

**КОРРЕЛЯЦИЯ СКОРОСТИ РАЗВИТИЯ МАГНИТНОЙ БУРИ
НА ГЛАВНОЙ ФАЗЕ И АВРОРАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ****CORRELATION BETWEEN AURORAL ACTIVITY AND RATE
OF DEVELOPMENT OF A STORM IN ITS MAIN PHASE****Р.Н. Бороев***Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, boroyev@ikfia.ysn.ru***R.N. Boroyev***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy
SB RAS,
Yakutsk, Russia, boroyev@ikfia.ysn.ru*

Аннотация. Исследовалась связь между скоростью развития магнитной бури на главной фазе $|\Delta Dst|/\Delta T$ и средней величиной AE -индекса $(\Sigma AE/\Delta T)$ за время главной фазы, где $|\Delta Dst|$ — изменение Dst -индекса, ΣAE — суммарное значение AE -индекса за время главной фазы магнитной бури, ΔT — длительность главной фазы. Рассмотрены бури, инициированные областью сжатия перед высокоскоростными потоками (corotating interaction region, CIR) и межпланетными проявлениями корональных выбросов ICME (магнитные облака и ejecta). Анализ показал, что величина $\Sigma AE/\Delta T$ коррелирует со скоростью развития магнитной бури для CIR-событий в отличие от бурь, инициированных ICME-событиями. Обнаружена слабая корреляция между $\Sigma AE/\Delta T$ и минимальным значением Dst -индекса магнитной бури для CIR- и ICME-событий.

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

Abstract. We investigated the relationship between the rate of storm development in its main phase $(|\Delta Dst|/\Delta T)$ and the average value $(\Sigma AE/\Delta T)$ of AE index for the main phase where $|\Delta Dst|$ is a Dst -index variation, ΣAE is the total value of AE index for the main phase of magnetic storm, ΔT is the main phase duration. We considered storms initiated by corotating interaction region (CIR) and interplanetary coronal mass ejection (ICME) (magnetic cloud and ejecta). For CIR events, the value of $\Sigma AE/\Delta T$ is shown to correlate with the rate of storm development in its main phase, in contrast to the storms initiated by the ICME. As found, there is a weak correlation between $\Sigma AE/\Delta T$ and the minimum value of Dst index for CIR and ICME events.

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

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в периоды длительной южной B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) в магнитосфере Земли, кроме суббуревых возмущений, развиваются и магнитные бури. Эффективность южной B_z -компоненты ММП в генерации магнитосферных возмущений связана с воздействием на магнитосферу электрического поля солнечного ветра (СВ) $E_{sw} = V_x B_z$ [Burton et al., 1975; Gonzalez et al., 1994; Kane, 2005]. Интенсивность суббуревых и буревых возмущений оценивается по индексам геомагнитной активности AE и Dst . Высокоширотный AE и низкоширотный Dst -индексы, характеризующие в основном интенсивность токов авроральной зоны и кольцевого тока, коррелируют между собой, так как имеют общую причину возникновения (E_{sw}). Особое внимание уделяется исследованиям магнитосферных возмущений в главную фазу магнитной бури, когда наиболее сильно проявляются эффекты взаимодействия СВ с магнитосферой Земли. Результаты статистических и морфологических исследований показывают, что интенсивность магнитосферно-ионосферных возмущений (магнитные бури и суббури) существенно зависит от типа СВ (например, [Plotnikov, Barkova, 2007; Yermolaev et al., 2010]). В настоящее время выделяют

следующие типы СВ: межпланетные проявления корональных выбросов (interplanetary coronal mass ejections, ICME), включающие магнитные облака (magnetic clouds, MC) и поршни (ejecta), области сжатия перед высокоскоростными потоками (corotating interaction regions, CIR), а также области сжатия перед ICME (sheath). Анализ связи между параметрами СВ для разных типов течений и индексами геомагнитной активности AE и Dst [Plotnikov, Barkova, 2007; Yermolaev et al., 2010; Guo et al., 2011; Yermolaev et al., 2012; Liemohn, Katus, 2012; Николаева и др., 2013; Cramer et al., 2013] показал, что во время магнитных бурь минимальное значение ($|Dst_{min}|$) увеличивается с ростом электрического поля E_{sw} для всех типов течений. Для событий ICME (MC + ejecta) величина $|Dst_{min}|$ выходит на насыщение при больших значениях E_{sw} [Nikolaeva et al., 2015]. В отличие от Dst величина AE на главной фазе магнитной бури не зависит от E_{sw} почти для всех течений, кроме MC. Наблюдается нелинейная зависимость AE от E_{sw} в событиях MC.

Необходимо отметить, что вариация Dst определяет интенсивность не только кольцевого тока, но и тока на магнитопаузе, а также токовой системы хвостовой части магнитосферы и высокоширотные магнитосферно-ионосферные токи [Feldstein et al., 2005]. Используя высокоширотный AE , можно учесть

Количество бурь, коэффициенты корреляции r , вероятности P и аппроксимации для связи $\Sigma AE/\Delta T$ со скоростью магнитной бури, с параметрами $|Dst_{\min}|/\Delta T$ и $|Dst_{\min}|$ для CIR- и ICME-иницированных бурь

Тип СВ	N	$ \Delta Dst /\Delta T$			$ Dst_{\min} /\Delta T$		$ Dst_{\min} $	
		r	P	аппроксимация	r	P	r	P
CIR	36	0.71	0.99	$\ln y = 0.42 \ln x + 2.43$	0.76	0.99	0.32	0.95
ICME	36	0.33	0.97	$\ln y = 0.14 \ln x + 2.66$	0.35	0.97	0.26	0.88

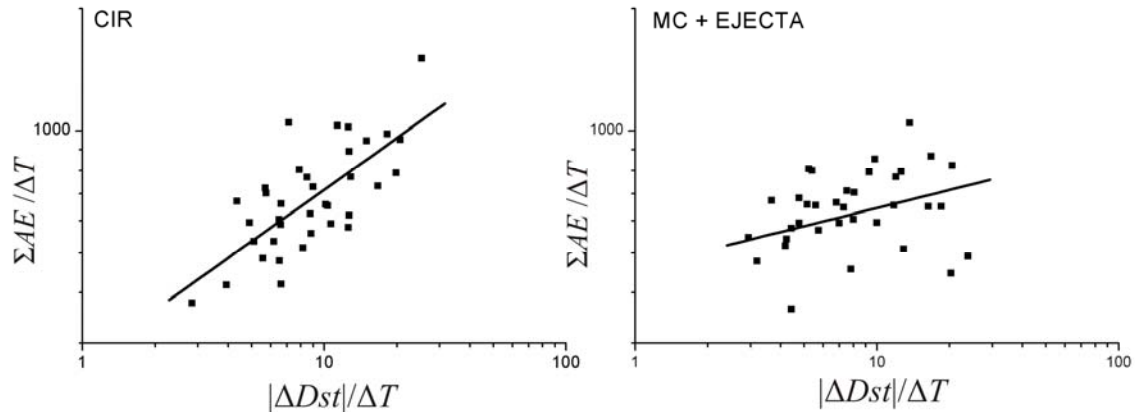


Рис. 1. Связь величины $\Sigma AE/\Delta T$ со скоростью развития магнитной бури $|\Delta Dst|/\Delta T$ для бурь, инициированных CIR и ICME (MC + ejecta) событиями

вклад магнитосферно-ионосферных токовых систем в вариацию Dst . Однако из-за разных временных масштабов развития суббуревых и буревых возмущений AE дает приближенное представление о роли магнитосферно-ионосферных токовых систем в магнитной буре. Кроме того, во время магнитных бурь не только интенсивность авроральных токов, но и их смещение на низкие широты определяют величину AE .

Цель данной работы — исследование связи между динамикой изменения Dst и AE на главной фазе магнитной бури для разных типов СВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа были выбраны магнитные бури из базы данных «Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг.» [Ермолаев и др., 2009]. Более подробная информация приведена на сайте [ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/]. За 1976–2000 гг. были отобраны 72 магнитные бури, инициированные CIR- и ICME- (MC + ejecta) событиями. Магнитные бури, вызванные областью sheath, в данной работе не рассматривались. Часовые значения AE и Dst были взяты с сайта [http://wdc.kugi.kyoto.u.ac.jp/index.html]. Минимальное отрицательное значение Dst по модулю в магнитных бурях было больше 50 нТл. Рассматривались умеренные и сильные магнитные бури после магнитоспокойного периода. Для каждого события была вычислена скорость развития магнитной бури на главной фазе $|\Delta Dst|/\Delta T$. Длительность главной фазы ΔT определялась как временной интервал Dst_0 от момента резкого уменьшения Dst до минимального значения $Dst_{\min}$, а $|\Delta Dst| = |Dst_{\min} - Dst_0|$. Для того чтобы учесть смещение аврорального овала во время магнитной бури, а также длительность суббуревых

возмущений (1–3 ч), вычислялось среднее значение AE за время главной фазы $\Sigma AE/\Delta T$, где ΣAE — суммарное значение AE за время главной фазы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показана зависимость между средней величиной AE ($\Sigma AE/\Delta T$) и скоростью развития магнитной бури для бурь, инициированных CIR- (слева) и ICME- (справа) событиями. Квадратиками отмечены отдельные магнитные бури, прямые линии являются линейными аппроксимациями. В таблице показаны уравнения линейных регрессий между величиной $\Sigma AE/\Delta T$ и скоростью развития магнитной бури для двух типов СВ. Для сравнения в таблице даны коэффициенты корреляции, вероятности связи $\Sigma AE/\Delta T$ со скоростью развития магнитной бури, а также с параметрами $|Dst_{\min}|/\Delta T$ и $|Dst_{\min}|$.

Видно, что значение $\Sigma AE/\Delta T$ монотонно возрастает для разных типов СВ с ростом скорости развития магнитной бури. Однако результаты анализа показывают (табл.), что связь между $\Sigma AE/\Delta T$ и $|\Delta Dst|/\Delta T$ более сильно выражена и статистически значима для бурь, инициированных событиями CIR ($r=0.71$; $P=99\%$), чем ICME ($r=0.33$; $P=97\%$). Таким образом, средняя величина AE явно коррелирует со скоростью развития магнитной бури для CIR-событий, а для событий ICME эта корреляция выражена слабо. Если вместо скорости развития магнитной бури $|\Delta Dst|/\Delta T$ рассматривать новый параметр $|Dst_{\min}|/\Delta T$, который включает величину бури $|Dst_{\min}|$ и длительность главной фазы ΔT , то наблюдается незначительный рост коэффициента корреляции между $\Sigma AE/\Delta T$ и $|Dst_{\min}|/\Delta T$ в отличие от коэффициента корреляции между $\Sigma AE/\Delta T$ и $|\Delta Dst|/\Delta T$ (табл.).

Для оценки возможной связи $\Sigma AE/\Delta T$ с Dst была построена зависимость между величинами $\Sigma AE/\Delta T$

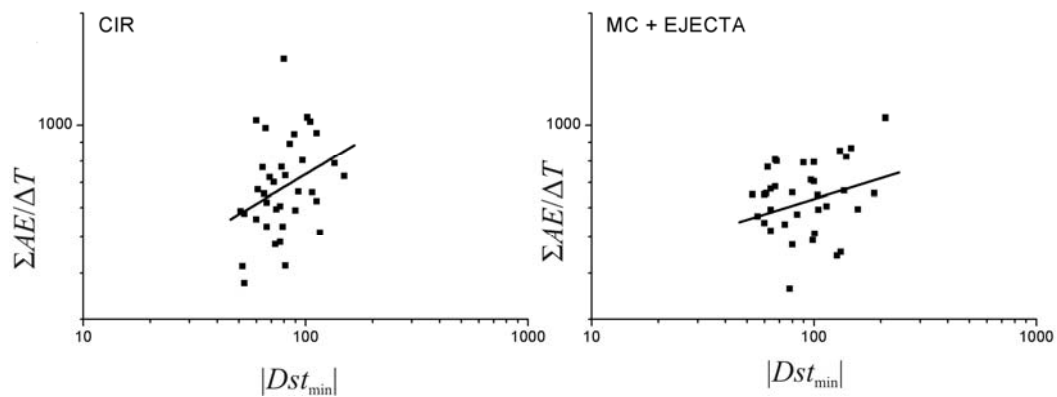


Рис. 2. Связь величины $\Sigma AE/\Delta T$ с $|Dst_{\min}|$ для бурь, инициированных событиями CIR и ICME (MC + ejecta)

и $|Dst_{\min}|$ (рис. 2). Анализ показал крайне слабую корреляцию между ними ($r < 0.5$) для различных типов СВ (табл.).

Известно, что временной ход Dst ($d|Dst|/dt$) на главной фазе магнитной бури обусловлен электрическим полем СВ [Kane, 2010; Yermolaev et al., 2010; Николаева и др., 2014; Ермолаев и др., 2016]. Если принять, что вариации Dst связаны с величиной $|\Delta Dst|/\Delta T$, тогда скорость развития магнитной бури $|\Delta Dst|/\Delta T$ определяется средней величиной E_{sw} [Ермолаев и др., 2016]. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что для CIR-событий величина $\Sigma AE/\Delta T$, возможно, коррелирует со средней величиной E_{sw} на главной фазе магнитной бури.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследована зависимость между величиной $\Sigma AE/\Delta T$ и скоростью развития магнитной бури для магнитных бурь, инициированных событиями ICME (36) и CIR (36). Получены следующие результаты.

1. В периоды CIR-событий величина $\Sigma AE/\Delta T$ коррелирует со скоростью развития магнитной бури в отличие от ICME-событий.

2. Величина $\Sigma AE/\Delta T$ слабо коррелирует с модулем $Dst_{\min}$ для магнитных бурь, инициированных CIR- и ICME-событиями.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-45-05090.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Косм. иссл. 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? 2. Новый метод // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56, № 3. С. 296–301.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Моделирование временного хода Dst -индекса на главной фазе магнитных бурь, генерированных разными типами солнечного ветра // Косм. иссл. 2013. Т. 51, № 6. С. 443–454.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных

бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений. 4. Моделирование для магнитных облаков // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 2. С. 163–173.

Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T., An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 4204–4214.

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. V. 118. DOI: 10.1002/jgra.50138.

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.

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. V. 116. DOI: 10.1029/2011JA016490.

Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 5771–5792.

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.

Kane R.P. How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. DOI: 10.1029/2004JA010799.

Kane R.P. Scatter in the plots of $Dst(\min)$ versus $B_z(\min)$ // Planetary and Space Science. 2010. V. 58. P. 792–1801.

Liemohn M.W., Katus R. Is the storm time response of the inner magnetospheric hot ions universally similar or driver dependent? // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. DOI: 10.1029/2011JA017389.

Nikolaeva N.S., Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G. Predicted dependence of the cross polar cap potential saturation on the type of solar wind stream // Adv. Space Res. 2015. V. 56. P. 1366–1373.

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. Geophysicae. 2010. V. 28. P. 2177–2186.

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.

URL: <ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/> (дата обращения 12 мая 2016 г.).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto.u.ac.jp/index.html> (дата обращения 12 мая 2016 г.).

REFERENCES

- Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst*. *J. Geophys. Res.* 1975, vol. 80, pp. 4204–4214.
- 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. DOI: 10.1002/jgra.50138.
- Feldstein Y.I., Levitin A.E., Kozyra J.U., Tsurutani B.T., Prigancova A., Alperovich L., Gonzalez W.D., Mall U., Alexeev I.I., Gromova L.I., Dremukhina L.A. 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, no. A11. DOI: 10.1029/2004JA010584.
- Guo J., Feng X., Emery B.A., Zhang J., Xiang C., Shen F., Song W. Energy transfer during intense geomagnetic storms driven by interplanetary coronal mass ejections and their sheath regions. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116. DOI: 10.1029/2011JA016490.
- 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.
- Kane R.P. How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110. DOI: 10.1029/2004JA010799.
- Kane R.P. Scatter in the plots of *Dst*(min) versus B_z (min). *Planetary and Space Science*. 2010, vol. 58, pp. 792–1801.
- Liemohn M.W., Katus R. Is the storm time response of the inner magnetospheric hot ions universally similar or driver dependent? *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 117. DOI: 10.1029/2011JA017389.
- Nikolaeva N.S., Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G. Modeling of D_{st} -index temporal profile in the main phase of magnetic storms generated by the solar wind of different types. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2013, vol. 51, no. 6, pp. 443–454. (In Russian).
- Nikolaeva N.S., Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G. Dependence of geomagnetic activity during magnetic storms on solar wind parameters for different types of streams: 4. Simulation for magnetic clouds. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2014, vol. 54, no. 2, pp. 163–173. (In Russian).
- Nikolaeva N.S., Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G. Predicted dependence of the cross polar cap potential saturation on the type of solar wind stream. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 56, pp. 1366–1373.
- 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, pp. 1858–1862.
- Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. Catalog of large-scale solar wind phenomena during 1976–2000. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Res.]. 2009, vol. 47, no. 2, pp. 99–113. (In Russian).
- 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. Geophysicae*. 2010, vol. 28, pp. 2177–2186.
- Yermolaev Yu.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.
- Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. Does the duration of the magnetic storm recovery phase depend on the storm development rate in its main phase? 2. New method. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2016, vol. 56, no. 3, pp. 296–301. (In Russian).
- URL: <ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/> (accessed May 12, 2016).
- URL: <http://wdc.kugi.kyoto.u.ac.jp/index.html> (accessed May 12, 2016).