

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.010

ЗАВИСИМОСТЬ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДЕКСОВ *ASY-H* И *SYM-H* ОТ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Г.А. Макаров

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук», Институт космofизических исследований
и аэрoнoмии им. Ю.Г. Шафeра СО РАН, г. Якутск, 677980, Россия
E-mail: gmakarov@ikfia.ysn.ru

Аннотация. За период времени с 1981 по 2015 г. исследуются зависимости геомагнитных индексов *ASY-H* и *SYM-H* от межпланетных параметров по их среднесуточным значениям. Выполнен корреляционный анализ индексов со скоростью солнечного ветра, величиной и северо-южной компонентой межпланетного магнитного поля. Определены регрессионные уравнения, связывающие *ASY-H* и *SYM-H* с межпланетными параметрами. Обнаружено, что при описании связи индексов *ASY-H* и *SYM-H* с северо-южной компонентой межпланетного магнитного поля необходимо учитывать вклад модуля межпланетного магнитного поля.

1. Введение

В первые годы прямых измерений межпланетной плазмы с помощью космических аппаратов была обнаружена тесная связь между геомагнитной активностью и скоростью V солнечного ветра. Затем было установлено, что возмущенность геомагнитного поля сильно зависит от межпланетного магнитного поля (ММП): модуля B , южной компоненты B_s , азимутальной компоненты B_u и изменчивости. По мере увеличения объема информации о межпланетных параметрах в качестве геоэффективных характеристик стали рассматриваться такие физические величины, как межпланетное электрическое поле, поток электромагнитной энергии солнечного ветра, а также различные комбинации из параметров межпланетной среды (функции связи). Подробные обзоры современного состояния влияния параметров солнечного ветра на геомагнитную активность можно найти, в частности, в работах [Newell et al., 2007, Liemohn et al., 2018, Lockwood and McWilliams, 2021].

Состояние солнечного ветра изменяется в зависимости от условий на Солнце. Критическим параметром среди межпланетных характеристик при возникновении магнитосферных возмущений является северо-южная компонента ММП B_z . Параметры солнечного ветра сильно изменяются при прохождении в нем высокоскоростных и низкоскоростных плазменных потоков и межпланетных магнитных облаков (см. например, [Ермолаев и др., 2010]).

В периоды геомагнитных бурь в магнитосфере развивается кольцевой ток, интенсивность которого преимущественно определяет энерговыделение в магнитосфере. При проведении исследований солнечно-земных связей и проявлений космической погоды в характеристиках смежных разделов науки – метеорологии, сейсмологии, биофизики – помимо планетарных индексов магнитной активности, как K_p , A_p , a_a и др., следует использовать, на наш взгляд, и индексы кольцевого тока. Для оценки интенсивности магнитосферного кольцевого тока разработаны геомагнитные низкоширотный индекс Dst и среднеширотные индексы *SYM-H* и *ASY-H*. Индексы *SYM-H* и *ASY-H* позволяют выделять симметричную и асимметричную компоненты кольцевого тока соответственно [Iyemori et al., 1992]. В настоящее время выявлены вклады в индексы Dst , *SYM-H* и *ASY-H*, кроме кольцевого тока, также токов магнитопаузы, хвоста магнитосферы и продольных токов [Maltsev et al., 1996; Alexeev et al., 1996; Tsyganenko and Sitnov, 2005]. Связь между этими индексами и межпланетными параметрами по одноминутным данным рассмотрена в работах [Weygand and McPherron, 2006] и [Iyemori et al., 2010].

Изучение солнечно-земных связей часто ведется статистическими методами с использованием среднесуточных значений земных, межпланетных и солнечных параметров. При суточном усреднении межпланетных параметров показатели плазменных и магнитных структур в солнечном ветре будут изменяться, а при таком осреднении земных параметров разные фазы геомагнитных бурь могут накладываться, поэтому особенности бурь (фазы, интенсивность, длительность и др.) будут в значительной мере нивелироваться. Представляет интерес рассмотреть связь между среднесуточными значениями индексов *SYM-H*, *ASY-H*, с одной стороны, и основными межпланетными параметрами, с другой стороны.

2. Используемые экспериментальные данные

В работе используются данные о геомагнитных индексах $SYM-H$ и $ASY-H$ и о солнечном ветре – его скорости V , модуле ММП B и нормальной (или северо-южной) компоненте ММП B_n за период 1981–2015 гг. Сведения об индексах взяты из Мирового центра данных по геомагнетизму (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>), а о солнечном ветре из Центра данных космической физики НАСА (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Подробно методика определения индексов $SYM-H$ и $ASY-H$ описывается в работе [Iyemori et al., 1992]. Из базы данных OMNI использованы компоненты ММП в системе координат RTN: ось R направлена радиально от Солнца,

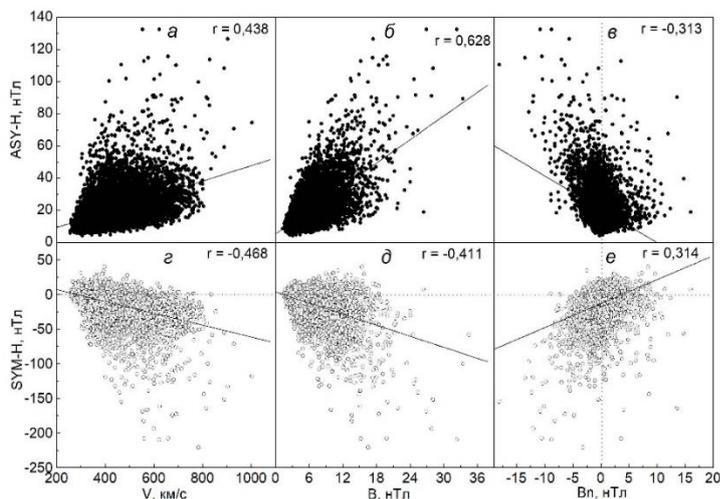


Рисунок 1. Распределения среднесуточных значений индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ как функций их связи со скоростью V солнечного ветра (а, г), модулем B ММП (б, д) и северо-южной компонентой B_n ММП (в, е), r – коэффициенты их линейной корреляции.

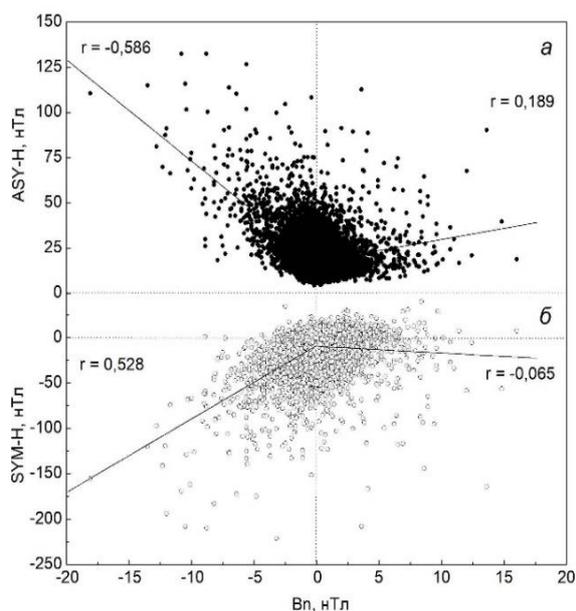


Рисунок 2. Распределения среднесуточных значений индексов $ASY-H$ (а) и $SYM-H$ (б) как функций их связи с B_n ММП с учетом знака B_n . Слева – при южном, справа – при северном направлении ММП, r – коэффициенты корреляции.

ось T имеет направление в сторону вращения Солнца, а ось N представляет собой векторное произведение осей R и T . Из рассмотрения исключены дни, когда отсутствовали сведения о межпланетных и геомагнитных данных, поэтому количество использованных дней составило 10759. В работе используются среднесуточные значения данных.

3. Связь индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ с межпланетными параметрами

На рис. 1 показаны распределения значений индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ как функций их связи со скоростью V солнечного ветра, модулем B ММП и северо-южной компонентой B_n ММП по всему массиву данных. Как видно, связи есть, их можно аппроксимировать линейными

уравнениями. Применяя для простоты такой подход в описании связи геомагнитных индексов с межпланетными параметрами, отметим, что магнитосфера на изменения состояния солнечного ветра реагирует нелинейным образом [Вайсберг и др., 2008].

На рис. 1 видно, что более выражено связь просматривается между обоими индексами, с одной стороны, скоростью солнечного ветра и модулем ММП, с другой стороны. Менее заметная корреляция у индексов прослеживается с северо-южной компонентой ММП. Чтобы разобраться с этим обстоятельством интересно посмотреть связь между геомагнитными индексами и межпланетными параметрами, дифференцируя весь массив данных на два подмассива в зависимости от знака B_n ММП. На рис. 2 показаны зависимости индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ от компоненты B_n при разном направлении B_n ММП. Коэффициенты корреляции r в уравнениях линейной аппроксимации между $ASY-H$ и B_n и $SYM-H$ и B_n в первом случае равны 0.189 и -0.065 соответственно, а во втором случае -0.586 и 0.528 соответственно. Отсюда, можно констатировать, что индексы кольцевого тока при северном направлении ММП практически не

зависят от V_n , тогда как при южном направлении ММП оба индекса заметно связаны с V_n : с ростом абсолютной величины B_s индексы *ASY-H* и *SYM-H* растут по абсолютной величине, здесь B_s – южная компонента ММП. Коэффициенты регрессии a и свободные члены b в уравнениях линейной аппроксимации между геомагнитными индексами *ASY-H*, *SYM-H* и межпланетными параметрами V , B , V_n по всему массиву данных и при разном знаке V_n ММП приведены в таблице. Уравнения регрессии при южном направлении ММП можно записать в виде: $ASY-H = -5.60 \cdot B_s + 17.17$ и $SYM-H = 8.09 \cdot B_s - 8.53$.

По данным таблицы, можно заметить, что показатели a и b в уравнениях связи *ASY-H* и *SYM-H* с параметрами V и B по всему массиву представляют собой средние значения от результатов суммирования таких показателей при $V_n > 0$ и $V_n \leq 0$. Следует отметить, что зависимости индексов *ASY-H* и *SYM-H* от скорости солнечного ветра при разном направлении V_n ММП не меняются. Коэффициенты корреляции между V и V_n при обоих знаках V_n меньше 0.018, что свидетельствует о независимости V и V_n ММП между собой. Практически независимо друг от друга меняются V и B ($r < 0.22$). Характер зависимости индексов *ASY-H* и *SYM-H* от модуля ММП при разных знаках V_n ММП не одинаков – при южном направлении ММП коэффициенты корреляции между *ASY-H* и *SYM-H*, с одной стороны, и B , с другой стороны, заметно выше, чем при северном направлении: в случае *ASY-H* $r = 0.70$ и $r = 0.58$ соответственно, в случае *SYM-H* $r = -0.54$ и $r = -0.27$ соответственно. То есть связь между индексами и модулем ММП при учете знака V_n ММП подобна приведенной на рис. 2 между индексами и компонентой V_n ММП.

Таблица. Коэффициенты регрессии a и свободные члены b в уравнениях линейной аппроксимации между геомагнитными индексами *ASY-H*, *SYM-H* и межпланетными параметрами V , B , V_n по всему массиву данных и при разном знаке V_n ММП.

Знак V_n ММП	Число дней	Индекс	V		B		V_n	
			a	b	a	b	a	b
Весь массив	10759	<i>ASY-H</i>	0.05	-0.33	2.45	5.23	-2.08	20.70
		<i>SYM-H</i>	-0.09	24.12	-2.66	3.54	3.46	-13.29
$V_n > 0$	5089	<i>ASY-H</i>	0.04	-0.90	1.79	7.32	1.23	17.44
		<i>SYM-H</i>	-0.08	26.42	-1.50	-0.48	-0.76	-9.26
$V_n \leq 0$	5670	<i>ASY-H</i>	0.05	0.21	3.11	3.01	-5.60	17.17
		<i>SYM-H</i>	-0.09	22.02	-3.82	7.72	8.09	-8.53

На рис. 3 приведены соотношения между модулем B ММП и компонентой V_n ММП при южном и северном направлениях ММП по всему массиву данных. Соответствующие уравнения регрессии выглядят так: при южном направлении ММП $B = -1.24 \cdot B_s + 5.07$, при северном $B = 1.20 \cdot B_N + 5.12$. Как видно, зависимости

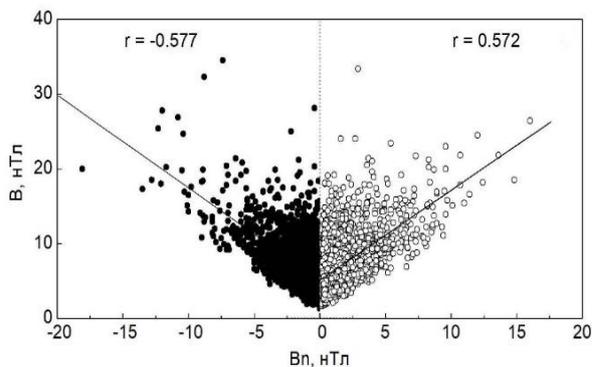


Рисунок 3. Соотношение между модулем B ММП и компонентой V_n ММП при южном (слева) и северном (справа) направлениях ММП по всему массиву данных, r – коэффициенты корреляции.

одинаковы – коэффициенты a и свободные члены b практически равны с учетом знака V_n . Однако, индексы *ASY-H* и *SYM-H* проявляют разную зависимость от B и V_n при разном направлении ММП (рис. 2). Очевидно, что такая картина является следствием реакции внутримангитосферных процессов на направление ММП. Известно [Lockwood and McWilliams, 2021], что механизмы проникновения энергии из солнечного ветра в магнитосферу при южном и северном направлении ММП иные. А тот факт, что коэффициенты корреляции между *ASY-H* и B ММП при обоих направлениях V_n выше, чем между *SYM-H* и B ММП отражает, вероятно, природу этих индексов – *SYM-H* характеризует интенсивность симметричной компоненты магнитосферного кольцевого тока и токов магнитопаузы и хвоста, а

ASY-H – интенсивность асимметричной компоненты кольцевого тока и изменение других токовых систем [Dubyagin et al., 2014].

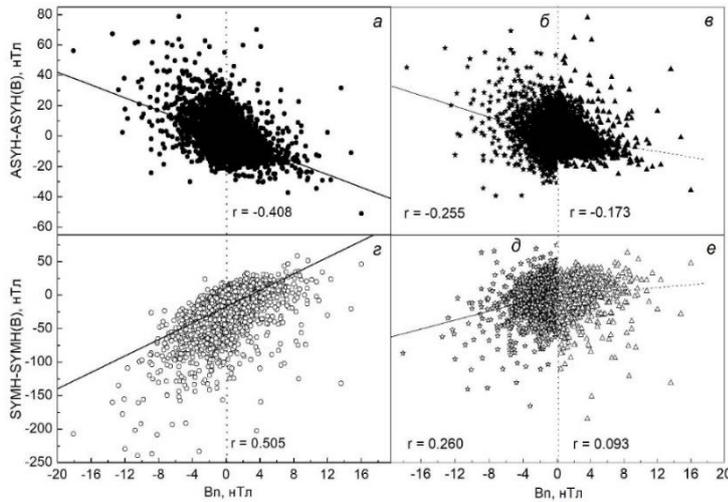


Рисунок 4.

Распределения разностей индексов ($ASY-H - ASY-H(B)$) (а – в) и ($SYM-H - SYM-H(B)$) (г – е) как функций их связи с B_n ММП по всему массиву данных без разделения по знаку B_n (а, г) и с разделением по знаку B_n (б, в, д, е).

уменьшением северной компоненты ММП и ростом южной компоненты ММП разности возрастают от отрицательных значений до положительных в случае ($ASY-H - ASY-H(B)$) и наоборот в случае ($SYM-H - SYM-H(B)$). Напомним, что в панелях (б) и (д) разности индексов представлены для чисто южных направлений ММП ($B_n \leq 0$), а в панелях (е) и (е) для чисто северных направлений. Однако ввиду того, что коэффициенты корреляции сопоставляемых данных в панелях (б, в, д, е) малы, следует признать, что такой способ поиска связи индексов с B_n -компонентой ответа не дает. Поэтому надо отдать предпочтение рассмотрению связи индексов с B_n , когда массив данных не разделяется по знаку B_n – панели (а) и (г), но с учетом вклада B . Коэффициент корреляции между ($ASY-H - ASY-H(B)$) и B_n больше 0.4, а между ($SYM-H - SYM-H(B)$) и B_n больше 0.5. Таким образом, можно заключить, что после исключения вклада модуля ММП в индексы $ASY-H$ и $SYM-H$, эти индексы проявляют заметную линейную корреляционную связь с северо-южной компонентой ММП: индексы $ASY-H$ и $SYM-H$ растут по мере поворота B_n с северного на южное направление, при этом $SYM-H$ нарастает почти в 3 раза сильнее, чем $ASY-H$. Соответствующие уравнения регрессии можно записать следующим образом: $\Delta ASY-H = ASY-H - ASY-H(B) = -2.11 \cdot B_n + 0.07$ и $\Delta SYM-H = SYM-H - SYM-H(B) = 6.12 \cdot B_n - 16.91$.

4. Основные результаты

1. Выполнен корреляционный анализ среднесуточных значений геомагнитных индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ со скоростью солнечного ветра, величиной и северо-южной компонентой межпланетного магнитного поля. Определены регрессионные уравнения, описывающие зависимости среднесуточных значений индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ от перечисленных параметров солнечного ветра.
2. Обнаружено, что при описании связи геомагнитных индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ с северо-южной компонентой B_n межпланетного магнитного поля необходимо учитывать вклад модуля B межпланетного магнитного поля.

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

Литература

- Вайсберг О.Л., Смирнов В.Н., Застенкер Г.Н., Савин С.П., Веригин М.И. (2008), Взаимодействие солнечного ветра с внешней магнитосферой Земли, *Плазменная гелиогеофизика*. Т. 1. Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского, М.: ФИЗМАТЛИТ, 378–422.
- Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. (2010), Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури, *Космические исследования*, Т. 48, № 6, 499–515.

- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., et al. (1996), Magnetic storms and magnetotail currents, *J. Geophys. Res.*, V. 101, no. A4, 7737–7747, DOI: 10.1029/95JA03509
- Dubyagin S., Ganushkina N., Kubyshkina M., Liemohn M. (2014), Contribution from different current systems to SYM and ASY midlatitude indices, *J. Geophys. Res.*, V. 119, 7243–7263, DOI:10.1002/2014JA020122
- Iyemori T., Araki T., Kamei T., Takeda M. (1992), Mid-latitude geomagnetic indices ASY and SYM (Provisional), No. 1 (1989–1990), Internal Report of Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Kyoto University, Japan.
- Iyemori T., Takeda M., Nose M., Odagi Y., Toh H. (2010), Mid-latitude Geomagnetic Indices "ASY" and "SYM" for 2009 (Provisional), Available at <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>
- Liemohn M.W., McCollough J.P., Jordanova V.K., Ngwira C.M., Morley S.K., Cid C., et al. (2018), Model evaluation guidelines for geomagnetic index predictions, *Space Weather*, V. 16, 2079–2102, <https://doi.org/10.1029/2018SW002067>
- Lockwood M., McWilliams K.A. (2021), On optimum solar wind magnetosphere coupling functions for transpolar voltage and planetary geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, V. 126, e2021JA029946, <https://doi.org/10.1029/2021JA029946>
- Maltsev Y.P., Arykov A.A., Belova E.G., et al. (1996), Magnetic flux redistribution in the storm time magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, V. 101, no. A4, 7697–7704, DOI: 10.1029/95JA03709
- Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J. (2007), A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables, *J. Geophys. Res.*, V. 112, A01206, DOI: 10.1029/2006JA012015
- Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. (2005), Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, V. 110, A03208, DOI: 10.1029/2004JA010798
- Weygand J.M., McPherron R.L. (2006), Dependence of ring current asymmetry on storm phase. *J. Geophys. Res.*, V. 111, A11221, DOI: 10.1029/2006JA011808