относительно ряда  $R_i$   $r = -0.638 \pm 0.069$ , без сдвига  $r = -0.637 \pm 0.068$ , на 1 год вправо —  $r = -0.380 \pm 0.100$ , на 2 года вправо —  $r = -0.122 \pm 0.117$ . При сдвиге ряда  $SYM-H$  имеем следующие  $r$ :  $-0.762 \pm 0.049$ ,  $-0.762 \pm 0.048$ ,  $-0.520 \pm 0.085$ ,  $-0.224 \pm 0.112$  соответственно. Сдвиг ряда  $ASY-H$  дает  $0.642 \pm 0.069$ ,  $0.703 \pm 0.058$ ,  $0.576 \pm 0.078$ ,  $0.322 \pm 0.106$  соответственно.

Ранее связь  $Dst$  с солнечной активностью была подробно исследована в [Echer et al., 2011; Yermolaev et al., 2013] при изучении развития геомагнитных

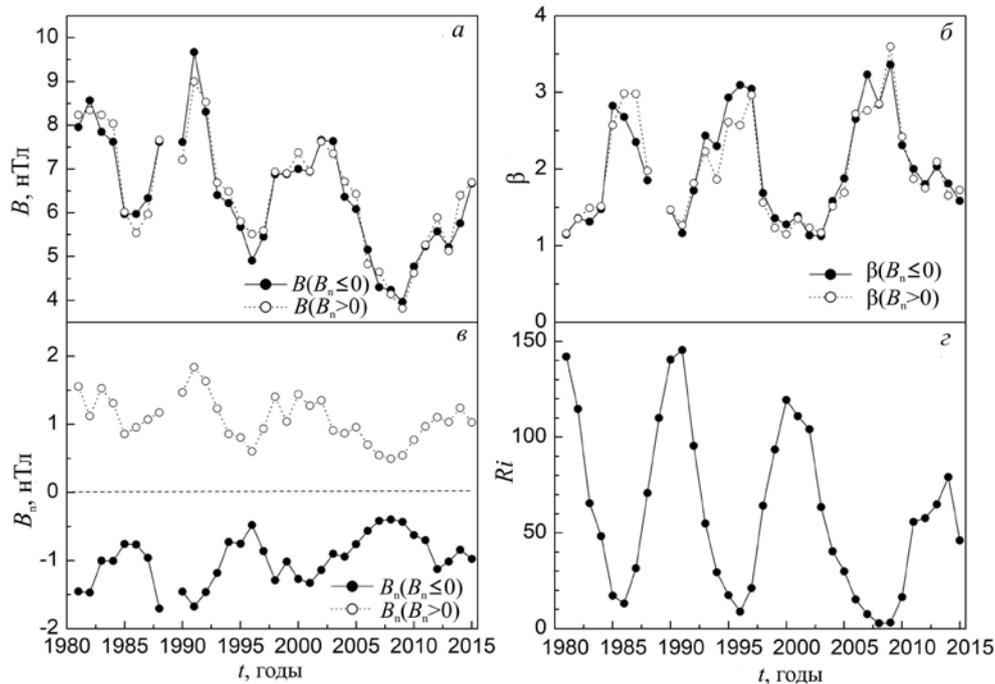


Рис. 2. Изменения среднегодовых значений величины  $B$  ММП (а), параметра СВ  $\beta$  (б), северо-южной компоненты  $B_n$  ММП (в) и числа солнечных пятен  $R_i$  (г) в 1981–2015 гг. при противоположных знаках  $B_n$  ММП:  $B_n \leq 0$  (сплошные линии) и  $B_n > 0$  (пунктирные линии)

бурь. В [Echer et al., 2011] получено, что геомагнитные бури имеют двухпиковое распределение: один пик близок к солнечному максимуму, другой находится в начале фазы спада. В [Yermolaev et al., 2013] показано, что возникновение магнитных бурь определяется межпланетными структурами разных типов. Корреляционные графики геомагнитных индексов и числа солнечных пятен показаны на рис. 3.

На рис. 2, помимо изменений среднегодовых значений  $B$  ММП (а), северо-южной компоненты  $B_n$  ММП (в) и числа солнечных пятен  $R_i$  (г), показаны также изменения параметра  $\beta$  (б), характеризующего соотношение тепловой и магнитной энергий в СВ. Можно видеть, что изменения  $B$  при противоположных знаках  $B_n$  практически совпадают, коэффициент их взаимной корреляции  $r=0.973$ ; совпадают также изменения  $\beta$  ( $r=0.946$ ); изменения  $B_n$  происходят в противофазе ( $r=-0.863$ ). Все три параметра тесно коррелируют с числом солнечных пятен  $R_i$ . При сравнении изменений  $B$  и  $R_i$  независимо от направления ММП получаем  $r=0.795$ , между  $\beta$  и  $R_i$   $r=-0.828$ , т. е.  $B$  и  $R_i$  изменяются синхронно,  $\beta$  и  $R_i$  — в противофазе. Отметим, что  $\beta > 1$ , и это, вероятно, указывает на превышение теплового давления над магнитным при долговременном осреднении параметров СВ. В годы высокой солнечной активности  $B$  растет, а  $\beta$  соответственно уменьшается. Уменьшение  $\beta$  отражает возрастание магнитного давления и соответственно максимальную турбулентность плазмы СВ. Такая закономерность описана в [Куражковская и др., 2021; Куражковская, Куражковский, 2023]. Сравнение  $B_n$  и  $R_i$  показывает, что независимо от знака  $B_n$  связь между ними отсутствует ( $r=-0.005$ ). Это понятно, поскольку южные и северные поля нейтрали-

зуют друг друга при суммировании. Если же рассматривать их отдельно при южной и северной ориентациях ММП, связь  $B_n$  и  $R_i$  весьма тесная: при  $B_n \leq 0$   $r=-0.864$ , при  $B_n > 0$   $r=0.845$ .

На рис. 3 показаны зависимости геомагнитных индексов (а–в) и параметра  $\beta$  (г) от  $R_i$  независимо от ориентации  $B_n$ . Получены соответствующие уравнения регрессии:  $Dst = -0.089R_i - 9.786$ ;  $ASY-H = 0.058R_i + 17.462$ ;  $SYM-H = -0.079R_i - 9.048$ ;  $\beta = -0.013R_i + 2.755$ . Ясно видно, что с ростом  $R_i$  абсолютные величины трех индексов увеличиваются,  $\beta$  уменьшается. Уменьшение  $\beta$  отражает рост магнитного давления в СВ и соответственно рост геомагнитной активности.

На рис. 4 показаны зависимости индексов от  $\beta$  при противоположных знаках  $B_n$  и коэффициенты корреляции  $r$  между индексами и  $\beta$ . Видно, что все три индекса при южном ММП заметно больше по величине, чем при северном, при этом абсолютные величины индексов уменьшаются с ростом  $\beta$  независимо от знака  $B_n$ . Наиболее тесные связи с  $\beta$  проявляют  $SYM-H$  и  $ASY-H$ , при этом  $SYM-H$  сильнее зависит от  $\beta$  при  $B_n \leq 0$  ( $r=0.744$ ), чем при  $B_n > 0$  ( $r=0.677$ ). Наоборот,  $ASY-H$  более тесно связан с  $\beta$  при  $B_n > 0$  ( $r=-0.741$ ), чем при  $B_n \leq 0$  ( $r=-0.719$ ). Аналогично  $SYM-H$   $Dst$  (в меньшей степени) заметно коррелирует с  $\beta$  при  $B_n \leq 0$  ( $r=0.629$ ) и слабее при  $B_n > 0$  ( $r=0.456$ ). Уменьшение индексов по абсолютной величине с ростом  $\beta$ , вероятно, происходит из-за возрастающего преобладания в СВ теплового давления над магнитным.

Графики на рис. 4 можно аппроксимировать линейными функциями, уравнения регрессии выглядят следующим образом:

- при  $B_n \leq 0$   $Dst = 6.59\beta - 31.45$ ,  $SYM-H = 6.29\beta - 29.46$ ,  $ASY-H = -4.44\beta + 31.71$ ;

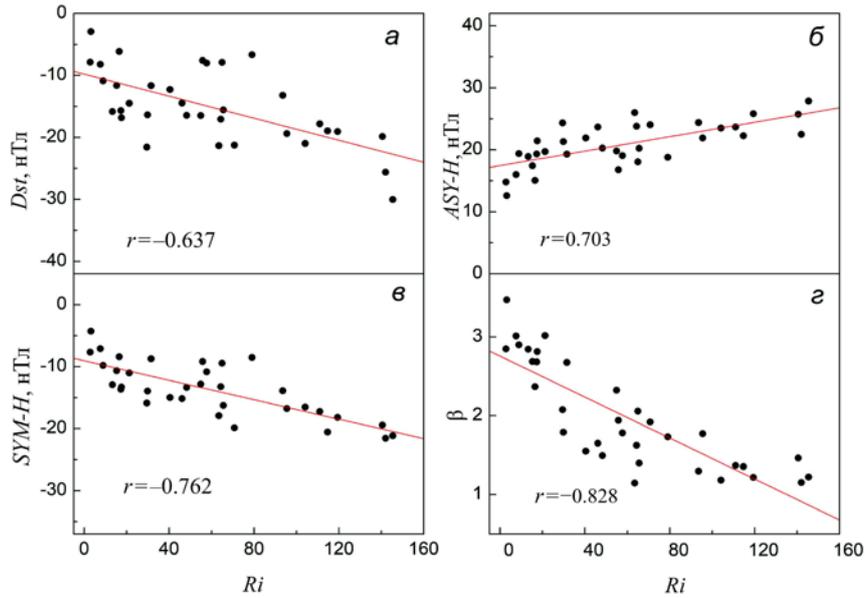


Рис. 3. Изменения  $D_{st}$  (а),  $ASY-H$  (б),  $SYM-H$  (в) и  $\beta$  (г) относительно числа солнечных пятен  $R_i$  независимо от знака  $B_n$ ;  $r$  — коэффициенты линейной корреляции

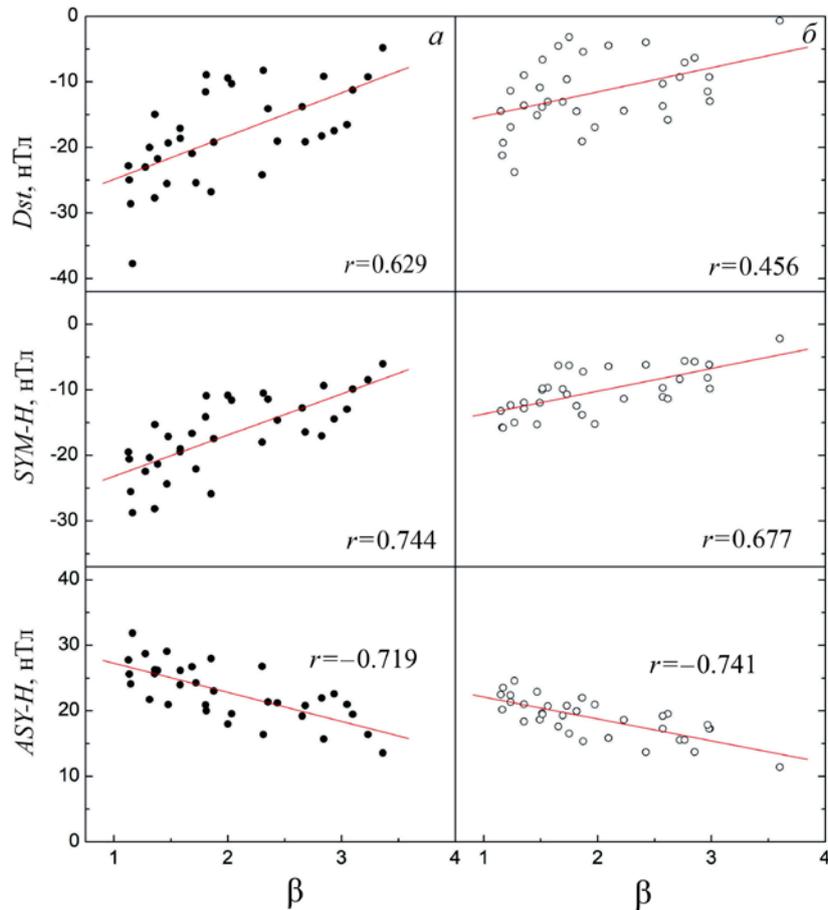


Рис. 4. Зависимости  $D_{st}$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$  от параметра  $\beta$  при  $B_n \leq 0$  (а) и  $B_n > 0$  (б);  $r$  — коэффициенты линейной корреляции

• при  $B_n > 0$   $D_{st} = 3.69\beta - 18.92$ ,  $SYM-H = 3.47\beta - 17.14$ ,  $ASY-H = -3.34\beta + 25.45$ .

Коэффициенты регрессии в уравнениях индексов  $SYM-H$  и  $D_{st}$  при  $B_n \leq 0$  примерно в 1.8 раза больше, чем при  $B_n > 0$ . Это можно объяснить тем, что симметричная компонента кольцевого тока при переходе

от возмущенного состояния магнитосферы в наиболее спокойное, т. е. при повышении  $\beta$ , ослабевает сильнее при  $B_n \leq 0$ , чем при  $B_n > 0$ . Для  $ASY-H$  соотношение коэффициентов различается в 1.3 раза и при  $B_n \leq 0$  при переходе магнитосферы в спокойное состояние асимметричная компонента кольцевого

тока также ослабевает быстрее, чем при  $B_n > 0$ , но с меньшей скоростью, чем симметричная. Аналогичные соотношения получаются и для свободных членов уравнений регрессии индексов и  $\beta$ .

Полученная в настоящей работе зависимость  $Dst$  от  $\beta$  в общем виде согласуется с результатом работы [Куражковская и др., 2021] с учетом того, что мы оперировали среднегодовыми значениями данных, когда при суммировании нивелируются эффекты фаз бури и межпланетных потоков разных типов. В цитируемой работе по среднечасовым данным установлено подобие динамики  $Dst$  и  $\beta$  в процессе развития геомагнитных бурь с постепенными и внезапными началами и показано, что между  $Dst$  и  $\beta$  связь имеет нелинейный характер.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование связей геомагнитных индексов  $Dst$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$  по их среднегодовым значениям с параметрами СВ в 1981–2015 гг. показало, что они соответствуют известным закономерностям.

- При южном направлении ( $B_n \leq 0$ ) ММП среднегодовые значения геомагнитных индексов  $Dst$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$  по абсолютной величине заметно больше, чем при северном направлении ( $B_n > 0$ ) в течение всего рассматриваемого периода. Этот факт большей геоэффективности ММП с  $B_n \leq 0$  хорошо известен. Получено, что при  $B_n \leq 0$   $Dst$  в среднем в 1.8,  $SYM-H$  в 1.7,  $ASY-H$  в 1.2 раза больше, чем при  $B_n > 0$ .

- Как и ожидалось, среднегодовые значения  $SYM-H$  подобно  $Dst$  изменяются относительно числа солнечных пятен  $R_i$  в противофазе, а  $ASY-H$  синфазно: экстремумы индексов наблюдаются в годы максимумов и минимумов  $R_i$ .

- С ростом солнечной активности уменьшается параметр  $\beta$ , что означает повышение магнитного давления СВ и соответственно увеличение геомагнитной активности вследствие роста турбулентности.

Получены следующие основные результаты.

- Вариации среднегодовых значений каждого из индексов  $Dst$ ,  $SYM-H$  и  $ASY-H$  при южном и северном направлениях ММП подобны и коэффициенты их корреляции высоки: 0.871, 0.863 и 0.943 соответственно. Подобие вариаций обусловлено, вероятно, их связью с числом солнечных пятен.

- Установлено, что  $SYM-H$  и  $ASY-H$  зависят от параметра  $\beta$  СВ и их абсолютные величины уменьшаются с ростом  $\beta$  независимо от знака северной южной компоненты ММП. Уменьшение индексов с ростом  $\beta$  происходит, вероятно, из-за перехода магнитосферы в спокойное состояние вследствие возрастания преобладания в СВ теплового давления над магнитным и уменьшения турбулентности.

- Обнаружено, что наиболее тесные связи с  $\beta$  проявляют  $SYM-H$  и  $ASY-H$ , при этом  $SYM-H$  сильнее зависит от  $\beta$  при  $B_n \leq 0$  ( $r=0.744$ ), чем при  $B_n > 0$  ( $r=0.677$ ). Наоборот,  $ASY-H$  более тесно связан с  $\beta$  при  $B_n > 0$  ( $r=-0.741$ ), чем при  $B_n \leq 0$  ( $r=-0.719$ ). Аналогично  $SYM-H$   $Dst$  (в меньшей степени) заметно коррелирует с  $\beta$  при  $B_n \leq 0$  ( $r=0.629$ ) и слабее при  $B_n > 0$  ( $r=0.456$ ).

Автор благодарен сотрудникам Мирового центра данных (Киото, Япония) за возможность использо-

вания данных о геомагнитных индексах и сотрудникам Центра космических полетов им. Годдарда НАСА за данные о солнечном ветре и солнечной активности.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № 122011700182-1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. Геомагнитные вариации и бури. Новосибирск: Наука, 1979. 248 с.
- 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.
- Коваленко В.А. Солнечный ветер. М.: Наука, 1983. 272 с.
- 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).
- Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю. Эффект гистерезиса между индексами геомагнитной активности ( $A_p$ ,  $Dst$ ) 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](https://doi.org/10.12737/szf-93202308).
- Куражковская Н.А., Зотов О.Д., Клайн Б.И. Связь развития геомагнитных бурь с параметром  $\beta$  солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 25–34. DOI: [10.12737/szf-74202104](https://doi.org/10.12737/szf-74202104).
- Макаров Г.А. Смещения значений геомагнитных индексов магнитосферного кольцевого тока. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 31–38. DOI: [10.12737/szf-73202103](https://doi.org/10.12737/szf-73202103).
- 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](https://doi.org/10.12737/szf-84202203).
- 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).
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., et al. Magnetic storms and magnetotail currents. *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, no. A4. P. 7737–7747. DOI: [10.1029/95JA03509](https://doi.org/10.1029/95JA03509).
- Bhaskar A., Vichare G. Forecasting of  $SYMH$  and  $ASYH$  indices for geomagnetic storms of solar cycle 24 including St. Patrick's day, 2015 storm using NARX neural network. *J. Space Weather Space Climate*. 2019. Vol. 9. A12. DOI: [10.1051/swsc/2019007](https://doi.org/10.1051/swsc/2019007).
- Dubyagin S., Ganushkina N., Kubyschkina M., Liemohn M. Contribution from different current systems to  $SYM$  and  $ASY$  midlatitude indices. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. Vol. 119. P. 7243–7263. DOI: [10.1002/2014JA020122](https://doi.org/10.1002/2014JA020122).
- Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Statistical studies of geomagnetic storms with peak  $Dst \leq -50$  nT from 1957 to 2008. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. Vol. 73. P. 1454–1459. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.04.021](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.04.021).
- Greenspan M.E., Hamilton D.C. A test of the Dessler-Parker-Sckopke relation during magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, no. A3. P. 5419–5430.
- Haiducek J.D., Welling D.T., Ganushkina N.Y., et al. SWMF Global Magnetosphere Simulations of January 2005: Geomagnetic Indices and Cross-Polar Cap Potential. *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 1567–1587.
- 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.
- Kalegaev V.V., Ganushkina N.Y., Pulkkinen T.I., et al. Relation between the ring current and the tail current during

magnetic storms. *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 523–533. DOI: [10.5194/angeo-23-523-2005](https://doi.org/10.5194/angeo-23-523-2005).

Liemohn M.W., McCollough J.P., Jordanova V.K., et al. Model evaluation guidelines for geomagnetic index predictions. *Space Weather*. 2018. Vol. 16. P. 2079–2102. DOI: [10.1029/2018SW002067](https://doi.org/10.1029/2018SW002067).

Lockwood M., McWilliams K.A. On optimum solar wind magnetosphere coupling functions for transpolar voltage and planetary geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 2021. Vol. 126. e2021JA029946. DOI: [10.1029/2021JA029946](https://doi.org/10.1029/2021JA029946).

Maltsev Y.P., Arykov A.A., Belova E.G., et al. Magnetic flux redistribution in the storm time magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, no. A4. P. 7697–7704.

Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., et al. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables. *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. A01206, DOI: [10.1029/2006JA012015](https://doi.org/10.1029/2006JA012015).

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. DOI: [10.1029/1999JA000400](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. DOI: [10.1029/2005JA011532](https://doi.org/10.1029/2005JA011532).

Singh A.K., Sinha A.K., Pathan B.M., et al. Effect of prompt penetration on the low latitude ASY indices. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. Vol. 94. P. 34–40. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.12.015](https://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. DOI: [10.1029/2004JA010798](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. DOI: [10.1029/2006JA011808](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 Phys.* 2013. Vol. 118. P. 4760–4765. DOI: [10.1002/jgra.50467](https://doi.org/10.1002/jgra.50467).

Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., et al. Statistical study of the geoeffectiveness of compression regions CIRs and Sheaths. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 180. P. 52–59. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.01.027](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.01.027).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf> (дата обращения 5 октября 2021 г.).

URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html> (дата обращения 29 марта 2022 г.).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 29 марта 2022 г.).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Макаров Г.А. Крупномасштабные связи геомагнитных индексов SYM-H и ASY-H с северо-южной компонентой ММП и бета-параметром солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 3. С. 97–103. DOI: [10.12737/szf-103202411](https://doi.org/10.12737/szf-103202411).