

## СВЯЗЬ ИНДЕКСА $ASY-H$ С ПАРАМЕТРАМИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ И АВРОРАЛЬНОЙ АКТИВНОСТЬЮ НА ГЛАВНЫХ ФАЗАХ МАГНИТНЫХ БУРЬ ВО ВРЕМЯ СОБЫТИЙ CIR И ICME

### RELATIONSHIP OF THE $ASY-H$ INDEX WITH INTERPLANETARY MEDIUM PARAMETERS AND AURORAL ACTIVITY IN MAGNETIC STORM MAIN PHASES DURING CIR AND ICME EVENTS

**Р.Н. Бороев**

Институт космических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, boroyev@ikfia.ysn.ru  
Северо-Восточный федеральный университет  
им. М.К. Аммосова,  
Якутск, Россия, boroyev@ikfia.ysn.ru

**R.N. Boroyev**

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy  
of SB RAS,  
Yakutsk, Russia, boroyev@ikfia.ysn.ru  
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,  
Yakutsk, Russia, boroyev@ikfia.ysn.ru

**М.С. Васильев**

Северо-Восточный федеральный университет  
им. М.К. Аммосова,  
Якутск, Россия, ms\_vasiliev@ikfia.ysn.ru  
Институт космических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, ms\_vasiliev@ikfia.ysn.ru

**M.S. Vasiliev**

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,  
Yakutsk, Russia, ms\_vasiliev@ikfia.ysn.ru  
Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy  
of SB RAS,  
Yakutsk, Russia, ms\_vasiliev@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** В работе исследована связь  $ASY-H$ -индекса, характеризующего интенсивность частичного кольцевого тока, с параметрами межпланетной среды и авроральной активностью на главных фазах магнитных бурь, индуцированных солнечным ветром (СВ) разных типов. За период 1979–2017 гг. было отобрано 107 магнитных бурь, индуцированных такими типами СВ, как CIR (Corotating Interaction Region) и ICME (Interplanetary Coronal Mass Ejection). Рассматривались магнитные бури с минимальным значением  $Dst$ -индекса  $Dst_{\min} \leq -50$  нТл. Показано, что на главных фазах магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME, средние значения индекса  $ASY-H$  ( $ASY_{\text{aver}}$ ) увеличиваются с ростом электрического поля СВ и южной  $B_z$ -компоненты ММП. Связь между  $ASY_{\text{aver}}$  и скоростью СВ не обнаружена. Тип СВ не влияет на вариации  $ASY_{\text{aver}}$ . Установлено, что и для CIR, и для ICME средние значения индексов  $AE$  ( $AE_{\text{aver}}$ ) и  $K_p$  ( $K_{p \text{ aver}}$ ) коррелируют с  $ASY_{\text{aver}}$ . Наибольший коэффициент корреляции между  $AE_{\text{aver}}$  и  $ASY_{\text{aver}}$  ( $r=0.74$ ) наблюдается для магнитных бурь, индуцированных CIR. Более тесная связь между  $K_{p \text{ aver}}$  и  $ASY_{\text{aver}}$  ( $r=0.64$ ) наблюдается для магнитных бурь, индуцированных ICME. Вариации  $ASY_{\text{aver}}$  коррелируют с  $Dst_{\min}$ . Связь между  $ASY_{\text{aver}}$  и скоростью развития главной фазы магнитной бури слабая.

**Ключевые слова:** магнитная буря,  $ASY-H$ -индекс,  $Dst$ -индекс, солнечный ветер, электрическое поле.

**Abstract.** In this study, we examine the relationship of the  $ASY-H$  index characterizing the partial ring current intensity with interplanetary medium parameters and auroral activity during the main phase of magnetic storms, induced by the solar wind (SW) of different types. Over the period 1979–2017, 107 magnetic storms driven by CIR and ICME (MC + Ejecta) events have been selected. We consider magnetic storms with  $Dst_{\min} \leq -50$  nT. The average  $ASY-H$  index ( $ASY_{\text{aver}}$ ) during the magnetic storm main phase is shown to increase with increasing SW electric field and southward IMF  $B_z$  regardless of SW type. There is no relationship between  $ASY_{\text{aver}}$  and SW velocity. For the CIR and ICME events, the average  $AE$  ( $AE_{\text{aver}}$ ) and  $K_p$  ( $K_{p \text{ aver}}$ ) indices have been found to correlate with  $ASY_{\text{aver}}$ . The highest correlation coefficient between  $AE_{\text{aver}}$  and  $ASY_{\text{aver}}$  ( $r=0.74$ ) is observed for the magnetic storms generated by CIR events. A closer relationship between  $K_{p \text{ aver}}$  and  $ASY_{\text{aver}}$  ( $r=0.64$ ) is observed for the magnetic storms induced by ICME events. The  $ASY_{\text{aver}}$  variations correlate with  $Dst_{\min}$ . The relationship between  $ASY_{\text{aver}}$  and the rate of storm development is weak.

**Keywords:** magnetic storm,  $ASY-H$  index,  $Dst$  index, solar wind, electric field.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в периоды магнитных бурь усиливаются крупномасштабные магнитосферные токовые системы, авроральные электроджеты смещаются на более низкие широты и регистрируются интенсивные суббуревые возмущения. Одновременно наблюдается значительное понижение горизонталь-

ной компоненты магнитного поля на низких широтах. Все это приводит к значительным вариациям геомагнитных индексов [Акасофу, Чепмен, 1974; Нишида, 1980]. Низкоширотный  $Dst$ -индекс используется для оценки интенсивности кольцевого тока во время магнитной бури и является мерой геоэффективности межпланетных возмущений [Sugiura, 1964; Burton et al., 1975]. Высокоширотный  $AE$ -индекс и

среднширотный  $K_p$ -индекс характеризуют интенсивность аврорального тока в периоды магнитной бури и являются индикаторами суббулевой активности [Davis, Sugiura, 1966]. В период магнитной бури индексы геомагнитной активности коррелируют друг с другом [Ляцкий, Мальцев, 1983]. Однако развитие кольцевого тока с суббулями не связано. По мнению ряда авторов [Yuemori, Rao, 1996; Sharma et al., 2003], основная причина развития кольцевого тока — усиление магнитосферной конвекции в периоды длительной южной  $B_z$ -компоненты ММП, эффективность которой связывают с воздействием электрического поля СВ:  $E_{sw} = V_{sw} \times B_z$  [Gonzalez et al., 1994; Kane, 2005]. Среди параметров ММП (величины  $B$  ММП, компоненты  $B_z$ ) и СВ (скорость, плотность и температура плазмы) электрическое поле, связанное с движением плазмы СВ и величиной южной  $B_z$ -компоненты ММП, является главным фактором развития магнитной бури [Gonzalez et al., 1994; Kane, 2005].

Результаты статистических и морфологических исследований показывают, что интенсивность магнитосферно-ионосферных возмущений (магнитные бури и суббури) зависит также от типа СВ [Borovsky, Denton, 2006; Despirak et al., 2009]. В настоящее время выделяют следующие типы СВ: межпланетные проявления корональных выбросов (Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME), включающие магнитные облака (Magnetic Cloud, MC) и поршни (Ejecta), области сжатия перед высокоскоростными потоками (Corotating Interaction Region, CIR), а также области сжатия перед ICME (Sheath). Каждый тип СВ имеет определенный набор параметров СВ и ММП. В работе [Дремухина и др., 2018] были рассмотрены функции связи, представляющие собой выражения для электрического поля СВ  $E_{sw}$ , вычисленного через скорость СВ  $V_{sw}$  и магнитное поле  $B$ , дополненные учетом часового угла, а также влияния динамического давления плазмы. Было показано, что использование функции связи Бартона, связывающей интегральное электрическое поле СВ  $E_{sw}$  с индексом  $Dst$ , позволяет получить самые высокие коэффициенты корреляции для всех типов СВ. Наибольшая геоэффективность обнаруживается для магнитных бурь, генерированных Sheath и CIR, тогда как для бурь, индуцированных ICME (MC+Ejecta), происходит насыщение минимального по модулю значения  $Dst$ -индекса  $|Dst_{min}|$  при больших величинах  $E_{sw}$  [Plotnikov, Barkova, 2007; Николаева и др., 2011; Yermolaev et al., 2012]. Величина  $AE$ -индекса, в отличие от  $Dst$ , на главной фазе магнитной бури не зависит от величины  $E_{sw}$  почти для всех типов СВ, кроме MC. Наблюдается нелинейная зависимость  $AE$ -индекса от  $E_{sw}$  в MC. Связь между  $K_p$ -индексом и  $E_{sw}$  характеризуется линейной эмпирической зависимостью для CIR и немонотонной зависимостью для MC [Plotnikov, Barkova, 2007; Yermolaev et al., 2012]. Однако в работе [Boroyev, Vasiliev, 2018] было показано, что для CIR, в отличие от ICME, индекс  $AE$  увеличивается с ростом электрического поля СВ.  $K_p$ -индекс коррелирует с  $E_{sw}$  только для ICME. Различие результатов, по-видимому, обусловлено разными методиками определения авроральной актив-

ности на главной фазе магнитной бури. В работах [Plotnikov, Barkova, 2007; Николаева и др., 2011; Yermolaev et al., 2012] сопоставлялись экстремальные значения  $Dst$ -,  $AE$ - и  $K_p$ -индексов с минимальными значениями  $B_z$ -компоненты ММП и конвективного электрического поля  $E_{sw}$  либо  $Dst_{min}$ , значения  $AE$  и  $K_p$  с значениями  $B_z$  ( $E_{sw}$ ) в момент наступления  $Dst_{min}$ . Эти подходы сравнивают только отдельные (экстремальные) точки при развитии процесса и слабо учитывают динамику процесса генерации магнитной бури. В работе [Boroyev, Vasiliev, 2018] авторы рассматривали средние значения  $AE$ - и  $K_p$ -индексов на главной фазе магнитной бури и проводили сравнительный анализ со средним значением электрического поля СВ.

Во время магнитной бури кроме глобальных токовых систем формируются и более мелкомасштабные локальные токовые системы, вносящие значительный вклад в вариации  $Dst$ -индекса, например частичный кольцевой ток [Fok et al., 2001; Liemohn et al., 2001; Kozuga, Liemohn, 2003]. В отличие от симметричного кольцевого тока, частичный кольцевой ток связан с токами авроральной зоны через систему продольных токов вечерне-ночного сектора магнитосферы [Grafe et al., 1997; Feldstein et al., 2005; Бархатова, 2013]. Возникновение частичного кольцевого тока, как и симметричного кольцевого тока, связано с инжекцией частиц плазменного слоя во внутреннюю магнитосферу в периоды усиления магнитосферной конвекции [Бахмина, Калегаев, 2008; Калегаев и др., 2008]. Для оценки интенсивности частичного кольцевого тока используется среднширотный  $ASY-H$ -индекс [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. Особый интерес представляют исследования связи динамики частичного кольцевого тока с авроральными возмущениями и симметричным кольцевым током в периоды магнитных бурь, индуцированных СВ разных типов.

Цель данной работы — исследовать корреляционные связи  $ASY-H$ -индекса с параметрами межпланетной среды и индексами суббулевой активности на главных фазах магнитных бурь, индуцированных разными типами солнечного ветра.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для оценки геомагнитной активности в данной работе использовались  $AE$ -,  $K_p$ -,  $ASY-H$ - и  $Dst$ -индексы [<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>]. За период 1979–2017 гг. было отобрано 107 магнитных бурь с  $Dst_{min} \leq -50$  нТл, индуцированных CIR и ICME (MC+Ejecta). Другие типы СВ в данной работе не рассматривались. Магнитная буря считалась связанной с данным типом СВ, если главная фаза и минимум  $Dst$ -индекса совпадали по времени с этим типом СВ. Методика классификации типов СВ подробно описана в работах [Ермолаев и др., 2009; Yermolaev et al., 2010]. На сайте [<ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog>] приведен каталог типов СВ. Для каждого события, как и в работе [Boroyev, Vasiliev, 2018], были вычислены средние значения  $AE$ -,  $K_p$ - и  $ASY-H$ -индексов и скорость развития магнитной бури ( $|\Delta Dst|/\Delta T$ ) на глав-

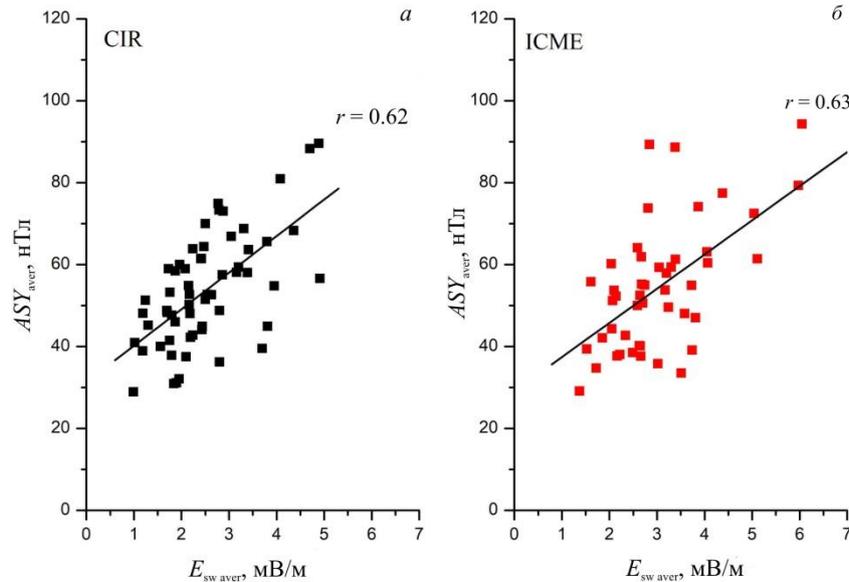


Рис. 1. Зависимость среднего значения индекса  $ASY-H$  ( $ASY_{aver}$ ) от среднего значения электрического поля СВ ( $E_{sw\,aver}$ ) на главных фазах магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME: квадраты — отдельные магнитные бури, прямые линии — линейная аппроксимация

ной фазе. Длительность  $\Delta T$  главной фазы магнитной бури определялась как временной интервал от момента начала резкого уменьшения  $Dst$ -индекса ( $Dst_0$  — значение в этот момент) до момента регистрации  $Dst_{min}$ ;  $|\Delta Dst| = |Dst_{min} - Dst_0|$ . Для учета параметров СВ и ММП по среднечасовым данным [http://www.omniweb.com] определялись средние значения азимутального электрического поля СВ, южной  $B_z$ -компоненты ММП и скорости СВ за период времени, совпадающий с главной фазой магнитной бури. Средние значения параметров межпланетной среды и индексов геомагнитной активности позволяют в целом оценить развитие главной фазы магнитной бури.

Для выявления связи между геомагнитными индексами и параметрами СВ и ММП использовалась линейная аппроксимация как простейший способ установления зависимости между величинами. Были вычислены коэффициенты корреляции Пирсона и вероятности для определения статистической значимости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 показана зависимость средней величины  $ASY-H$ -индекса  $ASY_{aver}$  от средней величины электрического поля СВ  $E_{sw\,aver}$  на главных фазах бурь, индуцированных CIR и ICME, а в табл. 1 представлены уравнения линейной регрессии между  $ASY_{aver}$  и  $E_{sw\,aver}$ , а также коэффициенты корреляции  $r$  и уровень значимости  $P$ . Из рис. 1 видно, что на главной фазе магнитной бури  $ASY_{aver}$  увеличивается с ростом  $E_{sw\,aver}$  как для CIR, так и для ICME. Следовательно, тип СВ не отражается в вариациях  $ASY-H$ -индекса.

Известно, что с азимутальным электрическим полем  $E_{sw} = V_{sw} \times B_z$  связан один из значимых геоэффективных параметров СВ — южная  $B_z$ -компонента ММП [Gonzalez et al., 1994; Kane, 2005]. С учетом типа СВ проведен корреляционный анализ индекса

$ASY-H$ , величины южной  $B_z$ -компоненты ММП, а также скорости СВ  $V_{sw}$ .

Таблица 1

Количество магнитных бурь  $N$ , коэффициенты корреляции  $r$ , уровни значимости  $P$  и уравнения линейной регрессии между  $ASY_{aver}$  и  $E_{sw\,aver}$  для CIR и ICME

Тип СВ	$N$	$E_{sw\,aver}$		
		$r$	$P$	аппроксимация
CIR	59	0.62	0.99	$y = 8.9x + 31.2$
ICME	48	0.63	0.99	$y = 8.3x + 29$

Таблица 2

Количество магнитных бурь  $N$ , коэффициенты корреляции  $r$ , уровни значимости  $P$  и уравнения линейной регрессии между  $ASY_{aver}$  и  $|B_{z\,aver}|$  для CIR и ICME

Тип СВ	$N$	$ B_{z\,aver} $		
		$r$	$P$	аппроксимация
CIR	59	0.63	0.99	$y = 3.44x + 33.8$
ICME	48	0.56	0.99	$y = 2.89x + 33.3$

На рис. 2, а, в показаны зависимости средней величины  $ASY-H$  от среднего значения модуля южной  $B_z$ -компоненты ММП  $|B_{z\,aver}|$  на главных фазах магнитных бурь для СВ двух типов, а в табл. 2 приведены  $r$ ,  $P$  и уравнения линейной регрессии между  $ASY_{aver}$  и  $|B_{z\,aver}|$ . Из рис. 2, а, в видно, что для обоих типов СВ  $ASY_{aver}$  линейно растет с ростом  $|B_{z\,aver}|$  ( $r=0.63$  для CIR и  $r=0.56$  для ICME). Однако и для CIR, и для ICME отсутствует явная линейная связь между  $ASY_{aver}$  и  $V_{sw\,aver}$  (см. рис. 2, б, г, коэффициенты корреляции не приведены).

Связь  $ASY-H$  с индексами суббуревой активности  $AE$  и  $K_p$  показана на рис. 3. В табл. 3 представлены  $r$ ,  $P$  и уравнения линейной регрессии между  $AE_{aver}$ ,  $K_p$  и  $ASY_{aver}$  на главных фазах магнитных бурь для СВ двух типов. Из рис. 3, а, в видно, что на главной фазе магнитной бури среднее значение  $AE$ -индекса увеличивается с ростом среднего значения  $ASY-H$  как для CIR, так и для ICME, однако в случаях CIR (табл. 3)

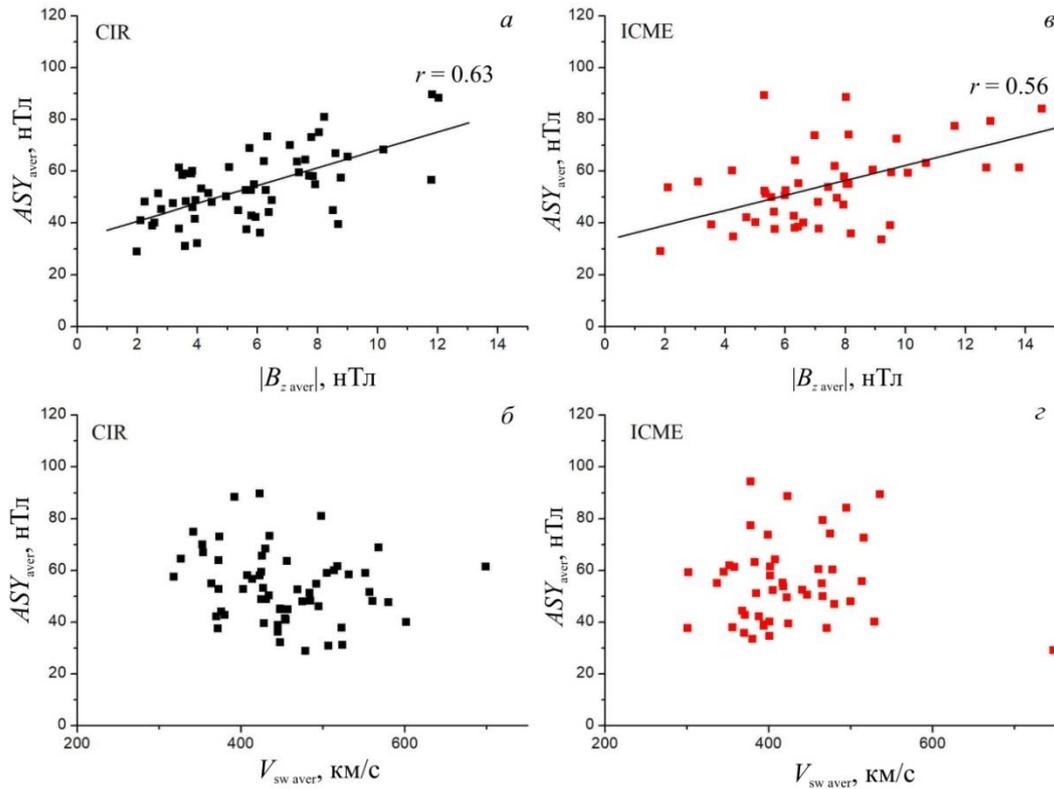


Рис. 2. Зависимость  $ASY_{aver}$  от средних значений модуля южной  $B_z$  ММП и скорости СВ на главных фазах магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME событиями: квадраты — отдельные магнитные бури, прямые линии — линейная аппроксимация

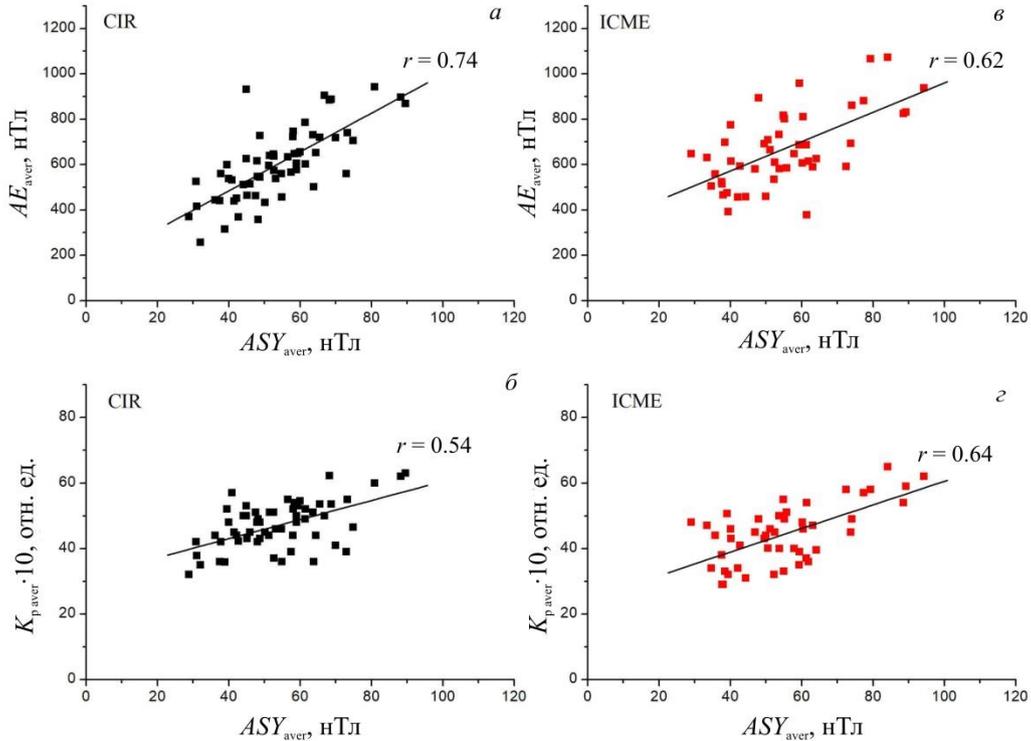


Рис. 3. Зависимость  $AE_{aver}$ ,  $K_p_{aver}$  от  $ASY_{aver}$  на главных фазах магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME: квадраты — отдельные магнитные бури, прямые линии — линейная аппроксимация

корреляция между  $AE_{aver}$  и  $ASY_{aver}$  выше ( $r=0.74$ ). Высокие коэффициенты корреляции между  $K_p_{aver}$  и  $ASY_{aver}$  (рис. 3, д) наблюдаются для ICME ( $r=0.64$ ).

Для выяснения роли частичного кольцевого тока в развитии низкоширотных геомагнитных возмущений проведен сравнительный анализ  $ASY-H$  и  $Dst_{min}$ ,

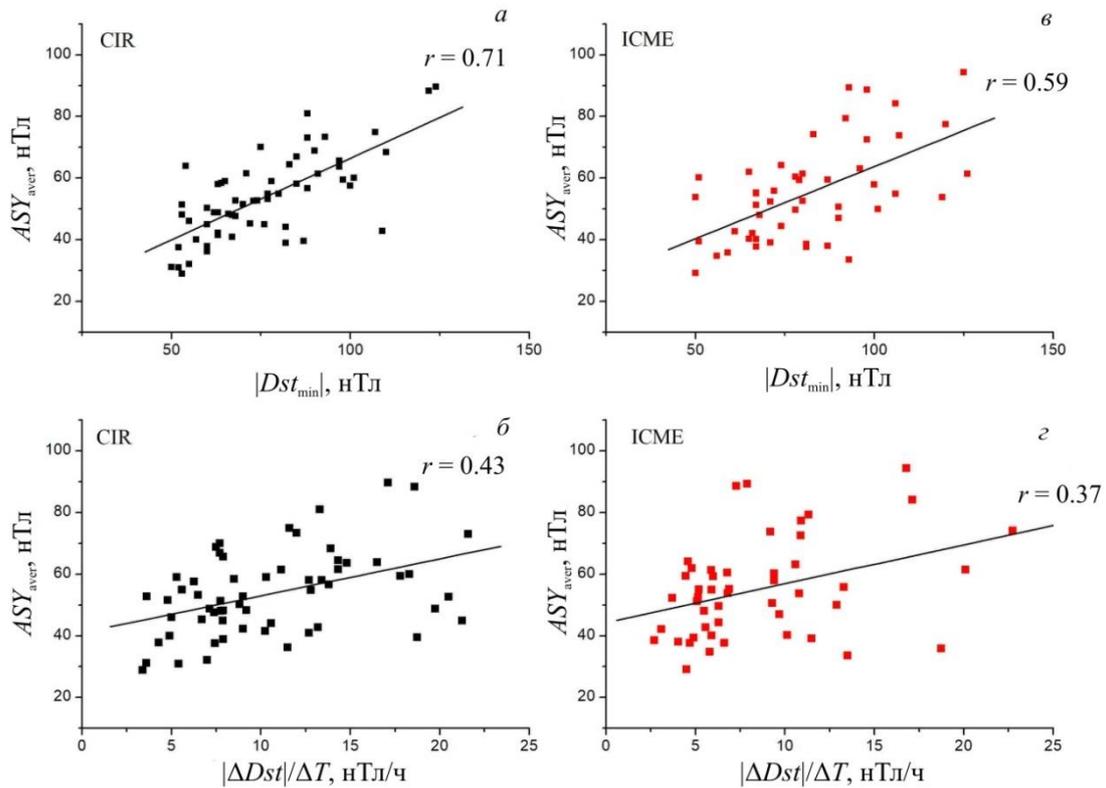


Рис. 4. Зависимость  $ASY_{aver}$  от  $|Dst_{min}|$  и скорости развития главных фаз магнитных бурь  $|\Delta Dst|/\Delta T$ , индуцированных CIR и ICME: квадраты — отдельные магнитные бури, прямые линии — линейная аппроксимация

Таблица 3

Количество магнитных бурь  $N$ , коэффициенты корреляции  $r$ , уровни значимости  $P$  и уравнения линейной регрессии между  $AE_{aver}$ ,  $K_p$  и  $ASY_{aver}$  для CIR и ICME

Тип СВ	$N$	$AE_{aver}$			$K_p$		
		$r$	$P$	аппроксимация	$r$	$P$	аппроксимация
CIR	59	0.74	0.99	$y=8.6x+142$	0.54	0.99	$y=0.29x+31.4$
ICME	48	0.62	0.99	$y=6.5x+312$	0.64	0.99	$y=0.36x+24.5$

Таблица 4

Количество магнитных бурь  $N$ , коэффициенты корреляции  $r$ , уровни значимости  $P$  и уравнения линейной регрессии между  $ASY_{aver}$  и  $|Dst_{min}|$ ,  $|\Delta Dst|/\Delta T$  для CIR и ICME

Тип СВ	$N$	$ Dst_{min} $			$ \Delta Dst /\Delta T$		
		$r$	$P$	аппроксимация	$r$	$P$	аппроксимация
CIR	59	0.71	0.99	$y=0.5x+13.5$	0.43	0.99	$y=1.2x+41$
ICME	48	0.59	0.99	$y=0.47x+17$	0.37	0.99	$y=1.3x+44$

а также скорости развития главной фазы магнитной бури для СВ двух типов. На рис. 4, а, в представлена зависимость средней величины ASY-H-индекса от минимального по модулю значения Dst-индекса  $|Dst_{min}|$  для магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME. Зависимость  $ASY_{aver}$  от скорости развития главной фазы магнитной бури  $|\Delta Dst|/\Delta T$  для СВ двух типов представлена на рис. 4, б, г. Из рис. 4, а, в видно, что на главной фазе магнитной бури среднее значение ASY-H увеличивается с ростом  $|Dst_{min}|$  для обоих типов СВ, при этом более высокий коэффициент корреляции между  $ASY_{aver}$  и  $|Dst_{min}|$  (табл. 4) наблюдается для CIR ( $r=0.71$ ). Для магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME (рис. 4, б, г), наблюдаются низкие коэффициенты корреляции между  $ASY_{aver}$  и скоростью развития главной фазы.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Известно, что различие параметров СВ и ММП в типах СВ проявляется в вариациях AE-,  $K_p$ - и Dst-индексов. Например, в случаях CIR, в отличие от ICME, на главной фазе магнитной бури наблюдаются большие скорости СВ и малые значения южной  $B_z$ -компоненты ММП (например, [Николаева и др., 2011]). Значения геомагнитных индексов зависят не только от интенсивности токовых систем, связанной с параметрами межпланетной среды, но и от их положения относительно станций, по данным которых вычисляются индексы. На положение авроральных (ионосферных) токовых систем влияет размер аврорального овала: чем шире овал, тем на более низких широтах наблюдаются авроральные токи. В свою очередь, на размеры аврорального овала

наибольшее влияние оказывают вариации южной  $B_z$ -компоненты ММП: уменьшение  $B_z$  ММП приводит к расширению овала и сдвигу его границ к низким широтам. Наиболее сильно этот эффект проявляется на ночной стороне магнитосферы. Значительные изменения  $B_z$  ММП наблюдаются на главной фазе магнитной бури. В работе [Boroyev, Vasiliev, 2018] авторы предполагают, что именно тип СВ определяет величину смещения токовых систем относительно станций, по данным которых вычисляются  $AE$ - и  $K_p$ -индексы. В период ICME, в отличие CIR, низкие значения южной  $B_z$ -компоненты ММП приводят к расширению аврорального овала и, соответственно, к смещению авроральных токов к более низким широтам. В результате мы наблюдаем более высокие коэффициенты корреляции между  $E_{sw\,aver}$  и  $K_p\,aver$ , чем между  $E_{sw\,aver}$  и  $AE_{aver}$ .

Индексы авроральной активности  $AE$ ,  $K_p$  в период магнитной бури характеризуют интенсивность ионосферных токов. Вопрос влияния типа СВ на магнитосферные токи остается открытым. В данной работе рассмотрены вариации  $ASY-H$ -индекса, характеризующего интенсивность частичного кольцевого тока, в периоды магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME. По мнению ряда авторов [Grafe et al., 1997; Feldstein et al., 2005; Бархатов и др., 2008; Бархатова, 2013], частичный кольцевой ток, связанный с авроральными (ионосферными) токами, является магнитосферной частью единой токовой системы. Например, в работе [Бархатов и др., 2008] проведена оценка роли магнитосферно-ионосферных токовых систем в асимметрии геомагнитного возмущения, а также рассмотрена временная динамика индексов частичного кольцевого тока и авроральных электроджетов на главной фазе магнитной бури без учета типа СВ.

В данной работе, в отличие от [Бархатов и др., 2008], проведен корреляционный анализ индекса  $ASY-H$  и параметров межпланетной среды на главных фазах магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME, и вычислены средние значения индексов и параметров межпланетной среды без учета их временной динамики. Полученные результаты подтверждают, что электрическое поле СВ и связанная с ним южная  $B_z$ -компонента ММП являются основными геоэффективными факторами развития частичного кольцевого тока на главных фазах магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME. Из рис. 1, 2 следует, что в обоих случаях наблюдается зависимость  $ASY-H$ -индекса от  $E_{sw}$  и  $B_z$  ММП с высокими коэффициентами корреляции ( $r > 0.5$ ), но при этом отсутствует явная связь между  $ASY-H$  и скоростью СВ. Тип СВ не влияет на вариации  $ASY-H$ -индекса на главной фазе магнитной бури. Вероятно, развитие магнитосферной токовой системы (частичный кольцевой ток) не зависит от типа СВ. Динамика частичного кольцевого тока полностью определяется магнитосферной конвекцией, зависящей от электрического поля СВ. Однако на ионосферную часть токовой системы, связанную с частичным кольцевым током, тип СВ влияет. Из рис. 3 видно, что индекс  $ASY-H$  коррелирует с интенсивностью авроральных токов на главных фазах магнитных бурь,

индуцированных CIR и ICME. Наибольший коэффициент корреляции ( $r=0.74$ ) между средними значениями  $AE$ - и  $ASY-H$ -индексов при достаточно высокой статистической значимости ( $P=0.99$ ) наблюдается для магнитных бурь, индуцированных CIR. Напротив, более тесная связь между средними значениями  $K_p$  и  $ASY-H$  наблюдается для магнитных бурь, индуцированных ICME. Различие в вариациях  $AE$ - и  $K_p$ -индексов, вероятно, связано с положением авроральных электроджетов относительно станций, по данным которых вычисляются индексы  $AE$  и  $K_p$  [Boroyev, Vasiliev, 2018].

В данной работе также исследована связь частичного кольцевого тока с интенсивностью и скоростью развития главных фаз магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME. Из рис. 4 следует, что частичный кольцевой ток не оказывает существенного влияния на скорость развития магнитной бури. Расчеты показывают низкие коэффициенты корреляции между  $ASY-H$  и  $|\Delta Dst|/\Delta T$  для CIR ( $r=0.43$ ) и ICME ( $r=0.37$ ). По-видимому, это связано с тем, что частичный кольцевой ток, являющийся локальной токовой системой, наблюдается на главной фазе магнитной бури только несколько часов, в отличие от крупномасштабных магнитосферных токовых систем (ток на магнитопаузе, симметричный кольцевой ток, токи хвоста). Соответственно, вклад частичного кольцевого тока в скорость развития магнитной бури будет незначительным.

Однако частичный кольцевой ток влияет на величину  $Dst$ -индекса. Анализ показал, что  $ASY-H$ -индекс коррелирует с  $Dst_{min}$  для магнитных бурь, индуцированных CIR и ICME. Полученные результаты согласуются с ранее проведенными исследованиями [Liemohn et al., 2001; Feldstein et al., 2005]. Так, согласно модели [Liemohn et al., 2001], на главной фазе магнитной бури и в начале восстановительной фазы в  $Dst$ -вариации преобладает вклад асимметричной части кольцевого тока по сравнению с вкладом токов хвоста. По оценкам других авторов [Feldstein et al., 2005], вклады частичного кольцевого тока и токов хвоста меняются от 25 до 80 %. Таким образом, частичный кольцевой ток на главной фазе магнитной бури вносит дополнительный вклад в асимметрию утро-вечер низкоширотных геомагнитных возмущений [Love, Gannon, 2009].

В дальнейшем планируется провести анализ асимметрии кольцевого тока на главных фазах магнитных бурь, индуцированных СВ разных типов, с использованием спутниковых наблюдений ENA и данных наземных магнитометров.

Получены следующие результаты:

1. Среднее значение  $ASY-H$ -индекса ( $ASY_{aver}$ ) на главной фазе магнитной бури зависит от электрического поля СВ и южной  $B_z$ -компоненты ММП. Тип СВ не влияет на вариации  $ASY_{aver}$ . Связь между  $ASY_{aver}$  и скоростью СВ не обнаружена.

2. Средние значения индексов  $AE$  ( $AE_{aver}$ ) и  $K_p$  ( $K_p\,aver$ ) коррелируют с  $ASY_{aver}$  и для CIR, и для ICME. Наибольший коэффициент корреляции между  $AE_{aver}$  и  $ASY_{aver}$  ( $r=0.74$ ) наблюдается для магнитных бурь, индуцированных CIR, а более тесная связь между  $K_p\,aver$  и  $ASY_{aver}$  ( $r=0.64$ ) наблюдается для магнитных бурь, индуцированных ICME.

3. Значение  $ASY_{\text{aver}}$  коррелирует с минимальным значением *Dst*-индекса и для CIR, и для ICME. Связь  $ASY_{\text{aver}}$  со скоростью развития главной фазы магнитной бури слабая.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00269 и, частично проектом АААА-А17-11702145 0059-3.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акасофу С.Е., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир, 1974. 384 с.

Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Церковнюк О.М. Анализ связи индексов, характеризующих симметричный *SYM* и асимметричный *ASY* кольцевого тока, с индексами активности авроральных электроструй *AE* (*AU*, *AL*) // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 4. С. 520–525.

Бархатова О.М. Нелинейная связь авроральных (*AU*, *AL*) и среднеширотных (*SYM-H*, *ASY-H*) индексов геомагнитной активности на главной фазе геомагнитной бури // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 23. С. 100–108.

Бахмина К.Ю., Калегасев В.В. Моделирование эффекта частичного кольцевого тока в возмущенной магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 6. С. 770–779.

Дремухина Л.А., Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И. Статистическое исследование воздействия солнечного ветра разных типов на генерацию магнитных бурь в период 1995–2016 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58, № 6. С. 760–768. DOI: [10.1134/S0016794018060032](https://doi.org/10.1134/S0016794018060032).

Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. 2009. Т. 47, № 2. С. 99–113.

Калегасев В.В., Бахмина К.Ю., Алексеев И.И. и др. Асимметрия кольцевого тока во время магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 6. С. 780–792.

Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983. 192 с.

Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51, № 1. С. 51–67.

Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.

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

Boroyev R.N., Vasiliev M.S. Substorm activity during the main phase of magnetic storms induced by the CIR and ICME events // Adv. Space Res. 2018. V. 61, iss. 1. P. 348–354. DOI: [10.1016/j.asr.2017.10.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.031).

Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst* // J. Geophys. Res. 1975. V. 80, iss. 31. P. 4204–4214. DOI: [10.1029/JA080i031p04204](https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204).

Davis T.N., Sugiura M. Auroral electrojet activity index *AE* and its universal time variations // J. Geophys. Res. 1966. V. 71, iss. 3. P. 785–801. DOI: [10.1029/JZ071i003p00785](https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785).

Despirak I.V., Lubchich A.A., Yahnin A.G., et al. Development of substorm bulges during different solar wind structures // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 1951–1960. DOI: [10.5194/angeo-27-1951-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-1951-2009).

Feldstein Y.I., Levitin A.E., Kozyra J.U., et al. Self-consistent modeling of the large-scale distortions in the geomagnetic field during the 24–27 September 1998 major magnetic storm // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. DOI: [10.1029/2004JA010584](https://doi.org/10.1029/2004JA010584).

Fok M.-C., Wolf R.A., Spiro R.W., Moore T.E. Comprehensive computational model of the Earth's ring current // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, iss. A5. P. 8417–8424. DOI: [10.1029/2000JA000235](https://doi.org/10.1029/2000JA000235).

Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 5771–5792. DOI: [10.1029/93JA02867](https://doi.org/10.1029/93JA02867).

Grafe A., Bessalov P.A., Trakhtengerts V.Y., Demekhov A.G. Afternoon mid-latitude current system and low-latitude geomagnetic field asymmetry during geomagnetic storms // Ann. Geophys. 1997. V. 15, iss. 12. P. 1537–1547. DOI: [10.1007/s00585-997-1537-5](https://doi.org/10.1007/s00585-997-1537-5).

Iyemori T., Rao D.R.K. Decay of the *Dst* field of geomagnetic disturbance after substorm onset and its implication to storm-substorm relation // Ann. Geophys. 1996. V. 14, iss. 6. P. 618–622. DOI: [10.1007/s00585-996-0608-3](https://doi.org/10.1007/s00585-996-0608-3).

Kane R.P. How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, A022B. DOI: [10.1029/2004JA010799](https://doi.org/10.1029/2004JA010799).

Kozyra J.U., Liemohn M.W. Ring current energy input and decay // Space Sci. Rev. 2003. V. 109. P. 105–131.

Liemohn M.W., Kozyra J.U., Thomsen M.F., et al. Dominant role of the asymmetric ring current in producing the stormtime *Dst* // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 10883–10904. DOI: [10.1029/2000JA000326](https://doi.org/10.1029/2000JA000326).

Love J.J., Gannon J.L. Revised *Dst* and the epicycles of magnetic disturbance: 1958–2007 // Ann. Geophys. 2009. V. 27, iss. 8. P. 3101–3131. DOI: [10.5194/angeo-27-3101-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-3101-2009).

Plotnikov I.Ya., Barkova E.S. Advances in space research nonlinear dependence of *Dst* and *AE* indices on the electric field of magnetic clouds // Adv. Space Res. 2007. V. 40. P. 1858–1862. DOI: [10.1016/j.asr.2007.09.025](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.09.025).

Sharma A.S., Baker D.N., Grande M., et al. Storm-substorm relationship: Current understanding and outlook // Disturbances in Geospace: The Storm-Substorm Relationship. 2003. 268 p. (Geophys. Monogr. Ser. V. 142). DOI: [10.1029/142GM01](https://doi.org/10.1029/142GM01).

Sugiura M. Hourly Values of the Equatorial *Dst* for IGY // Annals of the International Geophysical Year. 1964. V. 35. P. 945–948.

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

Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, A00L07. DOI: [10.1029/2011JA017139](https://doi.org/10.1029/2011JA017139).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

URL: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html> (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

URL: <ftp://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog> (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

URL: <http://www.omniweb.com> (дата обращения 30 сентября 2019 г.).

## REFERENCES

Akasofu S.-I., Chapman S. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. Moscow, Mir Publ., 1974, 384 p. (In Russian). (English edition: Akasofu S.-I., Chapman S. Solar-Terrestrial Physics. Oxford, Clarendon Press, 1972, 901 p.).

Barkhatov N.A., Levitin A.E., Tserkovnyuk O.M. Relation of the indices characterizing the symmetric (*SYM*) and asymmetric (*ASY*) ring currents to the *AE* (*AU*, *AL*) indices of auroral electrojet activity. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2008, vol. 48, no. 4, pp. 520–525. (In Russian).

Barkhatova O.M. Nonlinear connection between the auroral (*AU*, *AL*) and mid-latitude (*SYM-H*, *ASY-H*) geomagnetic

activity indices at the main phase of geomagnetic storm. *Solnechno-zemnaia fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2013, vol. 23, pp. 100–108. (In Russian).

Bakhmina K.Yu., Kalegaev V.V. Modeling the partial ring current effect in a disturbed magnetosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2008, vol. 48, no. 6, pp. 770–779. (In Russian).

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

Boroyev R.N., Vasiliev M.S. Substorm activity during the main phase of magnetic storms induced by the CIR and ICME events. *Adv. Space Res.* 2018, vol. 61, iss. 1, pp. 348–354. DOI: [10.1016/j.asr.2017.10.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.031).

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, pp. 4204–4214. DOI: [10.1029/JA080i031p04204](https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204).

Davis T.N., Sugiura M. Auroral electrojet activity index *AE* and its universal time variations. *J. Geophys. Res.* 1966, vol. 71, iss. 3, pp. 785–801. DOI: [10.1029/JZ071i003p00785](https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785).

Despirak I.V., Lubchich A.A., Yahnin A.G., Kozelov B.V., Biernat H.K. Development of substorm bulges during different solar wind structures. *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27, pp. 1951–1960. DOI: [10.5194/angeo-27-1951-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-1951-2009).

Dremukhina L.A., Lodkina I.G., Yermolaev Y.I. Statistical study of the effect of different solar wind types on magnetic storm generation during 1995–2016. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2018, vol. 58, no. 6, pp. 760–768. (In Russian). DOI: [10.1134/S0016794018060032](https://doi.org/10.1134/S0016794018060032).

Feldstein Y.I., Levitin A.E., Kozyra J.U., Tsurutani B.T., Prigancova A., Alperovich L., et al. Self-consistent modeling of the large-scale distortions in the geomagnetic field during the 24–27 September 1998 major magnetic storm. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110. DOI: [10.1029/2004JA010584](https://doi.org/10.1029/2004JA010584).

Fok M.-C., Wolf R.A., Spiro R.W., Moore T.E. Comprehensive computational model of the Earth's ring current. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, iss. A5, pp. 8417–8424. DOI: [10.1029/2000JA000235](https://doi.org/10.1029/2000JA000235).

Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, pp. 5771–5792. DOI: [10.1029/93JA02867](https://doi.org/10.1029/93JA02867).

Grafe A., Bepalov P.A., Trakhtengerts V.Y., Demekhov A.G. Afternoon mid-latitude current system and low-latitude geomagnetic field asymmetry during geomagnetic storms. *Ann. Geophys.* 1997, vol. 15, iss. 12, pp. 1537–1547. DOI: [10.1007/s00585-997-1537-5](https://doi.org/10.1007/s00585-997-1537-5).

Iyemori T., Rao D.R.K. Decay of the *Dst* field of geomagnetic disturbance after substorm onset and its implication to storm-substorm relation. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 14, iss. 6, pp. 618–622. DOI: [10.1007/s00585-996-0608-3](https://doi.org/10.1007/s00585-996-0608-3).

Kane R.P. How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A022B. DOI: [10.1029/2004JA010799](https://doi.org/10.1029/2004JA010799).

Kalegaev V.V., Bakhmina K.Yu., Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Feldstein Ya I., Ganushkina N.V. Ring current asymmetry during a magnetic storm. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008, vol. 48, no. 6, pp. 747–758. DOI: [10.1134/S0016793208060078](https://doi.org/10.1134/S0016793208060078).

Kozyra J.U., Liemohn M.W. Ring current energy input and decay. *Space Sci. Rev.* 2003, vol. 109, pp. 105–131.

Liemohn M.W., Kozyra J.U., Thomsen M.F., Roeder J.L., Lu G., Borovsky J.E., Cayton T.E. Dominant role of the asymmetric ring current in producing the stormtime *Dst*. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 10883–10904. DOI: [10.1029/2000JA000326](https://doi.org/10.1029/2000JA000326).

Love J.J., Gannon J.L. Revised *Dst* and the epicycles of magnetic disturbance: 1958–2007. *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27, iss. 8, pp. 3101–3131. DOI: [10.5194/angeo-27-3101-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-3101-2009).

Lyatsky V.B., Maltsev Yu.P. *Magnitosferno-ionsosfernoye vzaimodeistvie* [Magnetosphere-Ionosphere Coupling]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 192 p. (In Russian).

Nikolaeva N.S., Yermolaev Y.I., Lodkina I.G. Dependence of geomagnetic activity during magnetic storms on the solar wind parameters for different types of streams. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2011, vol. 51, no. 1, pp. 51–67. (In Russian).

Nishida A. *Geomagnitnyi diagnost magnitosfery* [Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere]. Moscow, Mir Publ., 1980, 299 p. (In Russian). (English edition: Nishida A. Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere. New York, Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag, 1978, 256 p.).

Plotnikov I.Ya., Barkova E.S. Advances in space research nonlinear dependence of *Dst* and *AE* indices on the electric field of magnetic clouds. *Adv. Space Res.* 2007, vol. 40, pp. 1858–1862. DOI: [10.1016/j.asr.2007.09.025](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.09.025).

Sharma A.S., Baker D.N., Grande M., Kamide Y., Lakhina G.S., McPherron R.M., Reeves G.D., Rostoker G., Vondrak R., Zelenyi L. Storm-substorm relationship: Current understanding and outlook. *Disturbances in Geospace: The Storm-Substorm Relationship*. 2003, 268 p. (Geophys. Monogr. Ser., vol. 142). DOI: [10.1029/142GM01](https://doi.org/10.1029/142GM01).

Sugiura M. Hourly values of the equatorial *Dst* for IGY. *Annals of the International Geophysical Year*. 1964, vol. 35, pp. 945–948.

Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. Catalog of large-scale solar wind phenomena during 1976–2000. *Kosmicheskiye issledovaniya* [Cosmic Research]. 2009, vol. 47, no. 2, pp. 99–113. (In Russian).

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

Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A00L07. DOI: [10.1029/2011JA017139](https://doi.org/10.1029/2011JA017139).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (accessed 30 September 2019).

URL: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html> (accessed 30 September 2019).

URL: <ftp://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog> (accessed 30 September 2019).

URL: <http://www.omniweb.com> (accessed 30 September 2019).

#### Как цитировать эту статью

Бороев Р.Н., Васильев М.С. Связь *ASY-H* с параметрами межпланетной среды и авроральной активностью на главных фазах магнитных бурь во время CIR и ICME событий. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 1. С. 43–50. DOI: [10.12737/szf-61202004](https://doi.org/10.12737/szf-61202004).