

ГЕОМАГНИТНЫЕ ИНДЕКСЫ *ASY-H* И *SYM-H* И ИХ СВЯЗЬ С МЕЖПЛАНЕТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

GEOMAGNETIC INDICES *ASY-H* AND *SYM-H* AND THEIR RELATION TO INTERPLANETARY PARAMETERS

Г.А. Макаров 

Институт космических исследований и аэронауки
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. За период времени с 1981 по 2015 г. исследуются зависимости геомагнитных индексов *SYM-H* и *ASY-H* от межпланетных параметров по их среднесуточным значениям. Исследование проводится двумя путями: первый — анализируется весь массив данных, второй — данные разбиваются на девять групп активности в соответствии со среднесуточными значениями планетарного геомагнитного индекса A_p . Выполнен корреляционный анализ индексов кольцевого тока *ASY-H*, *SYM-H* и скорости солнечного ветра, модуля и северо-южной компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Поиск связи индексов *ASY-H* и *SYM-H* с межпланетными параметрами оказался более успешным при рассмотрении всего массива данных, чем в случае разбивки данных по группам магнитной активности. 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 ММП необходимо учитывать вклад модуля ММП.

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

Abstract. The dependences of the geomagnetic indices *SYM-H* and *ASY-H* on interplanetary parameters for the period from 1981 to 2015 according to their daily averages are studied. The study is carried out in two ways: the first — the entire data array is analyzed, the second — the data are divided into 9 activity groups in accordance with the average daily values of the planetary geomagnetic index A_p . A correlation analysis of the indices with the solar wind speed, magnitude, and the north-south component of the interplanetary magnetic field (IMF) has been performed. The search for a relationship between the *ASY-H* and *SYM-H* indices and interplanetary parameters turned out to be more successful when considering the entire data array than in the case of splitting the data into groups of magnetic activity. Regression equations relating *ASY-H* and *SYM-H* to interplanetary parameters are determined. It has been found that when describing the relationship between the *ASY-H* and *SYM-H* indices and the IMF north-south component, it is necessary to take into account the contribution of the IMF modulus.

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

ВВЕДЕНИЕ

В первые годы прямых измерений межпланетной плазмы с помощью космических аппаратов была обнаружена тесная связь между геомагнитной активностью и скоростью V солнечного ветра [Snyder et al., 1963]. Затем было установлено, что возмущенность геомагнитного поля сильно зависит от межпланетного магнитного поля (ММП): модуля $|B|$, южной компоненты B_s [Wilcox et al., 1967], азимутальной компоненты B_y [Friis-Christensen et al., 1972] и изменчивости ММП [Ballif et al., 1969].

По мере увеличения объема информации о межпланетных параметрах в качестве геоэффективных характеристик стали рассматриваться такие физические величины, как межпланетное электрическое поле [Rostoker, Falthammer, 1967], поток электромагнитной энергии солнечного ветра [Akasofu, 1979], а также различные комбинации параметров межпланетной среды (функции связи) [Burton et al., 1975; Murayama et al., 1980; Holser, Slavin, 1982]. На современном

уровне влияние параметров солнечного ветра на геомагнитную активность подробно рассматривается в работах [Newell et al., 2007; Liemohn et al., 2018; Lockwood, McWilliams, 2021]. В [Newell et al., 2007] сопоставляются десять переменных, характеризующих состояние магнитосферы, в том числе пять геомагнитных индексов и пять характеристик авроральной и полярной областей с более чем двадцатью возможными функциями связи солнечного ветра, в [Liemohn et al., 2018] анализируются модели, предсказывающие геомагнитные индексы, в [Lockwood, McWilliams, 2021] исследуются различия между оптимальными функциями связи для трансполярного напряжения Φ_{PC} , геомагнитного am -индекса и индекса SML аврорального овала на ночной стороне Северного полушария. Заметим, что в перечисленных выше работах использовались данные наблюдений с минутным или часовым временным разрешением.

Состояние солнечного ветра изменяется в зависимости от условий на Солнце. Критическим меж-

планетным параметром при возникновении магнитосферных возмущений является северо-южная компонента ММП. Параметры солнечного ветра сильно изменяются при прохождении в нем высокоскоростных и низкоскоростных плазменных потоков и межпланетных магнитных облаков [Ермолаев и др., 2010]. Направленные на юг магнитные поля в высокоскоростных потоках солнечного ветра и в областях короткого взаимодействия могут быть основным источником энергии для долгосрочной геомагнитной активности на Земле [Echer et al., 2013]. В работе [Yermolaev et al., 2018] показано, что в таких структурах $|B|$ ММП и скорости межпланетных течений существенно увеличены. Большинство супербурь было вызвано оболочкой, предшествующей межпланетному выбросу корональной массы, или комбинацией оболочки и магнитного облака [Meng et al., 2019].

В периоды геомагнитных бурь в магнитосфере развивается кольцевой ток, интенсивность которого преимущественно определяет энерговыделение в магнитосфере. При проведении исследований солнечно-земных связей и влияния космической погоды на процессы, рассматриваемые смежными разделами науки — метеорологией, сейсмологией, биофизикой, помимо планетарных индексов магнитной активности, таких как K_p , A_p , aa и др., следует использовать, на наш взгляд, индексы кольцевого тока. Для оценки интенсивности магнитосферного кольцевого тока разработаны 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 [Uyemori et al., 1992]. В настоящее время выявлены вклады в геомагнитные индексы Dst , $SYM-H$ и $ASY-H$ не только кольцевого тока, но и токов магнитопаузы, хвоста магнитосферы и продольных токов [Alexeev et al., 1996; Maltsev et al., 1996; Tsyganenko, Sitnov, 2005]. Связь между этими индексами и межпланетными параметрами по одноминутным данным рассмотрена в работах [Weygand, McPherron, 2006; <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>].

Изучение солнечно-земных связей часто ведется статистическими методами с использованием среднесуточных значений земных, межпланетных и солнечных параметров. Следует иметь в виду, что при суточном усреднении межпланетных параметров изменяются показатели плазменных и магнитных структур в солнечном ветре и что при суточном усреднении земных параметров накладываются друг на друга разные фазы геомагнитных бурь, поэтому особенности бурь (фазы, интенсивность, длительность и др.) нивелируются. Несмотря на это, интересно рассмотреть связь между среднесуточными значениями индексов $SYM-H$, $ASY-H$ с одной стороны и основными межпланетными параметрами с другой стороны.

Цель работы — исследование зависимости индексов $SYM-H$ и $ASY-H$ от таких параметров, как скорость солнечного ветра V , модуль $|B|$ и нормальная, или северо-южная, компонента B_n ММП, при суточном усреднении рассматриваемых данных. В дальнейшем предполагается изучение зависимости этих

индексов от различных функций связи солнечного ветра, которые составляются по данным об основных межпланетных параметрах.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе используются данные о геомагнитных индексах $SYM-H$ и $ASY-H$ и солнечном ветре — его скорости V , модуле $|B|$ и нормальной компоненте B_n ММП за 1981–2015 гг. Сведения об индексах взяты из архива Мирового центра данных по геомагнетизму [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>], а о солнечном ветре — на сайте Центра данных космической физики НАСА [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>]. Индексы $SYM-H$ и $ASY-H$ имеют одноминутное временное разрешение и рассчитываются по H -составляющей геомагнитного поля на шести среднеширотных станциях (в сеть входят более десяти станций). $SYM-H$ представляет собой, по сути, усредненное отклонение H 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 -составляющей после вычета из поля возмущения соответствующих симметричных частей. Подробно методика определения этих индексов описывается в работе [Uyemori et al., 1992]. Использовались компоненты ММП из базы данных OMNI в системе координат RTN: ось R направлена радиально от Солнца, ось T имеет направление в сторону вращения Солнца, а ось N представляет собой векторное произведение 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.

Дни, для которых отсутствовали данные, были исключены, поэтому количество рассматриваемых дней составило 10759. В работе используются среднесуточные данные. Предварительный анализ связи между индексами и межпланетными параметрами показал, что наибольшие коэффициенты корреляции получаются при сравнении индексов с ключевыми параметрами солнечного ветра — со скоростью, модулем и северо-южной компонентой ММП (они приведены на рис. 1), тогда как связь с динамическим давлением, электрическим полем и плотностью солнечного ветра весьма слабая: коэффициенты корреляции не превышают 0.3, за исключением связи между $ASY-H$ и динамическим давлением с коэффициентом корреляции 0.48.

Регрессионный анализ $SYM-H$ и $ASY-H$ с одной стороны и V , $|B|$ и B_n с другой стороны проводится двумя путями: первый — анализируется весь массив данных, второй — данные разбиваются на группы активности, т. е. все данные были разбиты на девять групп в соответствии со среднесуточными значениями планетарного геомагнитного индекса A_p . В табл. 1 представлена информация о количестве дней в группах активности, о средних значениях и о величинах стандартных отклонений σ межпланетных (V , $|B|$, B_n) и геомагнитных (A_p , $ASY-H$, $SYM-H$) данных в каждой

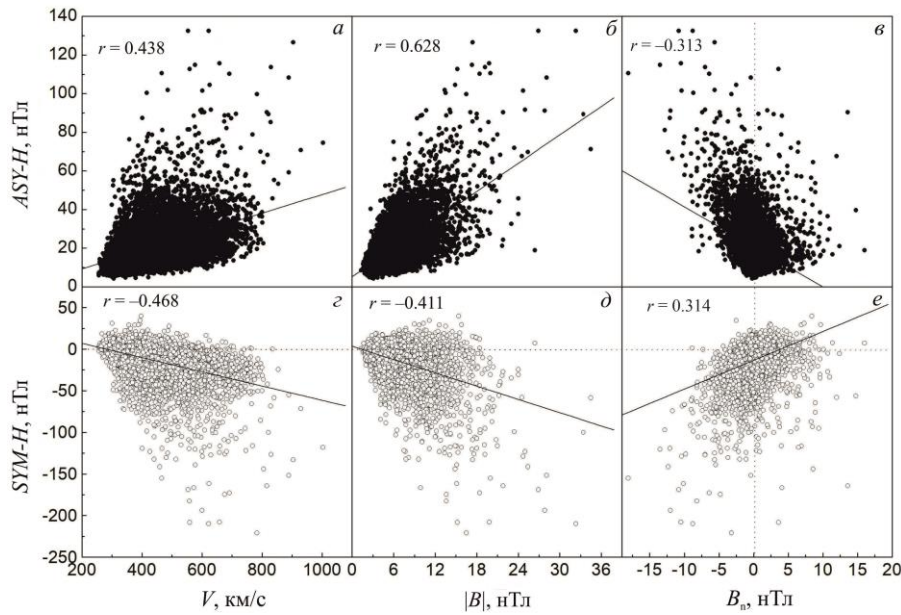


Рис. 1. Распределения среднесуточных значений индексов *ASY-H* и *SYM-H* как функций связи со скоростью V солнечного ветра (*a*, *z*), модулем $|B|$ (*b*, *d*) и северо-южной компонентой B_n (*e*, *e*) ММП, полученных по всему массиву данных. На этом и следующих рисунках r — коэффициенты линейной корреляции, сплошные линии — прямые линейной аппроксимации соответствующих пар данных, пунктирные линии — нулевые значения соответствующего параметра, в данном случае индекса *SYM-H* и компоненты B_n ММП

Таблица 1

Сведения об интервалах значений индекса A_p , количестве дней n , средних значениях и стандартных отклонениях σ геомагнитных индексов A_p , *ASY-H*, *SYM-H* и межпланетных параметров V , $|B|$, B_n в группах активности и по всему массиву данных

A_p , нТл	Число дней n	$\langle A_p \rangle \pm \sigma$, нТл	$\langle ASY-H \rangle \pm \sigma$, нТл	$\langle SYM-H \rangle \pm \sigma$, нТл	$\langle V \rangle \pm \sigma$, км/с	$\langle B \rangle \pm \sigma$, нТл	$\langle B_n \rangle \pm \sigma$, нТл
0–2	841	1.60±0.63	10.90±2.85	-2.08±5.96	338.17±44.02	3.71±1.35	0.33±0.89
3–5	2609	4.02±0.75	13.92±3.81	-4.29±8.01	375.30±54.20	4.72±1.52	0.30±1.14
6–8	2219	6.88±0.84	17.00±4.39	-8.02±10.18	416.34±67.92	5.75±1.74	0.14±1.29
9–11	1357	9.94±0.78	19.80±4.89	-11.38±11.72	447.70±77.91	6.42±1.95	0.07±1.50
12–14	950	12.90±0.86	21.91±5.20	-14.24±12.32	472.86±87.79	6.99±2.15	0.02±1.49
15–17	624	15.98±0.78	24.32±5.76	-17.40±13.41	485.81±93.24	7.32±2.32	-0.16±1.73
18–20	511	18.95±0.84	26.90±6.30	-21.21±14.62	509.06±98.32	7.75±2.46	-0.20±1.78
21–26	630	23.34±1.78	29.71±7.07	-24.34±14.91	528.37±99.66	8.31±2.76	-0.28±1.91
≥27	1018	44.80±23.79	43.22±15.95	-45.15±30.70	553.23±113.02	10.40±3.98	-1.01±3.06
Весь массив	10759	12.34±14.02	20.68±11.02	-13.26±18.33	437.17±100.32	6.31±2.83	0.01±1.66

группе активности. В этой таблице приводятся также сведения по всему массиву данных.

Можно заметить (см. табл. 1), что по мере роста геомагнитной активности, как и ожидается из приведенных в физической литературе данных, увеличиваются средние значения межпланетных и геомагнитных параметров, при этом северо-южная компонента B_n постепенно меняет направление с северного на южное, а индекс *SYM-H* растет по модулю, стандартные отклонения σ средних значений межпланетных и геомагнитных данных с ростом A_p растут; в группе $A_p \geq 27$ большие величины σ для всех

параметров обусловлены, вероятно, большим диапазоном изменений индекса A_p .

2. СВЯЗЬ ИНДЕКСОВ *ASY-H* И *SYM-H* С МЕЖПЛАНЕТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

2.1. Результаты рассмотрения всего массива данных

На рис. 1 показаны распределения значений индексов *ASY-H* и *SYM-H* как функций связи со скоростью V солнечного ветра, модулем $|B|$ и северо-южной

Таблица 2

Коэффициенты регрессии a и свободные члены b в уравнениях линейной аппроксимации связи между геомагнитными индексами $ASY-H$, $SYM-H$ и межпланетными параметрами V , $|B|$, B_n , полученных по всему массиву данных и при разном знаке B_n ММП

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

компонентой B_n ММП по всему массиву данных. Из рис. 1 следует, что связь существует и ее можно аппроксимировать линейным уравнением типа $y=ax+b$, где y один из индексов; x — один из межпланетных параметров; a — коэффициент регрессии; b — свободный член. Коэффициенты регрессии a и свободные члены b в уравнениях связи между индексами $ASY-H$, $SYM-H$ и межпланетными параметрами V , $|B|$ и B_n приведены в табл. 2 (см. строку «Весь массив»). Такой подход в описании связи геомагнитных индексов с межпланетными параметрами применяется для простоты, однако заметим, что магнитосфера на изменения состояния солнечного ветра реагирует нелинейным образом [Вайсберг и др., 2008].

На рис. 1 видно, что более выражена связь между обоими индексами с одной стороны и скоростью солнечного ветра и модулем ММП с другой стороны. По данным табл. 2 можно сказать, что индекс $SYM-H$ по абсолютной величине зависит от скорости солнечного ветра почти в два раза сильнее, чем индекс $ASY-H$, а относительно модуля ММП оба индекса изменяются почти одинаково. Менее заметна корреляция индексов с северо-южной компонентой ММП.

Чтобы разобраться с этим обстоятельством, рассмотрим связь между геомагнитными индексами и межпланетными параметрами, разбив 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 ММП при разном ее направлении. По сути, на этом рисунке представлено то же, что на рис. 1, $в$, $е$, с той разницей, что проведен корреляционный анализ индексов и B_n отдельно при $B_n > 0$ и $B_n \leq 0$. Коэффициенты корреляции r в уравнениях линейной аппроксимации связи между $ASY-H$ и B_n и $SYM-H$ и B_n составляют соответственно 0.189 и -0.065 при $B_n > 0$ и -0.586 и 0.528 при $B_n \leq 0$. Можно заключить, что индексы кольцевого тока при северном направлении ММП практически не зависят от B_n , тогда как при южном направлении ММП оба индекса заметно связаны с B_n : с ростом абсолютной величины южной компоненты ММП B_S индексы $ASY-H$ и $SYM-H$ растут по абсолютной величине. Уравнения регрессии в этом случае можно записать как $ASY-H = -5.60B_S + 17.17$ и $SYM-H = 8.09B_S - 8.53$.

Из данных, приведенных в табл. 2, можно заключить, что показатели a и b в уравнениях связи

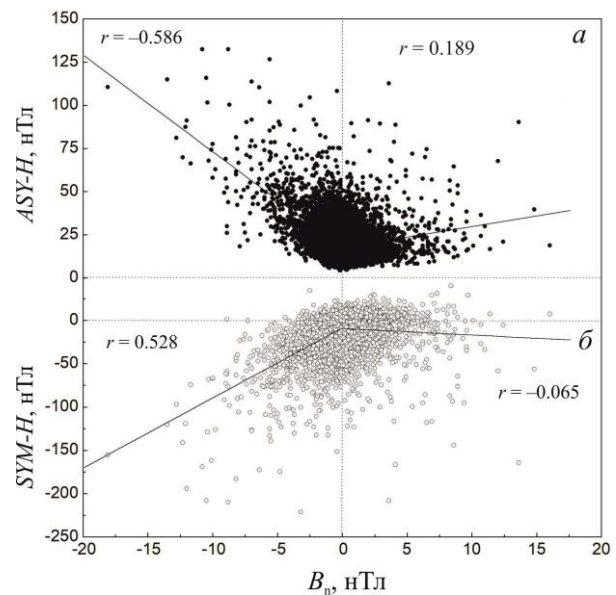


Рис. 2. Распределения среднесуточных значений индексов $ASY-H$ (a) и $SYM-H$ ($б$) как функций связи с северо-южной компонентой B_n ММП, полученных по всему массиву данных с учетом знака B_n : слева — при южном, справа — при северном направлении ММП

$ASY-H$ и $SYM-H$ с параметрами V и $|B|$ по всему массиву представляют собой средние значения от результатов суммирования таких показателей при $B_n > 0$ и $B_n \leq 0$. Заметим, что зависимости индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ от скорости солнечного ветра при разном направлении B_n ММП не меняются. Следует сказать, что коэффициенты корреляции между V и B_n при обоих знаках B_n меньше 0.018, что свидетельствует о независимости V и B_n ММП друг от друга. Практически не зависят друг от друга V и $|B|$ ($r < 0.22$). (Эти сведения получены из отдельного сопоставления параметров.) Характер зависимости индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ от модуля ММП при разных знаках B_n ММП неодинаков — 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. Таким образом, связь между индексами и модулем ММП при учете знака B_n ММП подобна связи между индексами и компонентой B_n ММП на рис. 2.

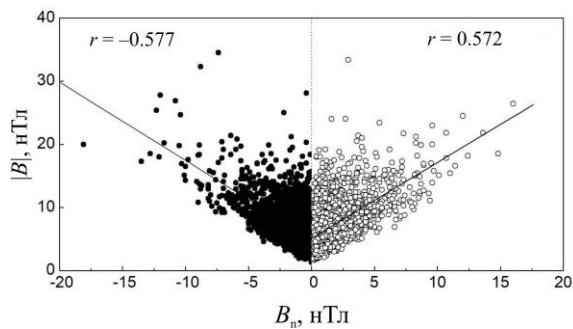


Рис. 3. Соотношения между $|B|$ и B_n ММП при южном (слева) и северном (справа) направлениях ММП, полученные по всему массиву данных

На рис. 3 приведены соотношения между $|B|$ и компонентой B_n при южном и северном направлениях ММП, полученные по всему массиву данных. Уравнения регрессии выглядят следующим образом: при южном направлении ММП $|B| = -1.24B_n + 5.07$, при северном $|B| = 1.20B_n + 5.12$. Видно, что зависимости одинаковы — коэффициенты a и свободные члены b практически равны с учетом знака B_n . Однако индексы *ASY-H* и *SYM-H* проявляют разную зависимость от $|B|$ и B_n при разном направлении ММП (см. рис. 2, табл. 2). Очевидно, что такая картина является следствием реакции внутримангитосферных процессов на направление ММП. Известно [Lockwood, McWilliams, 2021], что механизмы проникновения энергии из солнечного ветра в магнитосферу при южном и северном направлении ММП различаются. А тот факт, что коэффициенты корреляции между *ASY-H* и $|B|$ ММП при обоих направлениях B_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 токовых систем, содержащих магнитосферно-ионосферные продольные токи [Dubuagin et al., 2014].

Оценим вклады $|B|$ ММП в индексы *ASY-H* и *SYM-H* и вычтем их из экспериментальных значений индексов. Для этого используем коэффициенты регрессии a и свободные члены b в уравнениях линейной аппроксимации связи между геомагнитными индексами *ASY-H*, *SYM-H* и $|B|$ ММП из табл. 2. На рис. 4 приведены разности, полученные после исключения рассчитанных вкладов $ASY-H(|B|)$ и $SYM-H(|B|)$ из экспериментальных значений индексов. Распределения разностей индексов $ASY-H - ASY-H(|B|)$ и $SYM-H - SYM-H(|B|)$ относительно северо-южной компоненты ММП без разделения по знаку B_n представлены на панелях *a* и *г*, для $B_n \leq 0$ — на панелях *б* и *д*, для $B_n > 0$ — на панелях *в* и *е* соответственно. Видно, что данные распределяются достаточно закономерно — с 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 на панелях *б* и *д* разности индексов представлены для южного направления ММП, а на панелях *в* и *е* — для северного. Приходится признать, что такой спо-

соб поиска связи индексов с B_n -компонентой неэффективен, поскольку коэффициенты корреляции сопоставляемых данных на панелях *б*, *в*, *д*, *е* малы. Поэтому надо отдать предпочтение рассмотрению связи индексов с B_n , когда массив данных не разделяется по знаку B_n (панели *a* и *г*), но с учетом вклада $|B|$ ММП. 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. Можно заключить, что после исключения вклада модуля ММП индексы *ASY-H* и *SYM-H* показывают линейную корреляцию с северо-южной компонентой ММП: их абсолютные величины растут по мере поворота B_n с севера на юг, при этом *SYM-H* возрастает почти в три раза сильнее, чем *ASY-H*. Соответствующие уравнения регрессии можно записать следующим образом: $\Delta ASY-H = ASY-H - ASY-H(|B|) = -2.11B_n + 0.07$ и $\Delta SYM-H = SYM-H - SYM-H(|B|) = 6.12B_n - 16.91$.

Исследуем поведение индексов *ASY-H* и *SYM-H* в случаях, когда среднесуточные значения B_n -компоненты ММП равны нулю. За рассматриваемый период таких дней оказалось 118. На рис. 5 показаны распределения индексов *ASY-H* и *SYM-H* относительно скорости солнечного ветра (*a*) и модуля ММП (*б*). Из рис. 5 видно, что не проявляются зависимости *ASY-H* от V и *SYM-H* от $|B|$, но имеется умеренная корреляционная связь в соотношениях *ASY-H* — $|B|$ и *SYM-H* — V : с ростом $|B|$ индекс *ASY-H* возрастает, с увеличением V индекс *SYM-H* повышается. Индекс *SYM-H* характеризует симметричную компоненту постоянно присутствующего кольцевого тока и токов хвоста и магнитопаузы, тогда как индекс *ASY-H* отражает их асимметричную компоненту, которая возникает во время магнитосферных возмущений [Uemori et al., 1992]. В данном случае, в отсутствие B_n ММП, с повышением V магнитосфера испытывает сжатие, вследствие чего, вероятно, интенсифицируются кольцевой ток и токовые системы магнитопаузы и хвоста магнитосферы, а с ростом $|B|$ увеличивается перенос в магнитосферу межпланетного электрического поля, приводящий к усилению токовых систем и возникновению частичного кольцевого тока. В этой выборке среднее значение $\langle ASY-H \rangle = (10.8 \pm 2.9)$ нТл, а $\langle SYM-H \rangle = (-2.2 \pm 5.5)$ нТл; эти значения близки к смещениям *ASY-H* и *SYM-H*, определенным при изучении зависимости этих индексов от уровня магнитной активности [Макаров, 2021].

2.2. Результаты анализа средних значений в группах магнитной активности

Рассмотрим связь между индексами *ASY-H* и *SYM-H* и межпланетными параметрами по их средним значениям в группах магнитной активности. В табл. 1 приведены средние в группах магнитной активности значения индексов *ASY-H* и *SYM-H*, а также скорости V солнечного ветра, модуля $|B|$ и северо-южной компоненты B_n ММП. Коэффициенты корреляции r , вычисленные для каждой пары сопоставляемых величин, показывают, что связи между индексами и межпланетными параметрами практически функциональные: в случае *ASY-H* $r > 0.97$, в случае *SYM-H* $r > 0.94$. Это можно объяснить небольшим количеством групп магнитной активности и опериро-

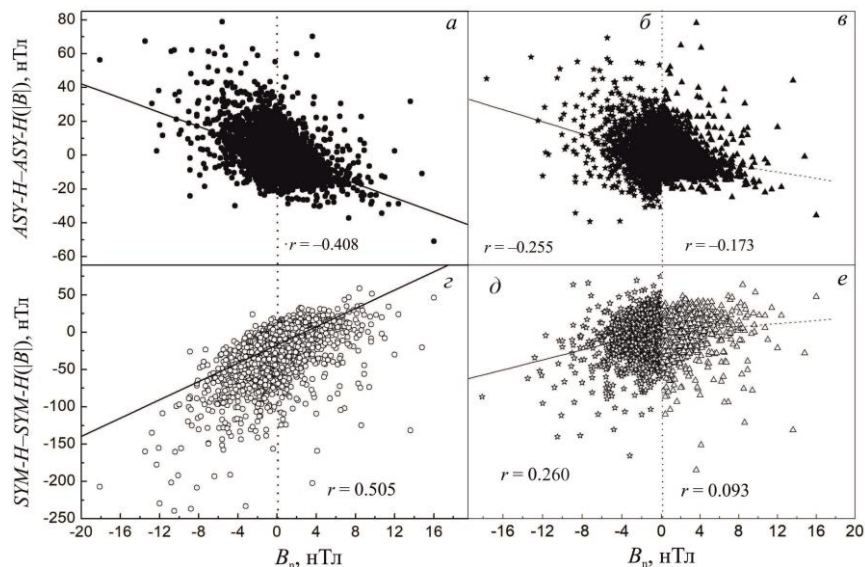


Рис. 4. Распределения среднесуточных значений разностей индексов $ASY-H - ASY-H(|B|)$ (а-в) и $SYM-H - SYM-H(|B|)$ (г-е) как функций связи с северо-южной компонентой B_n ММП, полученных по всему массиву данных без разделения (а, г) и с разделением (б, в, д, е) по знаку B_n

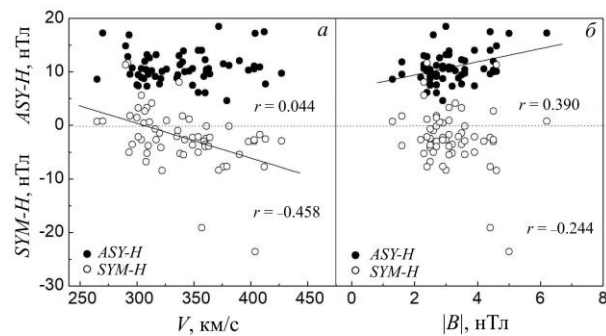


Рис. 5. Распределения среднесуточных значений индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ относительно скорости V солнечного ветра (а) и модуля $|B|$ ММП (б) при $B_n=0$

рованием усредненными в группах данными. Отчетливо видно возрастание индексов с ростом V , $|B|$ и уменьшением B_n , т. е. с изменением направления ММП с северного на южное.

Рассмотрим связь между $ASY-H$, $SYM-H$ и компонентой B_n , разделив данные на две части по знаку B_n ММП, как это было сделано в предыдущем разделе. На рис. 6 показаны зависимости индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ от B_n , полученные отдельно при $B_n \leq 0$ и при $B_n > 0$, соответствующие регрессионные характеристики приведены в табл. 3. Видно, что в отличие от аналогичной картины по всему массиву данных (рис. 2), на рис. 6 при южном и северном направлениях ММП с ростом абсолютной величины B_n индексы $ASY-H$ и $SYM-H$ также растут по абсолютной величине. Получается, что при северном направлении ММП с ростом B_n магнитная активность возрастает. Чтобы прояснить такой неожиданный результат, как и выше, рассмотрим связь между модулем $|B|$ и северо-южной компонентой B_n ММП при $B_n > 0$ и $B_n \leq 0$ для средних значений в группах магнитной активности.

На рис. 7 приведены корреляционные соотношения между $|B|$ и B_n при южном (слева) и северном (справа) направлениях ММП. Так же, как и для всего

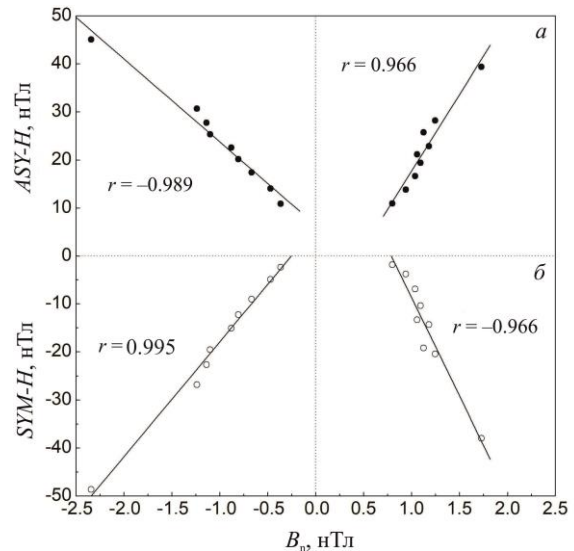


Рис. 6. Распределения значений индексов $ASY-H$ (а) и $SYM-H$ (б) как функций связи с северо-южной компонентой B_n ММП по их средним значениям в группах магнитной активности с учетом знака B_n : слева — при южном, справа — при северном направлении ММП

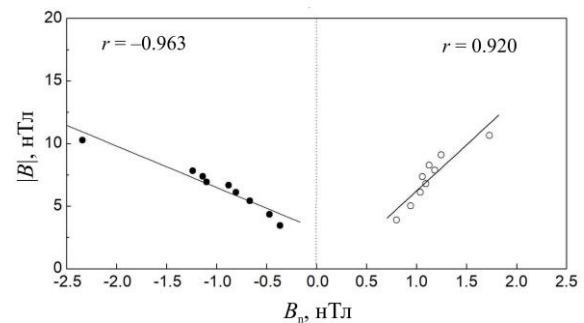


Рис. 7. Соотношение между $|B|$ и B_n при южном (слева) и северном (справа) направлениях ММП по их средним значениям в группах магнитной активности

массива данных (см. рис. 3), $|B|$ пропорционально возрастает с ростом абсолютной величины компоненты

Таблица 3

Коэффициенты регрессии *a* и свободные члены *b* в уравнениях линейной аппроксимации связи между усредненными по группам магнитной активности индексами *ASY-H*, *SYM-H* и межпланетными параметрами *V*, $|B|$, B_n независимо от знака B_n и при разном знаке B_n

Знак B_n ММП	Индекс	<i>V</i>		$ B $		B_n	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Весь массив	<i>ASY-H</i>	0.10	-21.97	3.92	-4.36	-27.42	21.02
	<i>SYM-H</i>	-0.12	38.45	-4.76	17.07	33.67	-13.63
$B_n > 0$	<i>ASY-H</i>	0.11	-28.00	4.04	-7.16	31.90	-14.20
	<i>SYM-H</i>	-0.13	47.89	-5.05	22.28	-41.01	32.32
$B_n \leq 0$	<i>ASY-H</i>	0.13	-36.48	5.02	-8.86	-17.32	6.43
	<i>SYM-H</i>	-0.18	61.97	-6.79	26.17	23.92	6.00

B_n при $B_n > 0$ и $B_n \leq 0$. Уравнения линейной регрессии при южном и северном направлениях ММП имеют вид $|B| = -3.31B_S + 3.18$ и $|B| = 7.35B_N - 1.12$ соответственно. Видно, что коэффициенты регрессии *a* в этих уравнениях заметно отличаются от таковых для всего массива данных.

Оценим вклады модуля ММП в индексы *ASY-H* и *SYM-H* и вычтем их из экспериментальных значений индексов. Для этого используем коэффициенты регрессии *a* и свободные члены *b* в уравнениях линейной аппроксимации связи между геомагнитными индексами *ASY-H*, *SYM-H* и модулем $|B|$ ММП отдельно для $B_n \leq 0$ и $B_n > 0$ из табл. 3. Полученные после исключения рассчитанных вкладов *ASY-H(B)* и *SYM-H(B)* из экспериментальных значений индексов разности, составленные с учетом знака северной южной компоненты ММП $B_n \leq 0$ и $B_n > 0$, распределяются хаотично, без определенной закономерности. В этих соотношениях, а также если не учитывать знак B_n , коэффициенты корреляции между разностями *ASY-H*–*ASY-H(|B|)* и *SYM-H*–*SYM-H(|B|)* с одной стороны и B_n с другой стороны не превышают 0.3. Отсюда следует, что вклад модуля ММП нивелирует зависимость индексов *ASY-H* и *SYM-H* от B_n при рассмотрении такой зависимости отдельно для южного и северного направлений ММП. Таким образом, исследование связи индексов *ASY-H* и *SYM-H* с B_n -компонентой ММП с разбиением данных на группы в соответствии с уровнем магнитной активности можно проводить, не разделяя данные по знаку B_n .

2.3. Сравнение связей, полученных по разным выборкам данных

Если сравнить сведения, представленные в табл. 2, 3 (строки «Весь массив»), то можно заметить некоторые различия. Например, коэффициенты регрессии *a* в случае связи индексов со скоростью *V* солнечного ветра и модулем $|B|$ ММП по разным выборкам достаточно близки, однако в случае связи с северной южной компонентой B_n ММП *a* различаются сильно — почти на порядок величины. Можно предположить, что это определяется выборкой данных. Для всего массива среднесуточных данных размах изменений индекса *ASY-H* составляет примерно 140 нТл, индекса *SYM-H* ~ 275 нТл, скорости *V* ~ 800 км/с, модуля *B* ~ 35 нТл, компоненты B_n ~ 35 нТл. Если же оперировать данными, усредненными по группам магнитной

активности, то наблюдается следующий размах изменений: *ASY-H* ~ 35 нТл, *SYM-H* ~ 45 нТл, *V* ~ 250 км/с, модуля *B* ~ 7 нТл, компоненты B_n ~ 1.5 нТл. Соотношения между размахом соответствующих данных по всему массиву и по группам активности составляют для *ASY-H* ~ 4, *SYM-H* ~ 6, *V* ~ 3, $|B|$ ~ 5, B_n ~ 24. То есть только в случае B_n получается аномально большое соотношение, которое, вероятно, определяет сильное различие коэффициентов *a* в табл. 2, 3. Когда мы рассматриваем связь между индексами и B_n в группах активности, то усредняем данные в группах активности и тем самым уменьшаем размах их значений. Что касается свободных членов *b*, то они определяются разбросом данных в выборках (см. табл. 1).

При рассмотрении всего массива среднесуточных данных индекс *SYM-H* по абсолютной величине зависит от скорости солнечного ветра почти в два раза сильнее, чем индекс *ASY-H*, а относительно модуля ММП оба индекса изменяются почти одинаково. Менее выражена корреляция индексов с северной южной компонентой ММП (см. рис. 1). Ввиду того, что $|B|$ и B_n ММП изменяются пропорционально, для выявления зависимости индексов *ASY-H* и *SYM-H* от B_n необходимо учитывать их связь с $|B|$.

При оперировании данными, усредненными по группам магнитной активности, возрастания абсолютных величин индексов с ростом *V*, $|B|$ более закономерны, а также очевидно их возрастание с уменьшением B_n , т. е. с изменением направления ММП с северной на южную (см. табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование статистической связи геомагнитных индексов магнитосферного кольцевого тока *ASY-H* и *SYM-H* с основными межпланетными параметрами — скоростью *V* солнечного ветра, модулем $|B|$ и нормальной (северной южной) компонентой B_n ММП. Использованы среднесуточные значения за 1981–2015 гг. Регрессионный анализ данных, в предположении линейной аппроксимации, проведен в первом случае для всего массива данных, во втором — для средних значений данных, разбитых на группы в соответствии со среднесуточными значениями планетарного геомагнитного индекса A_p .

Получены следующие результаты:

1. Показано, что поиск связи геомагнитных индексов магнитосферного кольцевого тока *ASY-H* и *SYM-H* с основными межпланетными параметрами

предпочтительнее осуществлять при рассмотрении всего массива данных, а не с разбивкой данных по группам магнитной активности.

2. Определены регрессионные уравнения, описывающие зависимости среднесуточных значений *ASY-H* и *SYM-H* от скорости солнечного ветра, модуля $|B|$ и северо-южной компоненты B_n межпланетного магнитного поля.

3. Обнаружено, что при описании связи геомагнитных индексов магнитосферного кольцевого тока *ASY-H* и *SYM-H* с северо-южной компонентой B_n ММП необходимо учитывать вклад модуля $|B|$ ММП.

Результаты работы могут быть использованы для изучения крупномасштабных закономерностей взаимодействия солнечного ветра и земной магнитосферы, например сезонных и циклических изменений геомагнитной активности, а также могут быть полезными при исследовании солнечно-земных связей и проявлений космической погоды в процессах, изучаемых в метеорологии, сейсмологии, биофизике и т. д.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вайсберг О.Л., Смирнов В.Н., Застенкер Г.Н. и др. Взаимодействие солнечного ветра с внешней магнитосферой Земли. *Плазменная гелиогеофизика*. Т. 1 / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 378–422.

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.

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).

Akasofu S.-I. Interplanetary energy flux associated with magnetospheric substorms. *Planet. Space Sci.* 1979. Vol. 27, iss. 4. P. 425–431. DOI: [10.1016/0032-0633\(79\)90119-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(79)90119-3).

Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., et al. Magnetic storms and magnetotail currents. *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, iss. A4. P. 7737–7747. DOI: [10.1029/95JA03509](https://doi.org/10.1029/95JA03509).

Ballif J.R., Jones D.E., Coleman P.J. Further evidence on the correlation between transverse fluctuations in the interplanetary magnetic field and K_p . *J. Geophys. Res.* 1969. Vol. 74, iss. 9. P. 2289–2301. DOI: [10.1029/JA074i009p02289](https://doi.org/10.1029/JA074i009p02289).

Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst*. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80, iss. 31. P. 4204–4214. DOI: [10.1029/ja080i031p04204](https://doi.org/10.1029/ja080i031p04204).

Dubyagin S., Ganushkina N., Kubyskhina M., Liemohn M. Contribution from different current systems to *SYM* and *ASY* midlatitude indices. *J. Geophys. Res.* 2014. Vol. 119. P. 7243–7263. DOI: [10.1002/2014JA020122](https://doi.org/10.1002/2014JA020122).

Echer E., Tsurutani B.T., Gonzalez W.D. Interplanetary origins of moderate ($-100 \text{ nT} < Dst \leq -50 \text{ nT}$) geomagnetic storms during solar cycle 23 (1996–2008). *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118, iss. 1. P. 385–392. DOI: [10.1029/2012JA018086](https://doi.org/10.1029/2012JA018086).

Friis-Christensen E., Lassen K., Wilhelm J., et al. Critical component of the interplanetary magnetic field responsible for large geomagnetic effects in the polar cap. *J. Geophys. Res.* 1972. Vol. 77, iss. 19. P. 3371–3376. DOI: [10.1029/JA077i019p03371](https://doi.org/10.1029/JA077i019p03371).

Holser R.E., Slavin J.A. An evaluation of three predictors of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87, iss. A4. P. 2558–2562. DOI: [10.1029/JA087iA04p02558](https://doi.org/10.1029/JA087iA04p02558).

Iyemori T., Araki T., Kamei T., Takeda M. *Mid-latitude geomagnetic indices ASY and SYM (Provisional) No. 1 (1989–1990)*. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism; Kyoto University, Kyoto, 1992. 110 p.

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. DOI: [10.1029/95JA03709](https://doi.org/10.1029/95JA03709).

Meng X., Tsurutani B.T., Mannucci A.J. The solar and interplanetary causes of superstorms (minimum *Dst* $\leq -250 \text{ nT}$) during the space age. *J. Geophys. Res.* 2019. Vol. 124, iss. 6. P. 3926–3948. DOI: [10.1029/2018JA026425](https://doi.org/10.1029/2018JA026425).

Murayama T., Aoki T., Nakai H., Hakamada K. Empirical formula to relate the auroral electrojet intensity with interplanetary parameters. *Planet. Space Sci.* 1980. Vol. 28, iss. 8. P. 803–813. DOI: [10.1016/0032-0633\(80\)90078-1](https://doi.org/10.1016/0032-0633(80)90078-1).

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).

Rostoker G., Falthammer C.-G. Relationship between changes in the interplanetary magnetic field and variations in the magnetic field at the Earth's surface. *J. Geophys. Res.* 1967. Vol. 72, iss. 23. P. 5853–5863. DOI: [10.1029/JZ072i023p05853](https://doi.org/10.1029/JZ072i023p05853).

Snyder C.W., Neugebauer M., Rao N.R. The solar wind velocity and its correlation with cosmic ray variations and with solar and geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1963. Vol. 68, iss. 24. P. 6361–6370. DOI: [10.1029/JZ068i024p06361](https://doi.org/10.1029/JZ068i024p06361).

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).

Wilcox J.M., Schatten K.H., Ness N.F. Influence of interplanetary magnetic field and plasma on geomagnetic activity during quiet-sun condition. *J. Geophys. Res.* 1967. Vol. 72, iss. 1. P. 19–26. DOI: [10.1029/JZ072i001p00019](https://doi.org/10.1029/JZ072i001p00019).

Yermolaev Yu.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 29 марта 2022 г.).

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.).

Как цитировать эту статью:

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).