

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В БЛИЖНЕМ ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕР ЗЕМЛИ И ЮПИТЕРА

**П.В. Сецко<sup>1</sup>, О.В. Мингалев<sup>1,2</sup>, А.В. Артемьев<sup>3,4</sup>, М.Н. Мельник<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия, setsko@pgia.ru

<sup>2</sup>Мурманский арктический государственный университет, Апатиты, Россия

<sup>3</sup>Институт космических исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия

<sup>4</sup>Калифорнийский университет, Лос-Анжелес, США

## SIMULATION OF THE THIN CURRENT SHEETS' PARAMETERS IN THE NEAR-EARTH'S AND NEAR-JUPITER'S MAGNETOTAIL

**P.V. Setsko<sup>1</sup>, O.V. Mingalev<sup>1,2</sup>, A.V. Artemyev<sup>3,4</sup>, M.N. Melnik<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia, setsko@pgia.ru

<sup>2</sup>Murmansk Arctic State University, Apatity, Russia

<sup>3</sup>Space Research Institute, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles, USA

**Аннотация.** В работе проводится анализ результатов моделирования тонких токовых слоев (ТТС) в ближнем хвосте магнитосфер Земли и Юпитера, конфигурации которых получены при помощи кинетической стационарной пространственно-одномерной модели ТТС с заданной нормальной компонентой магнитного поля. Показано, что по ширине ТТС и профилю тангенциальной компоненты магнитного поля представляется возможным оценить, какие ионы дают основной вклад в ТТС.

**Ключевые слова:** Токовые слои, численное моделирование, уравнения Власова, магнитосфера.

**Abstract.** The paper analyzes the results of the modeling thin current sheets (TCS) in the near magnetotail of Earth and Jupiter, the configurations of which are obtained using a kinetic stationary one-dimensional TCS model with a given normal magnetic component. It is shown that the CS width and the profile of the tangential component of the magnetic field make it possible to estimate which ions make the main contribution to CS.

**Keywords:** Current sheet, numerical simulation, Vlasov equations, magnetosphere.

### ВВЕДЕНИЕ

В ближнем хвосте магнитосфер Земли и Юпитера присутствуют токовые слои (ТС), в образование которых при определенных условиях значительный вклад могут вносить тяжелые ионы. Для ТС магнитосферы Земли это ионы  $O^+$ , которые во время цепочки суббурь «вытягиваются» из верхней ионосферы, а затем ускоряются и разогреваются в плазменном слое. Экспериментальные данные показывают, что характерные значения температуры ионов кислорода составляют  $T_O \sim 0.2\text{--}0.8$  кэВ, протонов  $T_p \sim 4\text{--}10$  кэВ и электронов  $T_e \sim 0.5\text{--}1$  кэВ [Vaisberg et al., 1996, Kistler et al., 2005, 2006, Kronberg et al., 2014, 2017]. Отсюда следует, что гирорадиусы ионов  $O^+$   $R_{cO}$  и протонов  $R_{cp}$  оказываются сравнимыми:

$$\begin{aligned} R_{cO}/R_{cp} &= \sqrt{(m_O T_O)/(m_p T_p)} \approx \\ &\approx 4\sqrt{T_O/T_p} \sim 0.4\text{--}2. \end{aligned} \quad (1)$$

Отношение продольной скорости встречных потоков  $V_{Da}$  на краях ТС к тепловой скорости  $V_{Ta}$  для обоих сортов ионов может изменяться в широких пределах:  $\delta_a = V_{Da}/V_{Ta} \approx 0.1\text{--}10$ .

Для ТС в магнитосфере Юпитера тяжелыми ионами выступают  $O^+$  и  $S^+$ , источником которых являются вулканические выбросы  $SO_2$  со спутника Ио. По сравнению с земными ионами кислорода на два порядка горячее,  $T_O \sim 20\text{--}40$  кэВ, а присутствующие лишь в магнитосфере Юпитера ионы серы имеют температуру  $T_S \sim 40\text{--}60$  кэВ [Artemyev et al., 2020]. Характерные значения температуры протонов и электронов составляют  $T_p \sim 5\text{--}20$  кэВ и  $T_e \approx 1$  кэВ. Для каждой

ионной компоненты параметр потока  $\delta_a$  ориентировочно лежит в пределах  $\delta_a = V_{Da}/V_{Ta} \approx 0.25\text{--}5$ .

На основании теоретического анализа и экспериментальных данных была получено соотношение (см., например, [Зеленый и др., 2011, 2020; Grigorenko et al., 2019, 2022]), связывающее полуширину тонкого токового слоя (ТТС)  $L_a$  на ионах сорта  $a$  с гирорадиусом в потоке этих ионов на краю слоя  $R_{ca}^\infty$ , которое удобно представить в виде

$$\begin{aligned} L_a &\sim 4R_{ca}^\infty, \quad R_{ca}^\infty = V_{Ta}/\omega_{ca}^\infty, \\ V_{Ta} &= (eT_a)/m_a, \quad \omega_{ca}^\infty = (q_a B_\infty)/m_a. \end{aligned} \quad (2)$$

Отсюда следует:

$$L_a/L_\beta \sim R_{ca}^\infty/R_{c\beta}^\infty = \sqrt{m_\alpha T_\alpha}/\sqrt{m_\beta T_\beta}. \quad (3)$$

В данной работе приводится анализ результатов моделирования ТС с вышеупомянутыми входными параметрами модели с целью выявления характерных масштабов ТС в различных возможных ситуациях. Это позволит лучше интерпретировать спутниковые данные измерений магнитного поля, в частности, по ширине и профилю ТС оценить параметры формирующих его потоков ионов.

Стоит отметить, что значения тангенциальной компоненты магнитного поля в ближнем хвосте этих двух планет сопоставимы:  $B_{n0} = 20$  нТл, а значения нормальной компоненты различаются:  $B_n = 2$  нТл для Земли и  $B_n = 1$  нТл для Юпитера.

### Результаты моделирования

Использовалась кинетическая численная модель стационарного ТТС с размерностью 1D3V и задан-

ной нормальной компонентой магнитного поля, которая детально описана в [Мингалев и др., 2022]. С ее помощью были получены стационарные конфигурации ТТС для ближнего хвоста магнитосферы Земли и магнитосферы Юпитера. В модели все функции зависят только от координаты  $z$  поперек ТС. В представленных расчетах магнитное поле имеет заданную постоянную нормальную компоненту  $B_z = const$  и одну самосогласованную компоненту  $B_x(z)$ , а плотность тока имеет одну самосогласованную компоненту  $j_y(z)$

$$\mathbf{B}(z) = B_x(z)\mathbf{e}_x + B_z\mathbf{e}_z, \quad \mathbf{j}(z) = j_y(z)\mathbf{e}_y. \quad (4)$$

На рис. 1. показаны профили стационарных симметричных конфигураций ТТС для ближнего хвоста магнитосферы Земли для вполне возможных входных параметров. На панели *a* приведены профили компоненты магнитного поля  $B_x(z)$ : пурпурным цветом обозначены профили ТТС, образованного потоками одних протонов с параметрами  $T_p=4$  кэВ и  $\delta_p = 0.5$ ; черным цветом — профили ТТС, образованного потоками одних ионов кислорода с параметрами  $T_O = 0.4$  кэВ и  $\delta_O = 5$ ; красным цветом — профили ТТС, образованного потоками протонов и ионов кислорода с вышеупомянутыми параметрами при условии равенства их концентраций на краях ТС. На панелях *б*, где приведены профили компоненты плотности тока  $j_y(z)$ , и *в*, где приведены профили концентрации  $n_\alpha(z)$ , синими и зелеными штрихпунк-

тирными линиями показаны соответственно вклады протонов и ионов кислорода в случае, когда ТТС образован смесью протонов и ионов кислорода. Из рис. 1 видно, что ТТС, образованный потоками ионов кислорода, примерно в 1.6 раза шире, чем ТТС, образованный потоками протонов. Это является следствием (1) и подтверждает оценку (3). Видно также, что в случае смеси при одинаковой концентрации на краях слоя основной вклад в плотность тока вносят тяжелые ионы кислорода [Мингалев, 2022].

На рис. 2 приведены профили стационарных симметричных конфигураций ТТС для ближнего хвоста магнитосферы Юпитера. Пурпурным цветом обозначены профили ТТС, образованного потоками протонов с температурой  $T_p=10$  кэВ; черным цветом — профили ТТС, образованного потоками ионов кислорода с температурой  $T_O=20$  кэВ; голубым цветом — профили ТТС, образованного потоками ионов серы с температурой  $T_S=40$ кэВ. Параметр  $\delta_\alpha$  для всех трех конфигураций выбирался одинаковым:  $\delta_p = \delta_O = \delta_S = 2$ . На рис. 2 видна сильная разномасштабность слоев в трех разных случаях и подтверждается оценка (3). Также из рис. 1 и 2 видно, что потоки более горячих ионов дают заданное изменение магнитного поля при переходе через слой при меньшей в разы концентрации по сравнению с протонами.

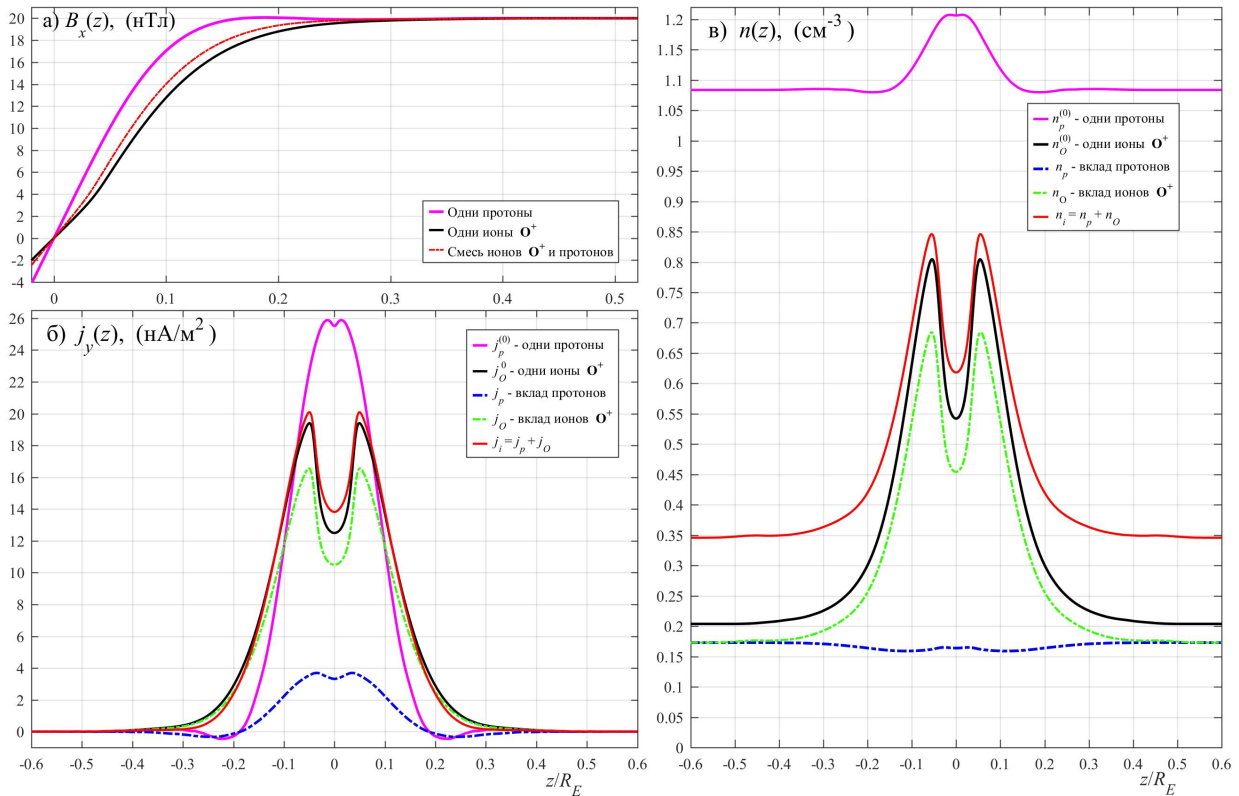


Рис. 1. Профили стационарных симметричных конфигураций ТТС для хвоста магнитосферы Земли: *a* — компонента магнитного поля  $B_x(z)$  в нТл; *б* — компонента плотности тока  $j_{\alpha y}(z)$  в нА/м<sup>2</sup>; *в* — концентрация  $n_\alpha(z)$  в см<sup>-3</sup>

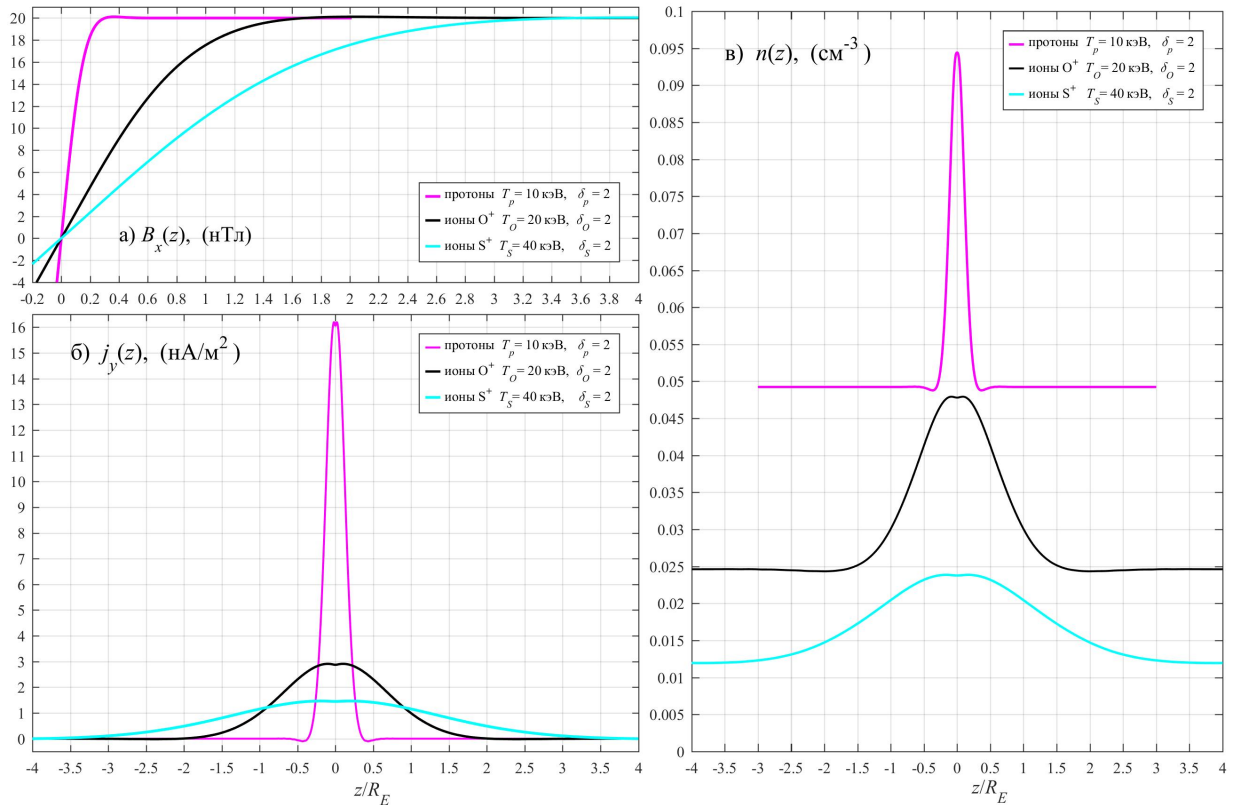


Рис. 2. Профили стационарных симметричных конфигураций ТТС для хвоста магнитосферы Юпитера: а — компонента магнитного поля  $B_x(z)$ , нТл; б — компонента плотности тока  $j_y(z)$ , нА/м<sup>2</sup>; в — концентрация  $n_\alpha(z)$ , см<sup>-3</sup>

### ВЫВОДЫ

Полученные результаты показали хорошее соответствие с данными измерений и теоретическими представлениями, а также подтвердили оценки (2) и (3). Параметры ТТС, образованных потоками одних протонов в ближнем хвосте как магнитосферы Земли, так и Юпитера, оказались сопоставимы. В ближнем хвосте магнитосферы Земли  $R_{CO} \sim R_{CP}$ , поэтому ТТС, образованный потоками холодных ионов  $O^+$ , оказался ненамного шире ТТС, образованного потоками протонов:  $L_O \approx 1.6L_p$ . В ближнем хвосте магнитосферы Юпитера температура ионов кислорода на порядок выше их температуры в ближнем хвосте магнитосферы Земли:  $T_{OJ} \gg T_{OE}$ , поэтому в практически одинаковом по величине магнитном поле их гирорадиусы значительно различаются:  $R_{COJ} \gg R_{COE}$ . Это объясняет различие в масштабах ТТС, образованного потоками ионов кислорода, на рис. 1 и 2. Также в ближнем хвосте магнитосферы Юпитера температура ионов серы в несколько раз выше температуры ионов кислорода и протонов, что объясняет их сильное различие в масштабах ТТС.

Таким образом, по ширине ТС и профилю тангенциальной компоненты  $B_x(z)$  представляется возможным оценивать, какие ионы дают основной вклад в ТС, а также оценивать их гирорадиус на краю ТС.

Работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зелёный Л.М., Малова Х.В., Артемьев А.В., Попов В.Ю., Петрукович А.А. *Физика плазмы*. 2011. Т. 37, № 2. С. 137–182.
- Зелёный Л.М., Попель С.И., Захаров А.В. *Физика плазмы*. 2020. Т. 46, № 5. С. 441–455.
- Мингалев О. В., Сецко П.В., Мельник М.Н. и др. *Физика плазмы*. 2022. Т. 48, № 3. С. 237–258.
- Artemyev A.V., Angelopoulos V., Runov A., Zhang X.-J. *J. Geophys. Res.* 2020. Vol. 125, iss. 7, e2019JA027612. DOI: 10.1029/2019JA027612.
- Dandouras I. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122, iss. 9. P. 9427–9439. DOI: 10.1002/2017ja024215.
- Grigorenko E.E., Zelenyi L.M., DiBraccio G., et al. Thin current sheets of sub-ion scales observed by MAVEN in the martian magnetotail. *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46, iss. 12. P. 6214–6222 DOI: 10.1029/2019GL082709.
- Grigorenko E.E., Zelenyi L.M., Shuvalov S.D., et al. *Astrophys. J.* 2022. Vol. 926, 160. DOI: 10.3847/1538-4357/ac4bd8.
- Kistler L.M., Mouikis C., Möbius E., et al. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, A06213. DOI: 10.1029/2004JA010653.
- Kistler L.M., Mouikis C.G., Cao X., et al. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A11222. DOI: 10.1029/2006JA011939.
- Kistler L.M., Kuzichev I.V., Liao J., et al. *Space Sci. Rev.* 2014. Vol. 184. P. 173–235. DOI: 10.1007/s11214-014-0104-0.
- Kronberg E.A., Ashour-Abdalla M., Dandouras I., et al. *Space Sci. Rev.* 2014. Vol. 184. P. 173–235. DOI: 10.1007/s11214-014-0104-0.
- Kronberg E.A., Welling D., Kistler L.M., et al. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122, iss. 9. P. 9427–9439. DOI: 10.1002/2017ja024215.
- Vaisberg O.L., Burch J.L., Waite Jr. J.H. *Adv. Space Res.* 1996. Vol. 18, iss. 8. P. 63–67. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00998-1