

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ КИСЛОРОДА  $O^+ - O^{+2}$  С ДИПОЛИЗАЦИОННЫМИ ФРОНТАМИ В СОПРОВОЖДЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

**Пархоменко Е.И.<sup>1</sup>, Попов В.Ю.<sup>1,2,3</sup>, Малова Х.В.<sup>1,4</sup>, Зеленый Л.М.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт космических исследований РАН, Москва, ул. Профсоюзная 84/32  
117997, Россия e-mail: [jookove@mail.ru](mailto:jookove@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8  
119991, Россия*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва,  
Трифоновская ул., 57, стр. 1, 101000, Россия e-mail: [masterlu@mail.ru](mailto:masterlu@mail.ru)*

<sup>4</sup>*НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва, Ленинские горы д.1, стр. 2,  
119991, Россия e-mail: [hmalova@yandex.ru](mailto:hmalova@yandex.ru)*

Статья поступила в редакцию 25.12.2018, одобрена к печати 30.01.2019

Работа посвящена исследованию ускорения частиц плазмы в процессе магнитных диполизаций в токовом слое магнитосферного хвоста Земли. Построена численная модель, позволяющая оценивать ускорение ионов кислорода  $O^+ - O^{+2}$  в двух возможных сценариях: (А) прохождения множественных диполизационных фронтов; (В) прохождения диполизационных фронтов в сопровождении крупномасштабной электромагнитной турбулентности. Получены энергетические спектры ускоренных частиц двух сортов: ионов кислорода  $O^+$  и  $O^{+2}$ . Показано, что на разных временных масштабах сценарии (А)–(В) способствуют различному ускорению популяций частиц. Чем ближе масштаб изменения поля к гиропериоду ионов, тем эффективней перенос энергии от полям к частицам. Так, ионы кислорода  $O^{+2}$  эффективно ускоряются в процессе (А) прохождения множественных диполизационных фронтов и увеличивают энергии до 3 МэВ, в то время как ионы  $O^+$  – до 1.7 МэВ. Показано, что учет электромагнитных флуктуаций, сопровождающих магнитную диполизацию, может объяснить появление потоков ионов кислорода с энергиями больше 3 МэВ в хвосте магнитосферы Земли.

**Ключевые слова:** солнечный ветер, магнитосфера Земли, диполизационные фронты, ускорение частиц.

### **Литература**

- Birn J., Runov A., Hesse M. Energetic ions in dipolarization events // J. Geophys. Res. 2015. Vol. 120. P. 7698. DOI: 10.1002/2015JA021372.*  
*Delcourt D. C. Particle acceleration by inductive electric fields in the inner magnetosphere // J.*

- Atm. Solar Ter. Phys. 2002. Vol. 64. P. 551. DOI:10.1016/S1364-6826(02)00012-3.
- Greco A., Artemyev A., Zimbardo G. Heavy ion acceleration at dipolarization fronts in planetary magnetotails // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42. P. 8280. DOI:10.1002/2015GL066167.
- Grigorenko E. E., Kronberg E. A., Daly P. W. Heating and acceleration of charged particles during magnetic dipolarizations // Cosmic Res. 2017. Vol. 55. P. 57. DOI: 10.1134/S0010952517010063.
- Runov A., Angelopoulos V., Sitnov M., Sergeev V. A., Nakamura R. et al. Dipolarization fronts in the magnetotail plasma sheet // Planetary and Space Science. Vol. 59. P. 517. DOI: 10.1016/j.pss.2010.06.006.
- Zelenyi L.M., Malova H.V., Artemyev A.V., Popov V.Yu., Petrukovich A.A. Thin current sheets in collisionless plasma: equilibrium structure, plasma instabilities, and particle acceleration // Plasma Phys. Rep. 2011. Vol. 37. P. 118. DOI:10.1134/S1063780X1102005X.

## MODEL OF THE INTERACTION OF OXYGEN IONS $O^+O^{+2}$ WITH DIPOLAZATION FRONTS DURING ELECTROMAGNETIC TURBULENCE IN THE EARTH'S MAGNETOTAIL

**Parkhomenko E.I.<sup>1</sup>, Popov V.Yu.<sup>1,2,3</sup>, Malova H.V.<sup>1,4</sup>, Zelenyi L.M.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Space Research Institute RAS, Moscow, 117997, Russia  
e-mail: [jookove@mail.ru](mailto:jookove@mail.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991, Russia

<sup>3</sup> National Research University "Higher School of Economics", Moscow, 101000, Russia  
e-mail: [masterlu@mail.ru](mailto:masterlu@mail.ru)

<sup>4</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics MSU, Moscow, 119991, Russia  
e-mail: [hmalova@yandex.ru](mailto:hmalova@yandex.ru)

Submitted 25.12.2018, accepted 30.01.2019

The paper is devoted to studying processes of plasma particle acceleration in the process of magnetic dipolarizations in a current sheet of Earth's magnetotail. A numerical model is constructed that allows evaluation of oxygen ions  $O^+O^{+2}$  acceleration in two possible scenarios: (A) Passage of multiple dipolarization fronts; (B) Passage of fronts followed by largescale electromagnetic turbulence. The energy spectra of two types of accelerated particles are obtained: oxygen  $O^+$  and  $O^{+2}$  ions. It is shown that, at different time scales, predominant variety acceleration of particle populations occurs in scenarios (A)–(B). Thus the closer the time scale of the field variation to the ions gyroperiod, the more effective is the transfer of energy from fields to particles. Oxygen ions  $O^{+2}$  are accelerated efficiently in multiple dipolarization process (B) and increase energy up to 3 MeV, whereas ions  $O^+$  – up to 1.7 MeV. It is shown that accounting for electromagnetic fluctuations, accompanying magnetic dipolarization, may explain the appearance of streams of oxygen ions with energies greater than 3MeV in Earth's magnetotail.

**Keywords:** solar wind, Earth's magnetosphere, dipolarization fronts, particle acceleration

### References

- Birn J., Runov A., and Hesse M.* Energetic ions in dipolarization events. *J. Geophys. Res.*, 2015, Vol. 120, pp. 7698, doi:10.1002/2015JA021372.
- Delcourt D. C.* Particle acceleration by inductive electric fields in the inner magnetosphere. *J. Atm. Solar Ter. Phys.*, 2002, Vol. 64, pp. 551, doi:10.1016/S1364-6826(02)00012-3.
- Greco A., Artemyev A., and Zimbardo G.* Heavy ion acceleration at dipolarization fronts in planetary magnetotails. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, Vol. 42, pp. 8280, doi:10.1002/2015GL066167.
- Grigorenko E.E., Kronberg E.A., and Daly P.W.* Heating and acceleration of charged particles during magnetic dipolarizations. *Cosmic Res.*, 2017, Vol. 55, pp. 57, doi: 10.1134/S0010952517010063.
- Runov A., Angelopoulos V., Sitnov M., Sergeev V.A., and Nakamura R.* Dipolarization fronts in the magnetotail plasma sheet. *Planetary and Space Science*, Vol. 59, pp. 517, doi: 10.1016/j.pss.2010.06.006.
- Zelenyi L.M., Malova H.V., Artemyev A.V., Popov V.Yu., and Petrukovich A.A.* Thin current sheets in collisionless plasma: equilibrium structure, plasma instabilities, and particle acceleration. *Plasma Phys. Rep.*, 2011, Vol. 37, pp. 118, doi:10.1134/S1063780X1102005X.