

ИССЛЕДОВАНИЕ АВРОРАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ *SME*-ИНДЕКСА НА ГЛАВНЫХ ФАЗАХ МАГНИТНЫХ БУРЬ ВО ВРЕМЯ CIR- И ICME-СОБЫТИЙ

STUDYING AURORAL ACTIVITY USING THE *SME* INDEX AT THE MAGNETIC STORM MAIN PHASE DURING CIR AND ICME EVENTS

Р.Н. Бороев

*Институт космофизических 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*

М.С. Васильев

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

R.N. Boroyev

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

M.S. Vasiliev

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

Аннотация. В работе исследована связь *SME*-индекса с характеристиками магнитной бури и параметрами межпланетной среды на главных фазах магнитных бурь, вызванных разными типами солнечного ветра (СВ). За период 1990–2017 гг. было отобрано 107 магнитных бурь, индуцированных событиями (64) CIR и (43) ICME. Показано, что, по сравнению с *AE* и K_p , наблюдается более сильная корреляция между средним значением *SME*-индекса (SME_{aver}) и параметрами межпланетной среды на главных фазах магнитных бурь. Получены близкие значения коэффициентов корреляций между SME_{aver} и электрическим полем СВ (южной B_z ММП) для событий CIR и ICME. Установлено, что значения SME_{aver} -индекса увеличиваются с ростом скорости развития магнитной бури и $|Dst_{min}|$. Различий в уравнениях линейных регрессий между SME_{aver} и $|Dst_{min}|$ для событий CIR и ICME не обнаружено.

Ключевые слова: магнитная буря, *SME*-индекс, *Dst*-индекс, солнечный ветер, электрическое поле.

Abstract. In this paper, we examine the relationship of the *SME* index with magnetic storm characteristics and interplanetary medium parameters during the main phase of magnetic storms caused by CIR and ICME events. Over the period 1990–2017, 107 magnetic storms driven by (64) CIR and (43) ICME events have been selected. In contrast to *AE* and K_p , a stronger correlation is shown to exist between the average *SME* index (SME_{aver}) and interplanetary medium parameters during the magnetic storm main phase. Close correlation coefficients between SME_{aver} and the SW electric field (southward IMF B_z) have been obtained for CIR and ICME events. SME_{aver} has been found to increase with the rate of magnetic storm development and $|Dst_{min}|$. For CIR and ICME events, no difference has been revealed between SME_{aver} and $|Dst_{min}|$ in linear regression equations.

Keywords: magnetic storm, *SME* index, *Dst* index, solar wind, electric field.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что усиление магнитосферно-ионосферных токов в периоды магнитных бурь (МБ) приводит к росту индексов геомагнитной активности *Dst*, *AE*, K_p . Геомагнитные индексы, вычисляемые по данным наземных наблюдений, позволяют описать динамику и интенсивность магнитных возмущений в периоды МБ. Низкоширотный *Dst*-индекс [Sugiura, 1964; Burton et al., 1975] используется для оценки интенсивности МБ. Высокоширотный *AE*-индекс характеризует интенсивность аврорального тока и является индикатором суббулевой активности [Davis, Sugiura, 1966]. Для оценки авроральной активности также используется планетарный (среднеширотный) K_p -индекс [Bartels, 1949; Хорошева,

2007]. Корреляционный анализ индексов геомагнитной активности и параметров межпланетной среды в периоды МБ показал, что южно-направленная компонента межпланетного магнитного поля B_z ММП, эффективность которой связывают с воздействием электрического поля СВ $E_{sw} = V \times B_z$, является основной причиной генерации геомагнитных возмущений [Burton et al., 1975; Gonzalez et al., 1994; Kane, 2005, 2010]. Связь между *AE*-, K_p - и *Dst*-индексами в периоды МБ широко представлена в работах [Gonzalez et al., 1994; Grafe et al., 1997; Grafe, Feldstein, 2000; Kane, 2010] (см. также ссылки в них).

Однако результаты последних статистических и морфологических исследований показывают, что развитие МБ и суббурь различается в зависимости от типа солнечного ветра (СВ) [Gonzalez et al., 1999;

Borovsky, Denton, 2006; Yermolaev et al., 2010; Дремухина и др., 2018a]. Выделяют следующие типы СВ: межпланетные проявления корональных выбросов массы (interplanetary coronal mass ejection, ICME), включающие магнитные облака (magnetic cloud, MC) и поршни (ejecta), области взаимодействия высокоскоростных течений СВ с медленными течениями (CIR), а также области сжатия перед ICME (sheath). Каждый тип СВ имеет определенный набор параметров СВ и ММП.

Анализ связи между параметрами СВ для разных типов течений и индексами геомагнитной активности (AE , K_p и Dst) показал [Plotnikov, Barkova, 2007; Yermolaev et al., 2010; Guo et al., 2011; Николаева и др., 2011; Yermolaev et al., 2012; Cramer et al., 2013; Дремухина и др., 2018a], что на главных фазах МБ значения геомагнитных индексов увеличиваются с ростом электрического поля СВ E_{sw} , но для событий MC наблюдается нелинейная зависимость индексов от E_{sw} . В работе [Boroyev et al., 2020] был проведен сравнительный анализ индексов AE и K_p в периоды CIR и ICME. Было показано, что для событий CIR, в отличие от ICME (MC + ejecta), значение AE увеличивается с ростом электрического поля СВ E_{sw} . Значение K_p -индекса коррелирует с E_{sw} только для ICME. Наблюдаемые вариации авроральных индексов авторы работ [Borovsky, Denton, 2006; Plotnikov, Barkova, 2007; Yermolaev et al., 2010] объясняют типом течения СВ. Различия в типах СВ проявляются в поведении кольцевого тока, авроральных высыпаний, плазменного слоя Земли, в магнитосферной конвекции и в насыщении потенциала полярной шапки [Borovsky, Denton, 2006]. В работах [Boroyev, Vasiliev, 2018; Boroyev et al., 2020] авторы считают, что на вариации AE - и K_p -индексов влияет положение аврорального тока относительно станций, по которым вычисляются индексы. Значительное уменьшение B_z ММП приводит к расширению аврорального овала [Акасофу, Чепмен, 1974] и смещению ионосферных токов на более низкие широты. В работе [Boroyev et al., 2020] авторы предполагают, что именно тип СВ определяет величину смещения токов относительно станций, по которым вычисляются AE - и K_p -индексы. Например, в периоды ICME, в отличие от CIR, наблюдаются большие значения южной B_z ММП. В результате наблюдаются более высокие коэффициенты корреляции между $E_{sw\text{aver}}$ и $K_{p\text{aver}}$, чем $E_{sw\text{aver}}$ и AE_{aver} , на главных фазах МБ, индуцированных ICME.

Для того чтобы учесть пространственные особенности влияния экваториального дрейфа аврорального электроджета на геомагнитные индексы AE и K_p в периоды МБ, в данной работе рассмотрен SuperMAG SME -индекс. SuperMAG индексы SME , SMU и SML являются индексами геомагнитной активности [Newell, Gjerloev, 2012]. Формулы расчетов, например, AE и SME -индексов авроральной активности совпадают. AE -индекс вычисляется по H -компоненте на двенадцати высокоширотных магнитовариационных станциях, расположенных в узкой полосе геомагнитных широт 65° – 70° . Для расчета SME -индекса используется более 100 геомагнитных станций [Newell, Gjerloev, 2011], охватывающих диапазон геомагнитных широт от 40° до 80° .

SME -индекс, в отличие от AE , позволяет более точно оценить интенсивность аврорального электроджета. Кроме того, во время магнитных возмущений смещение по широте аврорального электроджета не влияет на величину SME -индекса. В отличие от SME , значения AE -индекса занижаются из-за смещения аврорального электроджета на низкие широты для МБ с $Dst < -60$ нТл [Хорошева, 2007]. Используя базу данных SuperMAG, Newell et al. [2013] исследовали годовые, сезонные и суточные вариации частоты появления суббурильных возмущений в 1984–2005 гг. В работе [Du et al., 2018] приведены полугодовые и годовые вариации индексов SML/SMU с учетом параметров СВ.

Цель данной работы — продолжение цикла исследований авроральной активности в периоды МБ индуцированных различными типами СВ, а именно исследование корреляционных связей SME -индекса с характеристиками МБ и параметрами межпланетной среды на главных фазах МБ индуцированных различными типами СВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для оценки геомагнитной активности в данной работе использовались SME - и Dst -индексы. Значения индексов были взяты с сайтов [<https://supermag.jhuapl.edu>, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>]. За период 1990–2017 гг. было отобрано 107 МБ с $Dst_{\min} \leq -50$ нТл, индуцированных CIR (64) и ICME (43). Другие типы СВ в данной работе не рассматривались. Магнитная буря считалась связанной с СВ данного типа, если главная фаза и минимальное значение Dst -индекса наблюдались в период воздействия СВ этого типа. Методика классификации разных 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. Из ICME-событий, перед которыми регистрировалась область сжатия sheath, были отобраны только те МБ, для которых главная фаза и минимум Dst -индекса наблюдались в течение ICME (тело ICME). Известно (например, [Yermolaev et al., 2021]), что эффективность генерации МБ областью сжатия sheath на 50 % выше, чем ICME. Поэтому в работе были рассмотрены события после магнитоспокойного периода, что позволило более точно определить, происходило ли взаимодействие с магнитосферой ICME или области сжатия sheath на главных фазах МБ.

Для каждого события, как и в работе [Boroyev, Vasiliev, 2018], были вычислены средние значения SME -индекса на главной фазе МБ и скорость развития МБ, которая считалась, как производная по времени Dst -индекса $|\Delta Dst/\Delta T$ [Ермолаев и др., 2015]. Длительность главной фазы ΔT определялась как временной интервал от момента резкого уменьшения Dst -индекса Dst_0 до момента регистрации Dst_{\min} . Значение $|\Delta Dst|$ вычислялось по формуле

$$|\Delta Dst| = |Dst_{\min} - Dst_0|.$$

Для учета параметров СВ и ММП по среднечасовым данным [<http://www.omniweb.com>] определялись средние значения азимутального электрического поля СВ

Коэффициенты корреляции Пирсона r между SME_{aver} , характеристиками МБ и параметрами межпланетной среды, вычисленные с уровнем значимости $p=0.01$, на главных фазах МБ во время CIR- и ICME-событий, а также уравнения регрессии. Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии для индексов AE и K_p взяты из работы [Bogoyev et al., 2020]

	CIR	ICME	Уравнения регрессии для геомагнитного индекса SME_{aver}	
	r	r	CIR	ICME
SME_{aver} и $ \Delta Dst /\Delta T$	0.50	0.54	$y = 20x + 526$	$y = 29x + 551$
AE_{aver} и $ \Delta Dst /\Delta T$	0.51	0.29	$y = 14x + 485$	$y = 9.7x + 572$
K_p и $ \Delta Dst /\Delta T$	0.54	0.62	$y = 0.8x + 40$	$y = 1.2x + 34$
SME_{aver} и $ Dst_{min} $	0.67	0.6	$y = 6.3x + 226$	$y = 6.8x + 223$
AE_{aver} и $ Dst_{min} $	0.53	0.41	$y = 4x + 320$	$y = 2x + 464$
K_p и $ Dst_{min} $	0.59	0.67	$y = 0.2x + 30$	$y = 0.2x + 26$
SME_{aver} и $E_{sw\,aver}$	0.77	0.81	$y = 146x + 328$	$y = 131x + 362$
AE_{aver} и $E_{sw\,aver}$	0.67	0.66	$y = 97x + 367$	$y = 95x + 353$
K_p и $E_{sw\,aver}$	0.66	0.77	$y = 5x + 34$	$y = 6x + 24$
SME_{aver} и $ B_z\,aver $	0.62	0.73	$y = 45x + 447$	$y = 50x + 387$
AE_{aver} и $ B_z\,aver $	0.57	0.59	$y = 32x + 433$	$y = 37x + 370$
K_p и $ B_z\,aver $	0.44	0.53	$y = 1.3x + 40$	$y = 1.9x + 30$

$E_{sw\,aver} = \Sigma E_{sw}/\Delta T$ и B_z ММП $B_z\,aver = \Sigma B_z/\Delta T$ на главной фазе МБ, где ΣE_{sw} и ΣB_z — суммарные значения электрического поля утро–вечер и южной B_z ММП за временной интервал, соответствующий главной фазе МБ. Средние значения параметров межпланетной среды и индексов геомагнитной активности в целом позволяют оценить развитие главной фазы МБ.

Для выявления связи между SME -индексом и параметрами МБ и межпланетной среды была использована линейная аппроксимация как наиболее простой способ установления зависимости между величинами. В данной работе линейные аппроксимации и коэффициенты корреляции Пирсона вычислены с вероятностью $P=0.99$ и уровнем значимости $p=0.01$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1, *a, в* показана корреляционная связь между средней величиной SME -индекса SME_{aver} и скоростью развития МБ $|\Delta Dst|/\Delta T$ во время событий CIR и ICME. Связь между SME_{aver} и минимальным по модулю значением Dst -индекса $|Dst_{min}|$ представлена на рис. 1, *б, г*. В таблице для двух типов СВ приведены значения коэффициентов корреляции между SME_{aver} и параметрами МБ $|\Delta Dst|/\Delta T$, $|Dst_{min}|$ и межпланетной среды, а также уравнения линейных регрессий. На рис. 1, *a, в* видно, что на главных фазах МБ во время CIR- и ICME-событий SME_{aver} -индекс увеличивается с ростом $|\Delta Dst|/\Delta T$, при этом для ICME-событий наблюдается более резкий рост SME_{aver} -индекса (см. таблицу). Получены близкие значения коэффициентов корреляции между SME_{aver} и $|\Delta Dst|/\Delta T$ для событий CIR ($r=0.5$) и ICME ($r=0.54$). Для CIR ($r=0.67$) и ICME ($r=0.6$) событий наблюдаются также высокие коэффициенты корреляции между SME_{aver} и $|Dst_{min}|$ (рис. 1, *б, г*). Уравнения регрессии для SME_{aver} и $|Dst_{min}|$ для событий CIR и ICME схожи (см. таблицу): угловые коэффициенты, определяющие наклон прямых относительно оси абсцисс, слабо отличаются друг от друга.

Среди параметров ММП и СВ электрическое поле является основной причиной развития МБ [Burton et al., 1975; Gonzalez et al., 1994; Kane, 2005]. Электрическое поле СВ связано со скоростью движения плазмы СВ V_{sw} и с одним из значимых геоэффективных параметров межпланетной среды — южной B_z -компонентой ММП. С учетом типа СВ проведен корреляционный анализ SME_{aver} , электрического поля СВ и южной B_z -компоненты ММП.

На рис. 2 показана корреляция между SME_{aver} и средней величиной электрического поля СВ $E_{sw\,aver}$ и модулем южной B_z -компоненты ММП $|B_z\,aver|$ для МБ, индуцированных CIR и ICME. На рис. 2 видно, что для обоих типов СВ индекс SME_{aver} линейно растет с ростом $E_{sw\,aver}$ и $|B_z\,aver|$. Наблюдаются высокие и близкие значения коэффициентов корреляции между SME_{aver} и $E_{sw\,aver}$ для CIR ($r=0.77$) и ICME ($r=0.81$) событий, тогда как коэффициенты корреляции между SME_{aver} и $|B_z\,aver|$ для CIR ($r=0.62$) и ICME ($r=0.73$) ниже и заметно различаются (рис. 2, *б, г*).

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В данной работе рассмотрен геомагнитный индекс авроральной активности SME , который, в отличие от AE -, K_p -индексов, учитывает экваториальное смещение ионосферных токов и позволяет более точно оценить интенсивность ионосферных токов во время МБ. В качестве параметров МБ рассматривались скорость развития МБ и Dst_{min} . На рис. 1, *a, в* видно, что SME -индекс коррелирует со скоростью развития МБ и для CIR ($r=0.5$) и ICME ($r=0.54$) событий. Однако наблюдается различие угловых коэффициентов в уравнениях регрессии между SME_{aver} и $|\Delta Dst|/\Delta T$ (см. таблицу). В отличие от SME -индекса, коэффициенты корреляции между $|\Delta Dst|/\Delta T$ и AE - и K_p -индексами сильно различаются для CIR- и ICME-событий. Для AE -индекса коэффициент корреляции для ICME ($r=0.29$) значительно меньше, чем для CIR ($r=0.51$), тогда как для K_p -индекса, напротив, коэффициент корреляции для ICME несколько больше, чем для CIR (см. таблицу).

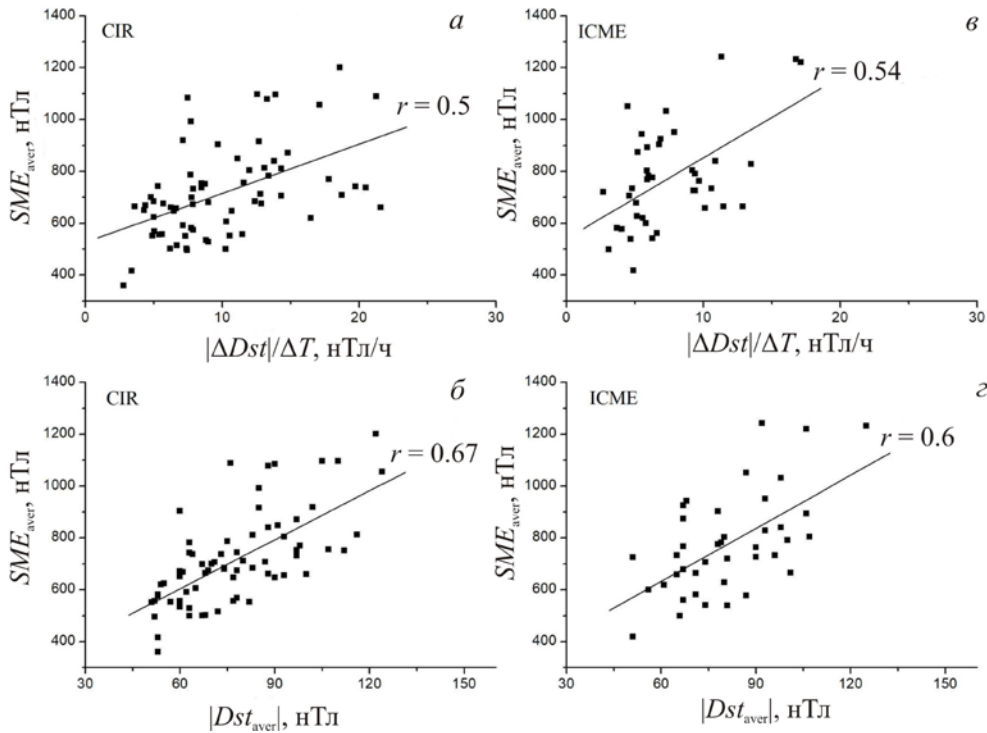


Рис. 1. Зависимость SME_{aver} от скорости развития МБ и модуля Dst_{min} на главных фазах МБ, индуцированных CIR- и ICME-событиями: квадраты — отдельные МБ; прямые линии — линейная аппроксимация; r — коэффициент корреляции

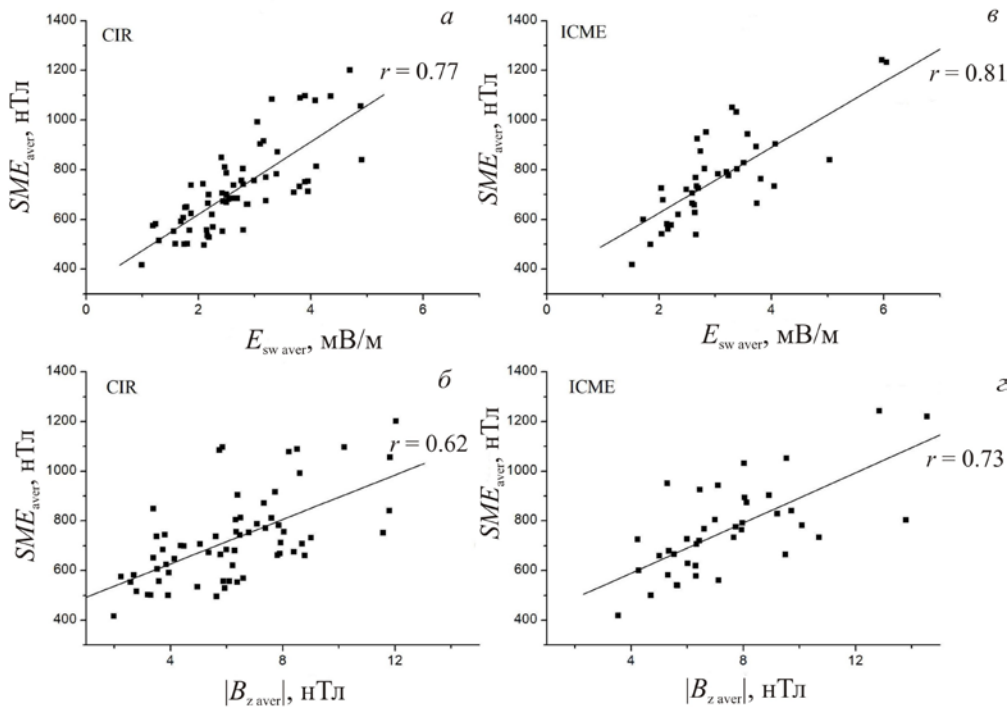


Рис. 2. Зависимость SME_{aver} от средних значений электрического поля СВ и модуля южной B_z ММП на главных фазах МБ, индуцированных CIR- и ICME-событиями

Скорость МБ, а точнее ее вариация $\Delta Dst/\Delta T$, зависит от параметров межпланетной среды. Предложено (например, [Burton et al., 1975; Newell et al., 2007; Borovsky, Birn, 2014; Дремухина и др., 20186]) множество функций связи для различных комбинаций параметров СВ/ММП, в том числе определяющих вариации Dst -индекса. Анализ показал [Burton et al.,

1975; Maltsev, Rezhnev, 2003], что видна сильная зависимость $\Delta Dst/\Delta T$ от значения южной B_z -компоненты ММП. Именно в величине южной компоненты B_z ММП проявляется тип СВ. Например, в ICME (МС и ежета) магнитное поле имеет структуру в виде жгута, и внутри него магнитное давление преобладает над тепловым $\beta < 1$. Магнитное облако, в отличие от ежета,

обладает более высоким (>10 нТл) и более регулярным магнитным полем. В CIR плазма имеет повышенную плотность и температуру, а тепловое давление преобладает над магнитным $\beta > 1$. На рис. 2, б, г видно, что ряд МБ, обусловленных CIR, имеют малые значения южной B_z -компоненты ММП. Возможно, поэтому для CIR угловой коэффициент уравнения регрессии между SME_{aver} и $|\Delta Dst|/\Delta T$ меньше, чем для ICME.

В работе [Хорошева, 2007] приводятся результаты исследований зависимости сдвига магнитосферных границ от мощности МБ. Согласно этому исследованию, Dst -индекс дает возможность оценить положение границ сияний и электроструй во время МБ. Значение Dst_{min} определяет минимальную широту появления полярных сияний и электроструй во время МБ. Широта авроральных электроструй во время CIR- и ICME-событий не влияет на величину SME -индекса, в отличие от величин AE - и K_p -индексов. Поэтому, как видно на рис. 1, б, г, наблюдаются высокие и близкие коэффициенты корреляции между индексами SME и Dst_{min} во время CIR ($r=0.67$) и ICME ($r=0.6$). Отсутствуют также различия и в уравнениях регрессии для CIR- и ICME-событий. Тип СВ не влияет на связь между SME_{aver} и $|Dst_{min}|$.

В данной работе, как и в работе [Boroyev et al, 2020], для анализа влияния СВ на авроральные возмущения в периоды МБ были рассмотрены электрическое поле СВ и B_z ММП. Получены более высокие и близкие значения коэффициентов корреляции между SME_{aver} и E_{swaver} (см. таблицу) по сравнению с AE и K_p . Заметных различий в значениях угловых коэффициентов в уравнениях регрессий между SME_{aver} и E_{swaver} не наблюдается, связь с типом СВ (CIR/ICME) также не обнаружена. Зависимость SME от E_{sw} более выражена, чем от AE . Для обоих типов СВ наблюдается более тесная связь между SME_{aver} и $|B_{zaver}|$, однако коэффициент корреляции для ICME-событий ($r=0.73$) больше, чем для CIR-событий ($r=0.62$). Несмотря на различие коэффициентов корреляций между SME_{aver} и $|B_{zaver}|$, угловые коэффициенты в уравнениях регрессии между SME_{aver} и $|B_{zaver}|$ для обоих типов СВ имеют близкие значения (см. таблицу). Сравнительный анализ коэффициентов корреляции между геомагнитными индексами SME_{aver} , AE , K_p и параметрами МБ и межпланетной среды, а также соответствующих уравнений регрессии позволяет сделать вывод, что K_p -индекс, по сравнению с AE , более точно описывает авроральную активность на главных фазах МБ во время CIR и ICME.

Каждый тип СВ характеризуется определенным набором параметров СВ (см., например, [Yermolaev et al., 2010]). Одним из важных параметров СВ является южная B_z -компонента ММП, геоэффективность которой связана с электрическим полем СВ. Именно при южной B_z -компоненте ММП регистрируется большинство магнитосферно-ионосферных возмущений, а различие типов СВ проявляется в ее величине. Например, на рис. 2 видно, что при CIR-событиях большинство МБ имеют низкие значения южной B_z -компоненты ММП. От типа СВ зависят вариации геомагнитных индексов на главной фазе МБ. Показано [Plotnikov, Barkova, 2007; Yermolaev et al., 2010; Николаева и др., 2011; Дремухина и др., 2018a], что на главных фазах МБ зависимости индексов AE , ap , K_p от E_{sw} СВ имеют нелинейный характер для MC (возможно, и для всех ICME) и линейный для CIR-событий. Нелинейный характер наблюдается при больших значениях электрического поля СВ ($E_{sw} > 11$ мВ/м). По мнению авторов работ [Plotnikov, Barkova, 2007; Yermolaev et al., 2017; Николаева и др., 2017; Дремухина и др., 2018a], различие в вариациях индексов для СВ разных типов может быть связано с тем, что кроме южной B_z -компоненты ММП необходимо учитывать также и другие параметры СВ (например, давление СВ, турбулентность ММП), значения которых различны для разных типов СВ.

В отличие от динамики AE - и K_p -индексов, динамика SME -индекса на главных фазах МБ во время CIR и ICME не зависит от типа СВ. Получены высокие коэффициенты корреляции между SME -индексом и электрическим полем СВ (южной B_z -компонентой ММП), а уравнения регрессии между SME и E_{sw} (B_z ММП) для CIR- и ICME-событий, с учетом погрешности вычислений коэффициентов в уравнениях регрессии (в пределах ошибки $\pm 10\%$), слабо отличаются друг от друга. Однако следует отметить, что в данной работе были отобраны МБ с $|Dst_{min}| < 130$ нТл. В работах [Plotnikov, Barkova, 2007; Yermolaev et al., 2010, 2017; Николаева и др., 2017; Дремухина и др., 2018a] были рассмотрены и более сильные МБ $|Dst_{min}| > 130$ нТл. Возможно, что в МБ с $|Dst_{min}| < 130$ нТл во время CIR и ICME динамика геомагнитных индексов в значительной степени определяется южной B_z -компонентой ММП. Другие параметры СВ слабо влияют на геомагнитные индексы.

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы:

1. Показано, что на главных фазах МБ во время CIR- и ICME-событий наблюдается более сильная корреляция между средним значением SME -индекса SME_{aver} и параметрами межпланетной среды, по сравнению с AE - и K_p -индексами. Получены близкие значения коэффициентов корреляций между SME_{aver} и электрическим полем СВ (южной компонентой B_z ММП) для CIR- и ICME-событий.
2. Установлено, что значения SME_{aver} коррелируют со скоростью развития МБ и $|Dst_{min}|$ для CIR- и ICME-событий, при этом связи с типом СВ (CIR/ICME) не наблюдается.
3. Обнаружено, что K_p -индекс, по сравнению с AE , более точно описывает динамику авроральных токов на главных фазах МБ во время CIR и ICME.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № АААА-А21-121012 000007-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.Е., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Часть 1. М.: Мир, 1974. 384 с.
- Дремухина Л.А., Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И. Связь параметров солнечного ветра разных типов с индексами геомагнитной активности. *Космические исследования*. 2018а. Т. 56, № 6. С. 410–419. DOI: 10.31857/S002342060002487-3.

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 аэронавигация*. 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. *Космические исследования*. 2009. Т. 47, № 2. С. 99–113.

Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Зависит ли длительность фазы восстановления магнитной бури от скорости развития бури на ее главной фазе? *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2015. Т. 55, № 4. С. 435–439. DOI: [10.7868/S0016794015040033](https://doi.org/10.7868/S0016794015040033).

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 аэронавигация*. 2011. Т. 51, № 1. С. 51–67.

Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Зависит ли генерация магнитной бури от типа солнечного ветра? *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2017. Т. 57, № 5. С. 555–561. DOI: [10.7868/S0016794017050169](https://doi.org/10.7868/S0016794017050169).

Хорошева О.В. Связь геомагнитных возмущений с динамикой магнитосферы и параметрами межпланетной среды. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2007. Т. 47, № 5. С. 579–583.

Bartels J. The standardized index K_s and the planetary index K_p . *IATME Bull.* 1949. No. 12b. P. 97–120.

Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME driven storms and CIR driven storms. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A07S08. DOI: [10.1029/2005JA011447](https://doi.org/10.1029/2005JA011447).

Borovsky J.E., Birn J. The solar wind electric field does not control the dayside reconnection rate. *J. Geophys. Res.* 2014. Vol. 119. P. 751–760. DOI: [10.1002/2013JA019193](https://doi.org/10.1002/2013JA019193).

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. P. 348–354. DOI: [10.1016/j.asr.2017.10.031](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.031).

Boroyev R.N., Vasiliev M.S., Baishev D.G. The relationship between geomagnetic indices and the interplanetary medium parameters in magnetic storm main phases during CIR and ICME events. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2020. Vol. 204, 105290. DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105290](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105290).

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

Cramer W.D., Turner N.E., Fok M.C., Buzulukova N.Y. Effects of different geomagnetic storm drivers on the ring current: CRCM results. *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 1062–1073. DOI: [10.1002/jgra.50138](https://doi.org/10.1002/jgra.50138).

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

Du A.M., Wang K.T., Luo H., et al. Coupling of semiannual and annual variations in the SuperMAG SML and SMU indices. *Planet. Space Sci.* 2018. Vol. 158. P. 87–95. DOI: [10.1016/j.pss.2018.05.001](https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.05.001).

Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99, iss. A4. P. 5771–5792. DOI: [10.1029/93JA02867](https://doi.org/10.1029/93JA02867).

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Gonzalez A.L.C. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 88. P. 529–562. DOI: [10.1023/A:1005160129098](https://doi.org/10.1023/A:1005160129098).

Grafe A., Feldstein Y.I. About the relationship between auroral electrojets and ring currents. *Ann. Geophys.* 2000. Vol. 18. P. 874–886. DOI: [10.1007/s00585-000-0874-4](https://doi.org/10.1007/s00585-000-0874-4).

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. P. 1537–1547. DOI: [10.1007/s00585-997-1537-5](https://doi.org/10.1007/s00585-997-1537-5).

Guo J., Feng X., Emery B.A., et al. Energy transfer during intense geomagnetic storms driven by interplanetary coronal mass ejections and their sheath regions. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, A05106. DOI: [10.1029/2011JA016490](https://doi.org/10.1029/2011JA016490).

Kane R.P. How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, A02213. DOI: [10.1029/2004JA010799](https://doi.org/10.1029/2004JA010799).

Kane R.P. Scatter in the plots of $Dst(\min)$ versus $B_z(\min)$. *Planet. Space Sci.* 2010. Vol. 58. P. 1792–1801. DOI: [10.1016/j.pss.2010.07.026](https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.07.026).

Maltsev Yu.P., Rezhnev B.V. Relation of the Dst -index to solar wind parameters. *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. 2003. Vol. 4, no. 1. P. 1–9.

Newell P.T., Gjerloev J.W. Substorm and magnetosphere characteristic scales inferred from the SuperMAG auroral electrojet indices. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, A12232. DOI: [10.1029/2011JA016936](https://doi.org/10.1029/2011JA016936).

Newell P.T., Gjerloev J.W. SuperMAG-based partial ring current indices. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, A05215. DOI: [10.1029/2012JA017586](https://doi.org/10.1029/2012JA017586).

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).

Newell P.T., Gjerloev J.W., Mitchell E.J. Space climate implications from substorm frequency. *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 6254–6265. DOI: [10.1002/jgra.50597](https://doi.org/10.1002/jgra.50597).

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. P. 1858–1862. DOI: [10.1016/j.asr.2007.09.025](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.09.025).

Sugiura M. Hourly values of the equatorial Dst for IGY. *Annales of the International Geophysical Year*. 1964. Vol. 35. P. 9–45.

Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodka 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. Vol. 28. P. 2177–2186. DOI: [10.5194/angeo-28-1-2010](https://doi.org/10.5194/angeo-28-1-2010).

Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodka 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).

Yermolaev, Y.I., Lodka, I.G., Nikolaeva, N.S., Yermolaev M.Y. Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis: 2. Comparisons of CIRs vs. Sheaths and MCs vs. Ejecta. *Solar Phys.* 2017. Vol. 292, 193. DOI: [10.1007/s11207-017-1205-1](https://doi.org/10.1007/s11207-017-1205-1).

Yermolaev Y.I., Lodka I.G., Dremukhina L.A., et al. What solar-terrestrial link researchers should know about interplanetary drivers. *Universe*. 2021. Vol. 7, iss. 5, 138. DOI: [10.3390/universe7050138](https://doi.org/10.3390/universe7050138).

URL: <https://supermag.jhuapl.edu> (дата обращения 2 марта 2021 г.).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html> (дата обращения 2 марта 2021 г.).

URL: <ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog> (дата обращения 2 марта 2021 г.).

URL: <http://www.omniweb.com> (дата обращения 2 марта 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Бороев Р.Н., Васильев М.С. Исследование авроральной активности по данным SME-индекса на главных фазах магнитных бурь во время CIR- и ICME-событий. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 19–24. DOI: [10.12737/szf-74202103](https://doi.org/10.12737/szf-74202103).