

## Моделирование взаимодействия плазмы солнечного ветра с диполизационными фронтами в хвосте магнитосферы Земли

Е. И. Пархоменко<sup>1,\*</sup>, Х. В. Малова<sup>1,2,†</sup>, В. Ю. Попов<sup>1,3,4,‡</sup>

Е. Е. Григоренко<sup>1</sup>, А. А. Петрукович<sup>1</sup>, Л. М. Зеленый<sup>1</sup>, Е. А. Кронберг<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup>Институт Космических исследований РАН, Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., д. 84/3

<sup>2</sup>НИИ ядерной физики МГУ, Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра математики.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>4</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Россия, 101000, Москва, Мясницкая ул., д. 20

<sup>5</sup>Max Planck Institute for Solar System Research, Güttingen, Germany

<sup>6</sup>Ludwig Maximilian University of Munich, Munich, Germany

(Статья поступила 24.06.2018; Подписана в печать 22.07.2018)

Работа посвящена исследованию разных механизмов ускорения заряженных частиц во время магнитных суббурь в хвосте магнитосферы Земли. Построена численная модель, позволяющая исследовать ускорение частиц трех сортов: электронов  $e^-$ , протонов  $H^+$  и ионов кислорода  $O^+$  в результате действия двух различных механизмов: (а) одиночной магнитной диполизации со скачком нормальной компоненты магнитного поля длительностью несколько минут; (б) множественных скачков нормальной компоненты магнитного поля (диполизационных фронтов) длительностью меньше минуты. Показано, что под воздействием одиночной магнитной диполизации (а) происходит преимущественное ускорение ионов кислорода, которые увеличивают свои энергии до 200 кэВ. При этом протоны и электроны ускоряются в меньшей степени. По сравнению с механизмом (а), процесс (б) способствует большему ускорению протонов и электронов до энергий 300 и 150 кэВ соответственно. Таким образом, эффективность ускорения разных популяций частиц резонансным образом связана с длительностью скачка магнитного поля. Чем ближе масштаб изменения поля магнитной диполизации к гиропериоду частиц, тем эффективней их ускорение.

PACS: 52.65.-y

УДК: 533.9

Ключевые слова: магнитосфера Земли, тонкий токовый слой, магнитная диполизация, диполизационные фронты, ускорение частиц.

### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные и теоретические исследования в хвосте магнитосферы Земли [1–10, 13] позволили понять, что процессы ускорения оказывают большое влияние на общую энергетику магнитосферы. Благодаря наблюдательным данным спутниковых миссий Geotail, Cluster, THEMIS, MMS стала ясна роль некоторых механизмов ускорения в магнитосфере Земли [14, 20–22]. Однако точные причины многократного увеличения энергий частиц плазмы магнитосферного хвоста до сих пор не раскрыты в полной мере, несмотря на многочисленные экспериментальные подтверждения данного факта. В частности космическими спутниками были обнаружены популяции частиц с энергиями порядка сотен кэВ [21, 23, 24], чье происхождение еще предстоит узнать.

В работе [25] показано, что с наступлением фазы накопления суббури токовый слой (ТС) хвоста магнитосферы может утоньшаться до предельно ма-

лой толщины порядка протонного гирорадиуса, и такая конфигурация является резервуаром свободной магнитной энергии, которая может быстро высвободиться при разрыве ТС [14, 26, 27]. В исследованиях [10, 13, 28, 29] было раскрыто значение эволюции ТС в процессе преобразования энергии во время суббурь [30, 31]. Представления о магнитной диполизации во время суббури как о процессе образования единственной протяженной X-линии во время магнитного пересоединения в токовом слое хвоста магнитосферы претерпели существенные изменения. Наблюдательные данные свидетельствуют о том, что X-линий может быть много, а их протяженность может быть невелика по сравнению с поперечным размером магнитосферного хвоста. Таким образом, магнитная диполизация в хвосте имеет вид множественных распространяющихся диполизационных фронтов, чье продвижение по направлению к Земле [4, 32–34] характеризуется быстрыми скачками нормальной компоненты магнитного поля  $B_z$  [4, 35, 36]. Диполизационные фронты перемещаются на большие расстояния от средней части магнитосферного хвоста без существенной эволюции [32] и затухают по мере приближения к Земле [37]. Ускорение частиц на фронтах диполизации оказывается эффективным благодаря длительному взаимодействию с ними. В работах [38–44] исследова-

\*E-mail: jookove@mail.ru

†E-mail: hmalova@yandex.ru

‡E-mail: masterlu@mail.ru

но несколько механизмов возникновения данных фронтов. Экспериментальные исследования [32, 35] показали, что такие структуры связаны с процессами пересоединения. В результате прохождения диполизационных фронтов частицы плазмы способны увеличить энергии до нескольких сотен кэВ [45].

В ряде случаев прохождение диполизационных фронтов сопровождается сильной плазменной турбулентностью или электростатическими флуктуациями [20, 46–48]. В зоне ближнего хвоста магнитосферы Земли наблюдаются ионы с энергиями порядка нескольких сотен кэВ, ускоренных в процессе диполизаций [42, 46, 53–55] и в результате действия турбулентного электромагнитного поля [46, 52–54].

В работах [14, 54] исследовано ускорение плазмы в результате захвата диполизационными фронтами и отражения от них [24, 51]. По результатам работ [2, 27, 52, 56–58] можно сделать вывод о том, что электроны и ионы способны увеличивать энергию за счет крупномасштабного электрического поля конвекции  $E_y$ . Здесь и далее мы будем использовать солнечно-магнитосферную систему координат (GSM), в которой ось  $Y$  направлена с утра на вечер, ось  $X$  — от Земли к Солнцу, а ось  $Z$  — вдоль магнитного диполя Земли.

В настоящей работе построена численная модель токового слоя во время магнитной диполизации, позволяющая независимым образом учитывать разные механизмы ускорения заряженных частиц, происходящие во время магнитосферных суббурь на разных временных масштабах. В рамках данной модели проанализирован вклад в ускорение электронов  $e^-$ , протонов  $H^+$  и ионов кислорода  $O^+$ , который вносят: (а) одиночная магнитная диполизация со скачком нормальной компоненты магнитного поля длительностью несколько минут; (б) множественные диполизационные фронты длительностью  $< 1$  мин.

## 1. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ И СХЕМА ЗАПУСКА ЧАСТИЦ

В рамках солнечно-магнитосферной системы координат вектор магнитного поля базовой модели токового слоя имеет вид:

$$\mathbf{B}_0 = B_{x0}\mathbf{e}_x + B_{y0}\mathbf{e}_y + B_{z0}\mathbf{e}_z \quad (1)$$

Величина тангенциальной магнитной компоненты на краях токового слоя соответствует модифицированной модели токового слоя Харриса [59]:  $B_{x0} = B_{x01}\text{th}(z/L_z)$  нТл. Величины шировой и нормальной магнитных компонент составляют, соответственно,  $B_{y0} = 0$  и  $B_{z0} = \text{const} = 4$  нТл. Крупномасштабное электрическое поле плазменной конвекции задано в виде:

$$\mathbf{E}_0 = E_{x0}\mathbf{e}_x + E_{y0}\mathbf{e}_y + E_{z0}\mathbf{e}_z, \quad (2)$$

где  $E_{x0} = 0$ ,  $E_{y0} = 0.2$  мВ/м,  $E_{z0} = 0$ .

Рассмотрены два механизма ускорения частиц в виде: (а) одиночной крупномасштабной диполизации; (б) прохождения множественных диполизационных фронтов, действующих в период времени  $t_d$ . На рис. 1 показаны изменения во времени нормальной составляющей магнитного поля в токовом слое, соответствующие механизмам (а) и (б). Общие магнитное и электрическое поля модели представляют собой суперпозицию компонент:

$$\mathbf{B}(z, t) = \mathbf{B}_0(z) + \Delta\mathbf{B}_d(t) + \Delta\mathbf{B}_{Df}(t), \quad (3)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 + \Delta\mathbf{E}_d(t) + \Delta\mathbf{E}_{Df}(\mathbf{r}, t). \quad (4)$$

Здесь  $\mathbf{B}_0(z)$ ,  $\mathbf{E}_0$  — магнитное и электрическое поля базовой модели токового слоя;  $\Delta\mathbf{B}_{Df}(t) = \Delta B_{z0} \frac{\text{th}[(t-t_0)/\Delta t]+1}{2}$  — магнитное поле крупномасштабной диполизации;  $t_0$  — момент ее начала (за нулевой момент принят момент начала численного моделирования в системе);  $\Delta B_{z0} = 25$  нТл — величина скачка магнитного поля во время диполизации,  $\Delta t = 3$  мин — продолжительность скачка;  $\Delta\mathbf{B}_d(t)$ ,  $\mathbf{E}_d(t)$  — магнитное и электрическое поля множественных диполизационных фронтов, соответствующих наблюдательным данным спутниковой миссии *Cluster*. Временные профили возмущений магнитного поля на рис. 1, а, б соответствуют второму (рис. 1, а) и третьему (рис. 1, б) слагаемым в выражении (3). Компоненты индукционного электрического поля  $\Delta\mathbf{E}_{Df}(\mathbf{r}, t)$  находились путем решения уравнений Максвелла в предположении о том, что свободные заряды отсутствуют:

$$\nabla \times \delta\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \delta\mathbf{B}}{\partial t}, \quad \delta\mathbf{E} = 0. \quad (5)$$

Уравнения движения заряженной частицы массой  $m$  и зарядом  $Z_e$  в электрическом  $\mathbf{E}$  и магнитном  $\mathbf{B}$  полях ( $\mathbf{r}$  — координата частицы;  $\mathbf{v}$  — скорость частицы;  $t$  — время) записываются в виде:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}, \quad m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{Z_e}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] + Z_e \mathbf{E}. \quad (6)$$

Для расчетов уравнения (6) были приведены к безразмерному виду и интегрировались в выбранном электромагнитном поле (3)–(4). Подробное описание уравнений (6) приведено в работе [60].

Была реализована следующая схема (рис. 2) запуска трех сортов частиц бесстолкновительной плазмы. Электроны  $e^-$ , протоны  $H^+$  и ионы кислорода  $O^+$  со средними тепловыми энергиями 1, 6 и 12 кэВ соответственно запускались внутрь модельного параллелепипеда со сторонами:  $x \in [-L_x, L_x]$ ,  $y \in [-L_y, L_y]$ ,  $z \in [-L_z, L_z]$ , где  $L_y = 2L_x = 15 \cdot 10^4$  км,  $L_z = 10 L_{z0}$ , где  $L_{z0} = 2000$  км характерная толщина тонкого токового слоя. Всего в область моделирования было запущено  $N = 5 \times 10^5$  частиц каждого сорта. В качестве начального распределения по скоростям использовалось

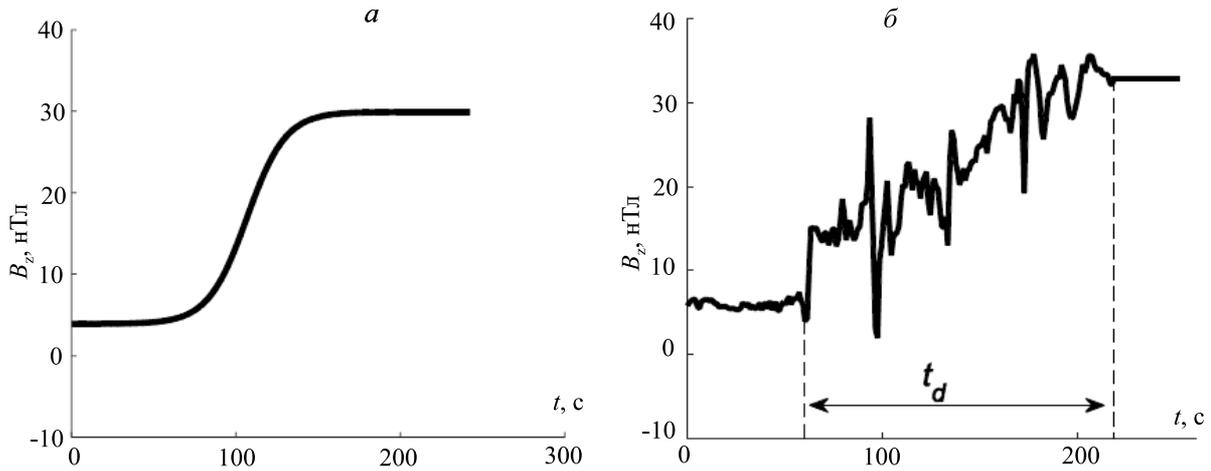


Рис. 1: Временной профиль нормальной компоненты магнитного поля для двух процессов: а) диполизации общей длительностью  $t = 4$  мин со скачком магнитного поля  $\Delta B_z$  величиной 25 нТл; б) диполизации общей длительностью  $t = 4$  мин, включающей в себя несколько диполизационных фронтов общей длительностью  $t_d = 2.6$  мин; длительность каждого из которых приблизительно 20 с

каппа-распределение:

$$f(\mathbf{v}) = \frac{n_0 A_{\kappa_\epsilon}}{2(\sqrt{\pi} k V_{\kappa_\epsilon})^3} \times \sum_{s=1,2} \left[ 1 + \frac{\mathbf{v}_\perp^2 + (\mathbf{v}_\parallel - (-1)^s \mathbf{v}_D)^2}{\kappa_\epsilon \cdot v_{\kappa_\epsilon}^2} \right]^{-(\kappa_\epsilon+1)}, \quad (7)$$

где  $n_0$  — плотность плазмы;  $v_{\kappa_\epsilon} = v_T \sqrt{2 - 3/\kappa_\epsilon}$  — нормированная тепловая скорость;  $\kappa_\epsilon = 3$  — параметр каппа-функции;  $\mathbf{v}_D = 1400$  км/с — дрейфовая скорость частиц;  $\mathbf{v}_\parallel, \mathbf{v}_\perp$  — соответственно, параллельная и перпендикулярная составляющие скоростей частиц.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Чтобы количественно определить эффективность отдельных механизмов ускорения, упомянутых в разделе 1, уравнения (6) были решены численно для ансамбля частиц. На рис. 3, а, б показаны энергетические спектры ускоренных электронов (серая сплошная линия), протонов (черная сплошная линия) и ионов кислорода (черная пунктирная линия), запущенных с одними и теми же начальными условиями в системе.

В табл. 1–3 приведены значения начальных, средних  $\bar{E}$  и максимальных  $E_{max}$  энергий частиц в токовом слое, где присутствуют: а) одиночный скачок нормальной компоненты магнитного поля (табл. 1); б) множественные диполизационные фронты (табл. 2). Коэффициент  $\lambda = E_{max}/\bar{E}_0$  характеризует относительный выигрыш энергий разных сортов частиц.

Сравнительное исследование энергетических спектров, приведенных на рис. 3, а, б, свидетельствует о том, что оба механизма (а)–(б) ускорения плазмы

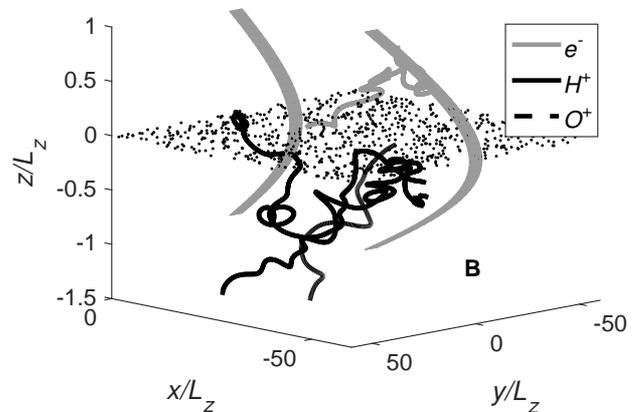


Рис. 2: Модельная схема запуска частиц. Силовые линии магнитного поля показаны серыми сплошными линиями. Изображены начальные положения частиц (множество точек в плоскости токового слоя) и траектории пробных трех частиц — электрона, протона и иона кислорода (черные сплошные линии)

в токовом слое магнитосферного хвоста ведут к многократному росту энергий у всех частиц плазмы. При этом ускорение отдельных сортов частиц связано с соотношением между гиропериодом и временным масштабом изменения нормальной компоненты магнитного поля, т.е. носит резонансный характер во времени. При реализации механизма (а) одиночной магнитной диполизации длительностью несколько минут происходит преимущественное ускорение ионов кислорода  $O^+$ , которые эффективно ускоряются до 200 кэВ с выигрышем в энергии 16, при этом ионы  $H^+$  и электроны  $e^-$  ускоряются в меньшей степени до максимальных энергий

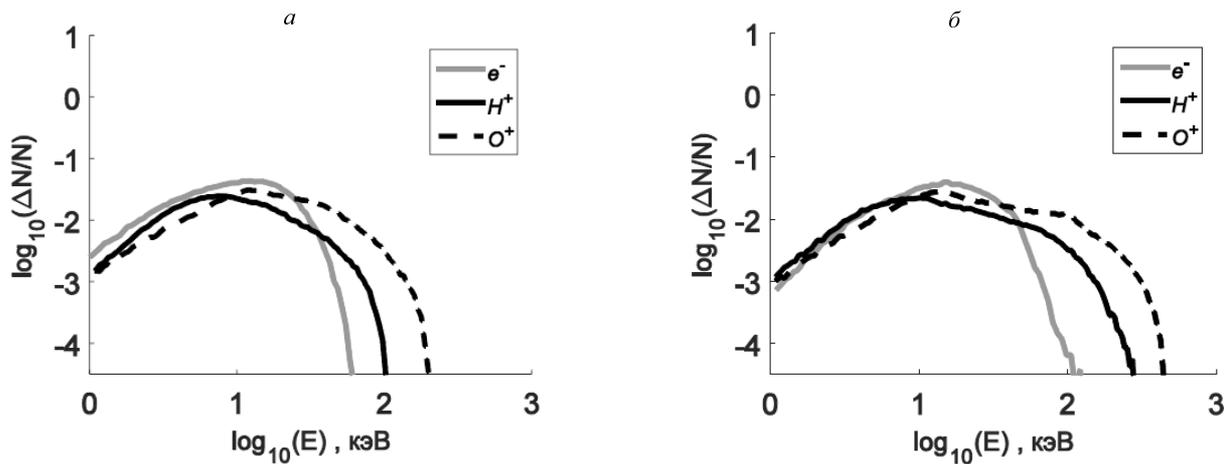


Рис. 3: Энергетические распределения частиц плазмы, ускоренных: а) на крупномасштабном скачке нормального магнитного поля; б) при взаимодействии с множественными диполизационными фронтами

Таблица I: Значения начальных тепловых  $\bar{E}_0$ , средних  $\bar{E}$ , максимальных  $E_{max}$  энергий частиц и коэффициента выигрыша энергии для механизма (а). Коэффициент  $\lambda = E_{max}/\bar{E}_0$  характеризует относительный выигрыш энергий разных сортов частиц

	$\bar{E}_0$ , кэВ	$\bar{E}$ , кэВ	$E_{max}$ , кэВ	$\lambda$
$e^-$	1	11	60	60
$H^+$	6	7	100	16
$O^+$	12	13	200	16

Таблица II: Значения параметров ускоренных частиц для механизма (б). Обозначения те же, что и в табл. I

	$\bar{E}_0$ , кэВ	$\bar{E}$ , кэВ	$E_{max}$ , кэВ	$\lambda$
$e^-$	1	12	150	150
$H^+$	6	8	300	50
$O^+$	12	15	450	40

порядка 100 и 60 кэВ соответственно (табл. 1).

Механизм (б) прохождения множественных диполизационных фронтов намного более эффективен при ускорении электронов  $e^-$ , протонов  $H^+$  и тяжелых ионов  $O^+$ : максимальные энергии частиц возрастают, соответственно, в 150, 50 и 40 раз (табл. 2). Электроны при этом ускоряются до меньших энергий по сравнению с протонами и ионами кислорода, однако выигрыш энергий у них существенно больше за счет малых временных масштабов изменения электромагнитных полей. Механизм ускорения (б) в три раза увеличивает энергии протонов, что оказывается большим, чем у остальных частиц.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено сравнительное исследование механизмов ускорения магнитосферной плазмы во время суббурь. Рассмотрены два возможных механизма воздействия на заряженные частицы: (а) общая диполизация; (б) набор диполизационных фронтов и оценен их вклад в энергизацию трех плазменных компонент при их взаимодействии с нестационарным магнитным полем ТС.

Показано, что при воздействии одиночной крупномасштабной диполизации ионы кислорода достигают больших энергий в сравнении с протонами и электронами. С приходом диполизационных фронтов их ускорение возрастает приблизительно в два раза до 450 кэВ, однако это меньше чем у протонов и электронов.

Протоны эффективно ускоряются под действием обоих рассмотренных механизмов, а максимальный прирост энергии у них обнаружен во время (б) прохождения множественных диполизационных фронтов, что свидетельствует о резонансном временном характере взаимодействия.

Электроны наилучшим образом ускоряются в процессе (б) взаимодействия с множественными фронтами диполизации до 150 кэВ и менее чувствительны к медленно изменяющейся во времени (а) одиночной диполизации. Масштабы гировращения электронов несовместимы с характерными временными масштабами процессов (а)–(б) в отличие от остальных частиц, поэтому они достигают меньших энергий.

Данная численная модель была построена для объяснения эффектов появления потоков плазменных частиц, ускоренных до сотен кэВ во время магнитосферных суббурь. Согласно модели, электроны  $e^-$  могут достигать максимальной энергии примерно 150 кэВ. Ионы водорода  $H^+$  и кислорода  $O^+$ , более чувствительны к прохождению фронтов, длительность которых по

порядку величины сопоставима с их гиропериодами, и могут ускоряться, соответственно, до энергий 320 и 500 кэВ. Построенная теоретическая модель находится в количественном согласии с наблюдательными данными в разных геомагнитных условиях и может использоваться для их интерпретации.

Работа Е. Пархоменко, Х. Маловой, В. Попова,

А. Петруковича выполнена при частичной поддержке гранта РНФ 14-12-00824; работа Е. Григоренко выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-02-00479, работа Л. Зеленого поддержана частично грантами РФФИ 18-52-7808 и 16-52-16009; работа Е. Кронберг поддержана Volkswagen Foundation grant Az 90 312.

- [1] *Sharma A. S., Nakamura R., Runov A.* et al. *Ann. Geophys.* 2008. **26**. P. 1.
- [2] *Retino A., Nakamura R., Vaivads A.* et al. *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2008. **113**. P. A12215.
- [3] *Yamada M., Kulsrud R., Ji H.* *Rev. Mod. Phys.* 2010. **82**. P. 603.
- [4] *Delcourt D. C., Pedersen A., Sauvaud J. A.* *J. Geophys. Res.* 1990. **95**. P. 20853.
- [5] *Birn J., Artemyev A. V., Baker D. N.* et al. *Space Sci. Rev.* 2012. **173**. P. 49.
- [6] *Birn J., Hesse M., Nakamura R., Zaharia S.* *J. Geophys. Res.* 2013. **118**. P. 1960.
- [7] *Ashour-Abdalla M., Lapenta G., Walker R. J.* et al. *J. Geophys. Res.* 2015. **120**. P. 4784.
- [8] *Grigorenko E. E., Malykhin A. Yu., Kronberg E. A.* et al. *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2015. **120**. P. 6541.
- [9] *Zelenyi L. M., Artemyev A. V., Malova H. V.* et al. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2008. **70**. P. 325.
- [10] *Zelenyi L. M., Malova H. V., Artemyev A. V.* et al. *Plasma Phys. Rep.* 2011. **37**. P. 118.
- [11] *Angelopoulos V., Runov A., Zhou X. Z.* et al. *Science.* 2013. **341**. P. 1478.
- [12] *Artemyev A. V., Lutsenko V. N., Petrukovich A. A.* *Ann. Geophys.* 2012. **30**. P. 317. 118.
- [13] *Angelopoulos V., Runov A., Zhou X. Z.* et al. *Science.* 2013. **341**. P. 1478.
- [14] *Artemyev A. V., Lutsenko V. N., Petrukovich A. A.* *Ann. Geophys.* 2012. **30**. P. 317.
- [15] *Lui A. T. Y.* *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2014. **115**. P. 17.
- [16] *Kronberg E. A., Grigorenko E. E., Turner D. L.* et al. *J. Geophys. Res.* 2017. **122**. P. 3055.
- [17] *Liang H., Lapenta G., Walker R. J.* et al. *J. Geophys. Res.* 2017. **122**. P. 618.
- [18] *Zhou X. Z., Angelopoulos V., Sergeev V. A.* et al. *J. Geophys. Res.* 2010. **115**. P. A00103.
- [19] *Ashour-Abdalla M., Lapenta G., Walker R. J.* et al. *J. Geophys. Res.* 2015. **120**. P. 478
- [20] *Lui A. T. Y.* *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2014. **115**. P. 17.
- [21] *Kronberg E. A., Grigorenko E. E., Turner D. L.* et al. *J. Geophys. Res.* 2017. **122**. P. 3055.
- [22] *Liang H., Lapenta G., Walker R. J.* et al. *J. Geophys. Res.* 2017. **122**. P. 618.
- [23] *Zhou X. Z., Angelopoulos V., Sergeev V. A.* et al. *J. Geophys. Res.* 2010. **115**. P. A00103.
- [24] *Ashour-Abdalla M., Lapenta G., Walker R. J.* et al. *J. Geophys. Res.* 2015. **120**. P. 4784.
- [25] *Nakamura R., Baumjohann W., Fujimoto M.* et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2008. **113**. P. A07S16.
- [26] *Galeev A. A.* *Sov. Phys. Usp.* 1979. **22**. P. 196.
- [27] *Zelenyi L. M., Lominadze J. G., Taktakishvili A. L.* *J. Geophys. Res.* 1990. **95**. P. 3883.
- [28] *Baker D. N., Fritz T. A., McPherron R. L.* et al. *J. Geophys. Res.* 1985. **90**. P. 1205.
- [29] *Grigorenko E. E., Zelenyi L. M., Dolgonosov M. S.* et al. *Space Sci. Rev.* 2011. **164**. P. 133.
- [30] *Birn J., Artemyev A. V., Baker D. N.* et al. *Space Sci. Rev.* 2012. **173**. P. 49.
- [31] *Lui A. T. Y.* *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2014. **115**. P. 17.
- [32] *Runov A., Angelopoulos V., Sergeev V. A.* et al. *Ann. Geophys.* 2009. **27**. P. 319.
- [33] *Runov A., Angelopoulos V., Zhou X. Z.* et al. *J. Geophys. Res.* 2011. **116**. P. A05216.
- [34] *Yao Z., Fazakerley A. N., Varsani A.* et al. *J. Geophys. Res.* 2016. **121**. P. 5185.
- [35] *Nakamura R., Baumjohann W., Klecker B.* et al. *Geophys. Res. Lett.* 2002. **29**. P. CiteID 1942.
- [36] *Sergeev V., Angelopoulos V., Apatenkov S.* et al. *Geophys. Res. Lett.* 2009. **36**. P. L21105.
- [37] *Hamrin M., Norqvist P., Karlsson T.* et al. *J. Geophys. Res.* 2013. **118**. P. 6279.
- [38] *Slavin J. A., Owen C. J., Dunlop M. W.* et al. *Geophys. Res. Lett.* 2003. **30**. P. 2208.
- [39] *Sergeev V. A., Elphic R. C., Mozer F. S.* et al. *Planetary and Space Science.* 1992. **40**. P. 1551.
- [40] *Heyn M. F., Semenov V. S.* *J. Plasma Phys.* 1996. **3**. P. 2725.
- [41] *Semenov V. S., Penz T., Ivanova V. V.* et al. *J. Geophys. Res.* 2005. **110**. P. A11217.
- [42] *Longcope D. W., Priest E. R.* *J. Plasma Phys.* 2007. **14**. P. 122905.
- [43] *Sitnov M. I., Swisdak M., Divin A. V.* *J. Geophys. Res.* 2009. **114**. P. A04202.
- [44] *Sitnov M. I., Swisdak M.* *J. Geophys. Res.* 2011. **116**. P. A12216.
- [45] *Ono Y., Nosü M., Christon S. P.* et al. *J. Geophys. Res.* 2009. **114**. P. A05209.
- [46] *Ipavich F. M., Galvin A. B., Gloeckler G.* et al. *Geophys. Res. Lett.* 1984. **11**. P. 504.
- [47] *Nosü M., Ohtani S., Lui A. T. Y.* *J. Geophys. Res.* 2000. **105**. P. 23277.
- [48] *Cattell C. A., Mozer F. S.* *Geophys. Res. Lett.* 1982. **9**. P. 1041.
- [49] *Delcourt D. C.* *J. Atmos. Solar Ter. Phys.* 2002. **64**. P. 551.
- [50] *Greco A., Artemyev A., Zimbardo G.* *Geophys. Res. Lett.* 2015. **42**. P. 8280.
- [51] *Perri S., Lepreti F., Carbone V.* et al. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation.* 2009. **14**. P.2347-2352.
- [52] *Greco A., Perri S., Zimbardo G.* et al. *Adv. Space Res.* 2009. **44**. P. 528.
- [53] *Ukhorskiy A. Y., Sitnov M. I., Merkin V. G.* et al. *J. Geophys. Res.* 2017. **122**. P. 3040.
- [54] *Zhou X. Z., Ge Y. S., Angelopoulos V., Runov A.* et al. *J. Geophys. Res.* 2012. **117**. P. A10227.

- [55] *Birn J., Thomsen M.F., Hesse M. J.* Plasma Phys. 2004. **11**. P. 1825.  
[56] *Apatenkov S. V., Sergeev V. A., Kubyshkina M. V.* et al. Ann. Geophys. 2007. **25**. P. 801.  
[57] *Hoshino M. J.* Geophys. Res.: Space Physics. 2005. **110**. P. A10215.  
[58] *Catapano F., Zimbardo G., Perri S.* et al. Ann. Geophys. 2016. **34**. P. 917.  
[59] *Harris E. G.* Nuovo Cimento. 1962. **23**. P. 115.  
[60] *Zhukova E. I., Malova Kh. V., Popov V. Yu.* et al. Cosmic Res. 2017. **55**. P. 417.

---

## Modeling of the interaction of the solar wind plasma with dipolarization fronts in the tail of the Earth's magnetosphere

**E. I. Parkhomenko<sup>1,a</sup>, H. V. Malova<sup>1,2,b</sup>, V. Yu. Popov<sup>1,3,4</sup>, E. E. Grigorenko<sup>1</sup>, A. A. Petrukovich<sup>1</sup>, L. M. Zeleni<sup>1</sup>, E. A. Kronberg<sup>5,6</sup>**

<sup>1</sup>*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow, 117997, Russia*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics. Moscow 119991, Russia*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University, Physics Department, Mathematic Chair. Moscow, 119991, Russia*

<sup>4</sup>*National Research University Higher School of Economics. Moscow, 101000, Russia*

<sup>5</sup>*Max Planck Institute for Solar System Research. Güttingen, Germany.*

<sup>6</sup>*Ludwig Maximilian University of Munich. Munich, Germany*

*E-mail: <sup>a</sup>jookove@mail.ru, <sup>b</sup>hmalova@yandex.ru, <sup>c</sup>masterlu@mail.ru*

This work is devoted to studying the acceleration of plasma particles during magnetospheric substorms in the Earth's magnetotail. A numerical model allows one to investigate the acceleration of electrons  $e^-$ , protons  $H^+$  and oxygen ions  $O^+$  due to the action of two different mechanisms: (a) actual dipolarization when the normal magnetic field component changes during several minutes; (b) multiple pulses of the normal magnetic field component (dipolarization fronts) with characteristic time scales less than one minute. It has been shown that mechanism of actual dipolarization (a) makes the largest contribution to the acceleration of oxygen ions, which increased their energies up to 200 keV. In this case, protons and electrons are accelerated less. In comparison with the mechanism (a), the process (b) leads to more efficient acceleration of protons and electrons, which reached energies up to 300 and 150 keV, respectively. Thus, the effectiveness of different particle energization related with the time scale of variation of the magnetic field. The closer the time scale of the field variation to the particle's gyroperiod, the more effective their acceleration

PACS: 52.65.-y

*Keywords:* Earth's magnetosphere, thin current sheet, magnetic dipolarization, dipolarization fronts, particle acceleration.

*Received 24 June 2018.*

### Сведения об авторах

1. Пархоменко Е.И. — аспирант РАН, инженер ИКИ РАН; тел.: (495) 333-25-00, e-mail: jookove@mail.ru.
2. Малова Х.В. — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 333-25-00, e-mail: hmalova@yandex.ru.
3. Попов В.Ю. — профессор, доктор физ.-мат. наук; тел.: (495) 333-25-00, e-mail: masterlu@mail.ru.
4. Григоренко Е.Е. — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 333-25-00, e-mail: lzelenyi@iki.rssi.ru.
5. Петрукович А.А. — член-корреспондент РАН, доктор физ.-мат. наук, директор ИКИ РАН; тел.: (495) 333-25-00.
6. Зеленый Л.М. — докт. физ.-мат. наук, академик РАН, научный руководитель ИКИ РАН; тел.: (495) 333-25-00, e-mail: lzelenyi@iki.rssi.ru.
7. Кронберг Е.А. — сотрудник Max Planck Institute for Solar System Research.