

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.44-47

## АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ, ИНИЦИИРОВАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СТРУКТУРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Л.А. Дремухина<sup>1</sup>, Ю.И. Ермолаев<sup>2</sup>, И.Г. Лодкина<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт 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  $K_p$  ( $Dst$ ) 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  $\Delta T$  – 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  $\Delta T$  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	$78.9 \pm 35.3$	$9.2 \pm 3.6$	$9.3 \pm 5.2$
Sheath	58	$106.2 \pm 76.5$	$8.9 \pm 4.5$	$14.9 \pm 13.5$
MC	36	$93.2 \pm 30.2$	$11.6 \pm 4.9$	$9.0 \pm 7.9$
Ejecta	46	$75.3 \pm 22.2$	$12.3 \pm 5.2$	$5.9 \pm 3.8$

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.

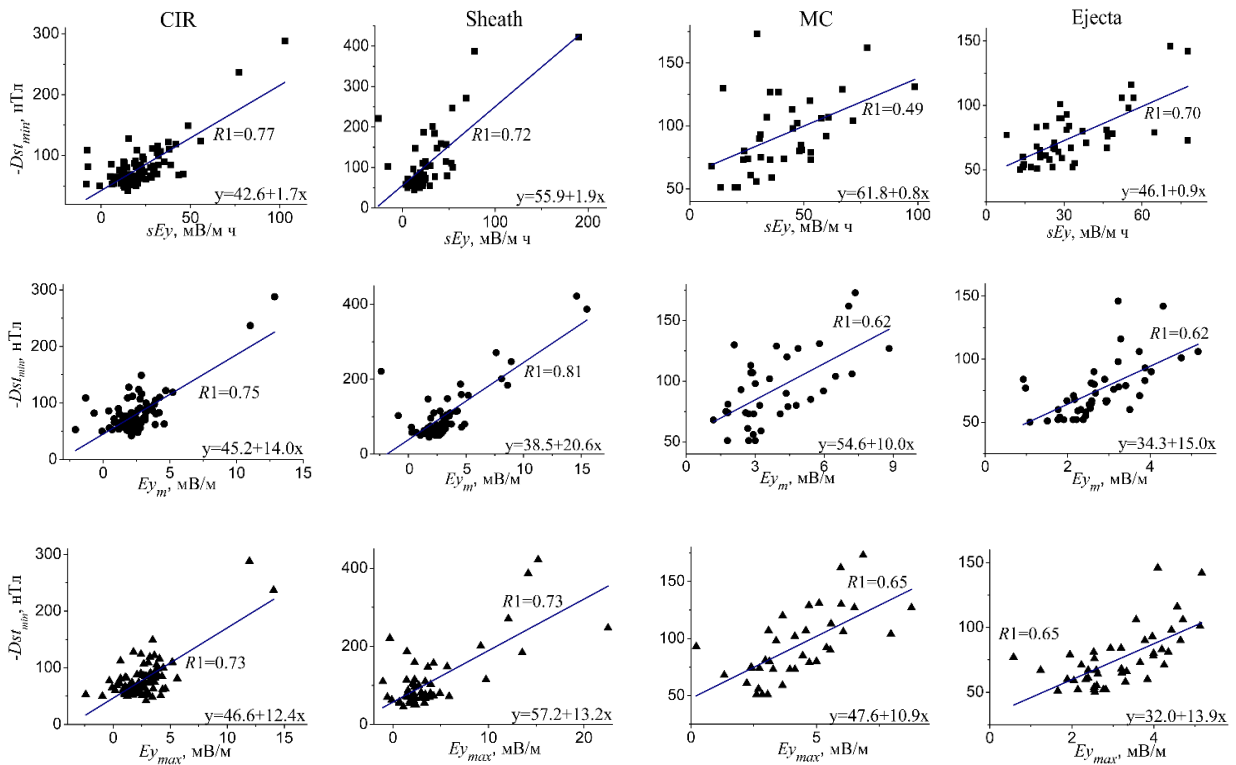
Тип CB	Число соб.	$\langle E_{ym} \rangle$ , мВ/м	$\langle E_{ymax} \rangle$ , мВ/м
CIR	90	$2.4 \pm 1.8$	$2.6 \pm 2.1$
Sheath	58	$3.3 \pm 3.0$	$3.7 \pm 4.3$
MC	36	$3.9 \pm 1.9$	$4.2 \pm 1.8$
Ejecta	46	$2.7 \pm 0.9$	$3.1 \pm 1.0$

$Dst_{min}$ . 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.

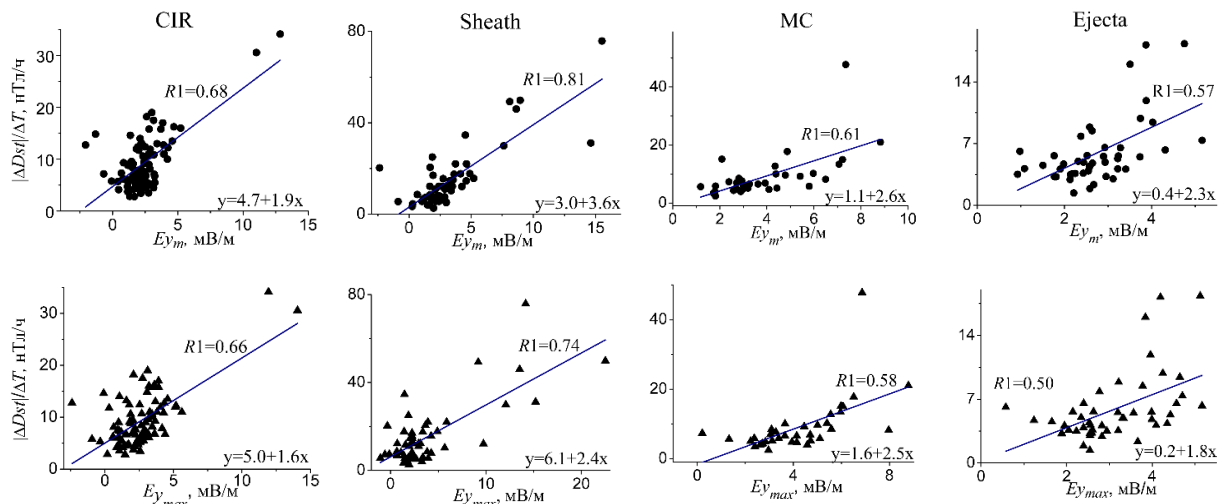
### 3. Результаты

В табл. 1 представлены средние значения величин  $|Dst_{min}|$ , длительности главных фаз  $\Delta T$  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

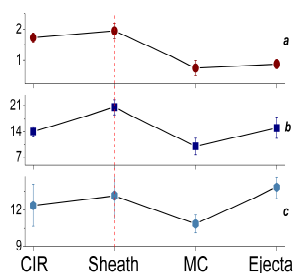
Таким образом, отклик в интенсивности и скорости роста бури различен в зависимости от типа CB, индуцировавшего ее. Показателем геоэффективности каждого типа CB можно считать абсолютные значения коэффициентов регрессии в полученных для них уравнениях аппроксимации, которые являются мерой отклика магнитосферы 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  $Ey_{sum}$  (верхняя панель),  $|Dst_{min}|$  от  $Ey_m$  (средняя панель) и  $|Dst_{min}|$  от  $Ey_{max}$  (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  $Ey_m$  (верхняя панель) и  $|\Delta Dst|/\Delta T$  от  $Ey_{max}$  (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 Аэрoномия*, 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 Аэрoномия*, 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 Аэрoномия*, 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 Аэрoномия*, 57, № 25, 555-561.