

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.44-47

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ, ИНИЦИИРОВАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СТРУКТУРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Л.А. Дремухина¹, Ю.И. Ермолаев², И.Г. Лодкина²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Москва, Россия

²Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва, Россия
e-mail: dremukh@izmiran.ru

Аннотация. В работе анализируются характеристики главных фаз магнитных бурь, индуцированных различными типами солнечного ветра (СВ), и их связь с электрическим полем СВ $E_y = -V \cdot B_z$. На основании каталога идентифицированных крупномасштабных типов СВ (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>) и базы данных OMNI за 1995-2016 гг. было отобрано 230 изолированных магнитных бурь и их межпланетные источники: выбросы корональной массы ICME, включающие магнитные облака MC и поршни Ejecta, области компрессии перед ICME Sheath и области взаимодействия разно-скоростных потоков СВ CIR. Из-за небольшой статистики не проводилось разделение на Sheath перед MC и Sheath перед Ejecta, а также учет наличия или отсутствия ударной волны перед драйверами. Проведенный корреляционный анализ показал, что минимальные значения индекса Dst_{min} (максимальная интенсивность бури) тесно коррелируют (с коэффициентами корреляции > 0.6) со средними за период главной фазы значениями поля E_y для всех типов бурь, однако для Sheath- и CIR- индуцированных бурь эта связь наиболее сильная. Тесная корреляция между Dst_{min} и интегралом E_y за период главной фазы характерна для CIR-, Sheath- и Ejecta-бурь, в то время как для MC-бурь она практически отсутствует (коэффициент корреляции < 0.5). Корреляционная связь между средней скоростью развития бури на главной фазе $|\Delta Dst|/\Delta T$ и средними значениями E_y сильна для бурь, вызванных CIR и Sheath, ослабевает для MC, и практически отсутствует (коэффициент корреляции < 0.6) для Ejecta-индуцированных бурь. Полученные результаты указывают на тенденцию зависимости развития магнитной бури (ее интенсивности и скорости роста) от типа ее межпланетного источника.

1. Введение

В работе продолжены исследования развития магнитных бурь, индуцированных разными межпланетными источниками, выполненные ранее на данных за 1976-2000 г.г. [Николаева и др., 2011, 2012, 2017; Yermolaev et al., 2014] с использованием более полного набора данных за 1995-2016 гг. Корреляционный анализ связи между параметрами СВ и геомагнитными индексами во время бурь, индуцированных разными межпланетными источниками, выполнялся во многих работах [Yermolaev et al., 2014; Николаева и др., 2011, 2012, 2017; Borojev and Vasiliev, 2018; Plotnikov and Barkova, 2007; Дремухина и др., 2018; и ссылки в них]. Однако в большинстве работ рассматриваются только такие источники магнитных бурь, как MC и CIR. В [Borojev and Vasiliev, 2018] было показано, что среднеширотные индексы активности на главной фазе бурь поразному зависят от величины поля E_y : средние за главную фазу бури значения Kp (Dst) коррелируют с E_y во время MC-бурь, но не коррелируют при CIR- событиях. В [Plotnikov and Barkova, 2007], напротив, получена нелинейная связь между Dst и E_y для MC-бурь и линейная для CIR-событий. Однако установлено, что самостоятельными источниками бурь можно считать также области сжатия перед ICME (Sheath), а в группе ICME выделить магнитные облака с сильным и плавно вращающимся магнитным полем и обладающие менее упорядоченным магнитным полем события Ejecta [Ермолаев и др., 2009]. В работе [Николаева и др., 2011] показано, что величина $|Dst|$ индекса линейно увеличивается с ростом E_y для всех бурь независимо от их источника, но при высоких значениях поля $E_y > 11$ мВ/м в MC она выходит на насыщение. Линейный характер зависимости Dst от интеграла E_y является следствием формулы [Burton et al., 1975] в случае пренебрежения на главной фазе бури членом, связанным с распадом кольцевого тока. Этот вывод был подтвержден в ряде экспериментальных работ без разделения магнитных бурь по типу их источника в СВ [Kane, 2005]. В данной работе мы исследуем корреляционные связи максимальных значений $|Dst_{min}|$ и скорости развития бури $|\Delta Dst|/\Delta T$ с полем E_y в периоды магнитных бурь от разных межпланетных источников.

2. Данные и методы

Для исследования из архива данных OMNI за 1995-2016 гг. были отобраны 230 изолированных магнитных бурь с $Dst_{min} \leq -50$ нТл и их межпланетные источники, представленные на сайте (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>): выбросы корональной массы ICME, включающие магнитные облака MC (36 событий) и поршни Ejecta (46

событий); области компрессии Sheath перед MC и Ejecta (58 событий) и области взаимодействия разно-скоростных потоков CB CIR (90 событий). События Sheath перед MC и Ejecta были объединены в одну группу из-за маленькой статистики. Для каждой из 4-х групп бурь исследовались корреляционные зависимости максимальных значений $|Dst_{min}|$ и скорости роста главной фазы бури $|\Delta Dst/\Delta T|$, где ΔT – длительность главной фазы, от трех функций электрического поля CB E_y : его интеграла по всей длительности главной фазы бури sE_y ; среднего значения за период главной фазы E_{ym} ; значения поля E_y в максимуме бури E_{ymax} .

Таблица 1. Средние значения (со стандартными отклонениями) максимальных $|Dst_{min}|$, длительности главных фаз ΔT и скорости их развития $|\Delta Dst/\Delta T|$ для бурь, индуцированных разными типами CB.

Тип CB	Число соб.	$\langle Dst_{min} \rangle$, нТл	$\langle \Delta T \rangle$, час	$\langle \Delta Dst/\Delta T \rangle$, нТл/час
CIR	90	78.9 ± 35.3	9.2 ± 3.6	9.3 ± 5.2
Sheath	58	106.2 ± 76.5	8.9 ± 4.5	14.9 ± 13.5
MC	36	93.2 ± 30.2	11.6 ± 4.9	9.0 ± 7.9
Ejecta	46	75.3 ± 22.2	12.3 ± 5.2	5.9 ± 3.8

поля E_{ym} и E_{ymax} характерны для главных фаз MC-бурь. На рис. 1 представлены диаграммы рассеяния, уравнения аппроксимации и коэффициенты корреляции для линейной связи значений $-Dst_{min}$ с величинами sE_y , E_{ym} и E_{ymax} . На рис. 2 приведены те же характеристики для связи скорости роста бури $|\Delta Dst/\Delta T|$ с величинами E_{ym} и E_{ymax} . Анализ рис.1 и 2 показывает, что корреляционная связь между $|Dst_{min}|$ и интегралом электрического поля sE_y достаточно сильна, коэффициенты корреляции имеют значимые значения $RI \geq 0.7$ для всех типов бурь кроме MC- бурь. Для MC-бурь коэффициент корреляции имеет значения $RI \leq 0.5$, что дает основание предположить, что их развитие происходит независимо от предыстории условий в CB, и согласуется с выводами работ [Николаева и др., 2012; Plotnikov and Barkova, 2007] о нелинейной зависимости $|Dst_{min}|$ от sE_y во время MC-бурь. Линейную связь между $|Dst_{min}|$ и значениями E_{ym} и E_{ymax} , можно оценить как очень сильную (коэффициенты $RI \geq 0.73$) для CIR- и Sheath-индуцированных бурь и значимую ($0.5 < RI < 0.7$) для MC- и Ejecta-бурь. Между скоростью роста бури $|\Delta Dst/\Delta T|$ и значениями E_{ym} и E_{ymax} имеет место сильная корреляционная связь для Sheath- ($RI \geq 0.74$) и CIR-бурь ($RI \geq 0.66$), а для остальных двух групп бурь она существенно слабее ($0.5 \leq RI \leq 0.6$).

Таблица 2. Средние значения (со стандартными отклонениями) электрического поля E_{ym} и E_{ymax} для бурь, индуцированных разными типами CB.

Тип CB	Число соб.	$\langle E_{ym} \rangle$, мВ/м	$\langle E_{ymax} \rangle$, мВ/м
CIR	90	2.4 ± 1.8	2.6 ± 2.1
Sheath	58	3.3 ± 3.0	3.7 ± 4.3
MC	36	3.9 ± 1.9	4.2 ± 1.8
Ejecta	46	2.7 ± 0.9	3.1 ± 1.0

Dst_{min} . Согласно диаграммы на верхней панели рис. 1 для развития сильной магнитной бури с $Dst_{min} \leq -100$ при Sheath-событиях достаточно величины $sE_y \sim 25$ мВ/м·ч, в то время как для бурь остальных трех групп это значение $sE_y \sim 50$ мВ/м·ч. Для функций E_{ym} и E_{ymax} такое различие в пороговых значениях их величин отсутствует. На рис. 3 приведены значения коэффициентов регрессии в линейной аппроксимации связи между $|Dst_{min}|$ и тремя рассмотренными функциями поля E_y , сверху вниз: для интеграла поля sE_y ; среднего E_{ym} ; поля в максимуме бури E_{ymax} . Из рис. 3 следует, что для функций sE_y и E_{ym} наибольшие значения коэффициентов регрессии соответствуют Sheath-бурям, в то время как для MC-бурь они имеют самые низкие значения. Для E_{ymax} высокие значения коэффициентов получены также для Ejecta-бурь.

3. Результаты

В табл. 1 представлены средние значения величин $|Dst_{min}|$, длительности главных фаз ΔT и скорости развития главных фаз $|\Delta Dst/\Delta T|$ для отобранных бурь. В таблице 2 представлены средние значения величин E_{ym} и E_{ymax} для тех же выборок бурь. Из таблиц следует, что наибольшие средние значения $|Dst_{min}|$ и скорости роста бурь $|\Delta Dst/\Delta T|$, так же как самая короткая средняя длительность главных фаз $\langle \Delta T \rangle$, относятся к Sheath-индуцированным бурям. Однако самые высокие средние значения

Таким образом, отклик в интенсивности и скорости роста бури различен в зависимости от типа CB, индуцировавшего ее. Показателем геоэффективности каждого типа CB можно считать абсолютные значения коэффициентов регрессии в полученных для них уравнениях аппроксимации, которые являются мерой отклика магнитосферы на одинаковые изменения в геоэффективном параметре (в нашем случае это sE_y , E_{ym} и E_{ymax}). Линии регрессии на рис. 1 позволяют также «вручную» оценить пороговые значения параметров E_y для развития бури с определенным значением

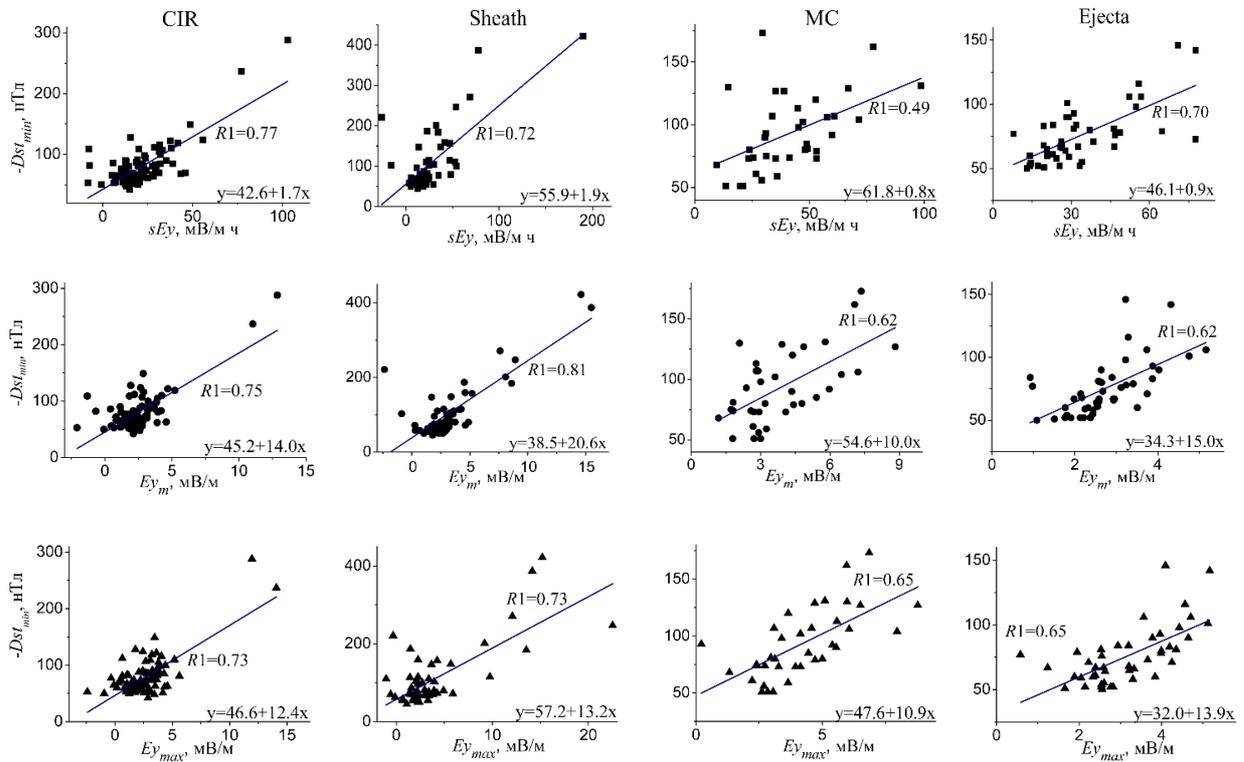


Рисунок 1. Диаграммы рассеяния для зависимостей максимальных интенсивностей $|Dst_{min}|$ от $E_{y_{sum}}$ (верхняя панель), $|Dst_{min}|$ от E_{y_m} (средняя панель) и $|Dst_{min}|$ от $E_{y_{max}}$ (нижняя панель), их линейные аппроксимации (на каждой диаграмме справа внизу) и коэффициенты корреляции $R1$ для бурь, индуцированных разными типами СВ.

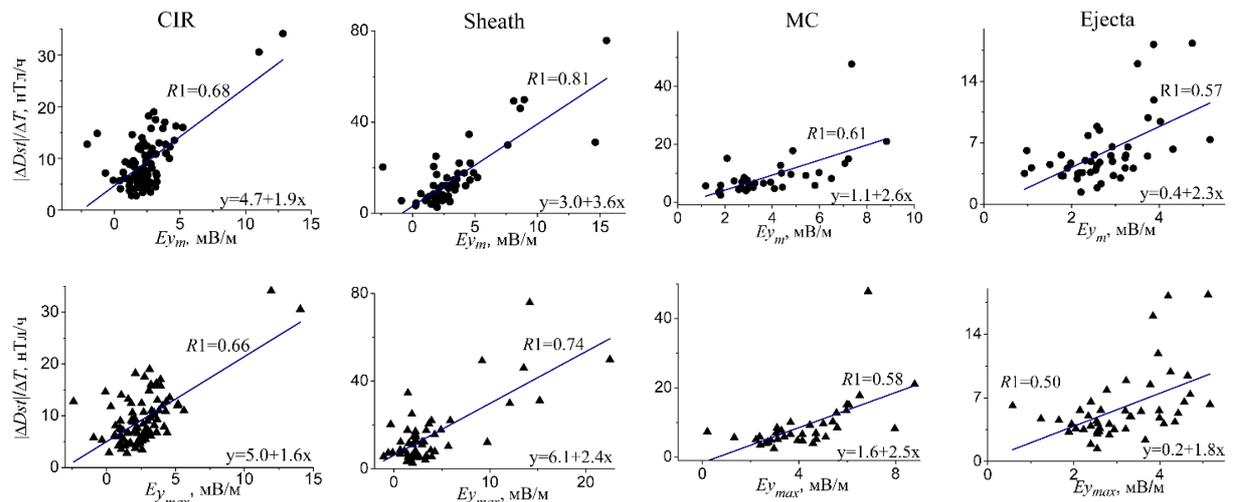


Рисунок 2. Диаграммы рассеяния для зависимостей скорости роста бури $|\Delta Dst|/\Delta T$ от E_{y_m} (верхняя панель) и $|\Delta Dst|/\Delta T$ от $E_{y_{max}}$ (нижняя панель), их линейные аппроксимации (на каждой диаграмме справа внизу) и коэффициенты корреляции $R1$ для бурь, индуцированных разными типами СВ.

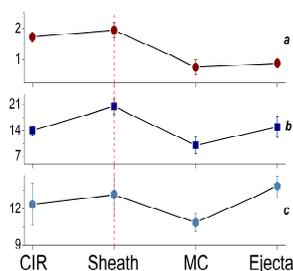


Рисунок 3. Значения коэффициентов регрессии в линейных аппроксимациях, полученных для магнитных бурь, индуцированных разными источниками (указаны внизу рисунка): **a** - для зависимости $|Dst_{min}|$ от $E_{y_{sum}}$; **b** - для зависимости $|Dst_{min}|$ от E_{y_m} ; **c** - для зависимости $|Dst_{min}|$ от $E_{y_{max}}$.

Заключение

В результате проведенного корреляционного анализа было установлено:

- существует сильная линейная зависимость максимальных значений индекса $|Dst_{min}|$ от интеграла электрического поля СВ sE_y в периоды главных фаз CIR-, Sheath- и Ejecta- индуцированных магнитных бурь (коэффициент корреляции $RI \geq 0.7$), в то время как для MC-бурь такая связь не установлена ($RI \leq 0.5$);
- корреляционную связь между максимальными $|Dst_{min}|$ и значениями среднего за главную фазу бури электрического поля E_{y_m} , а также максимального поля $E_{y_{max}}$, можно оценить как очень сильную (коэффициенты $RI \geq 0.73$) при CIR- и Sheath-бурях и значимыми ($0.5 < RI < 0.7$) для MC- и Ejecta-бурь;
- между скоростью развития бури $|\Delta Dst|/\Delta T$ и E_{y_m} и $E_{y_{max}}$ имеет место сильная корреляционная связь с ($RI \geq 0.66$) для Sheath- и CIR-бурь и существенно более слабая для MC- и Ejecta-бурь ($0.5 \leq RI \leq 0.66$);
- оценки пороговых значений интеграла электрического поля sE_y для достижения уровня интенсивности сильных магнитных бурь ($Dst_{min} \leq -100$ нТл) указывают на тенденцию их зависимости от типа источника магнитной бури; можно предположить, что, в среднем, области сжатия перед ICME имеют пороговые значения поля sE_y в 1.5-2 раза ниже, чем сами ICME;
- наибольшая геоэффективность функций sE_y и E_{y_m} , определенная по значениям коэффициентов регрессии, характерна для Sheath-событий в СВ.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 19-02-00177а.

Список литературы

- Boroyev R.N., Vasiliev M.S. (2018), Substorm activity during the main phase of magnetic storms induced by the CIR and ICME events, *Adv. Space Res.*, 61, 348-354. doi: org/10.1016/j.astr.2017.10.031.
- Burton R.K., McPherron R.L., Russell C. T. (1975), An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst , *J. Geophys. Res.*, 80, 4204-4214.
- Kane R.P. (2005), How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? *J. Geophys. Res.*, 110, № A2, A02213. doi:10.1029/2004JA010799. 2005.
- Plotnikov I.Y., Barkova E.S. (2007), Nonlinear dependence of Dst and AE indices on the electric field of magnetic clouds, *Adv. Space Res.*, 40, 1858-1862.
- Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. (2014), Influence of the interplanetary driver type on the durations of the main and recovery phases of magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 119, N 10, 8126-8136.
- Дремухина Л.А., Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И. (2018), Статистическое исследование воздействия солнечного ветра разных типов на генерацию магнитных бурь в период 1995-2016 гг., *Геомагнетизм и Аэрномия*, 58, № 6, 768-775. doi: 10.1134/S0016794018060032.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. (2009), Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976-2000 гг., *Космические исследования*, 47, № 2, 99-113.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. (2011), Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений, *Геомагнетизм и Аэрномия*, 51, № 1, 51-67.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. (2012), Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений. 2. Главная фаза бури, *Геомагнетизм и Аэрномия*, 52, № 1, 31-40.
- Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. (2017), Зависит ли генерация магнитной бури от типа солнечного ветра? *Геомагнетизм и Аэрномия*, 57, № 25, 555-561.