

Моделирование взаимодействия гелиосферного токового слоя с энергичными частицами солнечного ветра

В.Ю. Попов^{1,2,3,*} Х.В. Малова^{2,4†}

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра математики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2

²Институт Космических исследований РАН (ИКИ РАН)
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32

³Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет)
Россия, 125993, Москва, Ленинградский проспект, 49

⁴Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына, (НИИЯФ МГУ)
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.5

(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

Работа посвящена моделированию взаимодействия солнечных космических лучей (СКЛ) с гелиосферным токовым слоем (ГТС) в солнечном ветре (СВ). В предложенной кинетической самосоглазованной модели ГТС динамика ионов считается квазиadiaбатической, а ГТС рассматривается как равновесная вложенная токовая структура с низкоэнергичной фоновой плазмой СВ и высокоэнергичной плазмой СКЛ. В численном эксперименте показано, что ГТС является многомасштабной тонкой токовой структурой, вложенной в более широкий плазменный слой. При этом, в ГТС, как правило, присутствует сдвиговая (вдоль тока) компонента магнитного поля. Наличие высокоэнергичных частиц СКЛ в ГТС изменяет его структуру. Рассмотрены решения для разных температур СКЛ и концентраций высокоэнергичной плазмы при которых может наблюдаться заметное в спутниковых исследованиях утолщение ГТС.

PACS: 52.20.-j, 52.20.Dq, 94.30.cq, 94.30.cs, 52.65.-y, 11.40.-q

УДК: 533.95,533.9.01,51-73

Ключевые слова: солнечные космические лучи, солнечный ветер, гелиосферный токовый слой, динамика заряженных частиц, моделирование космической плазмы.

Межпланетные спутниковые исследования показали, что несмотря на то, пространственно–временные параметры плазмы солнечного ветра (СВ), в СВ могут существовать устойчивые квазистационарные магнитоплазменные образования [1–3]. Например, гелиосферный токовый слой (ГТС) — дискообразная структура толщиной порядка 10^4 км, опоясывающая Солнце и вложенная внутрь более широкого гелиосферного плазменного слоя, чья толщина составляет 2–2.5 R_{\odot} ($R_{\odot} \approx 7 \times 10^5$ км — радиус Солнца) [4]. Плотность тока в ГТС порядка 10^{-10} А/м². Слой очень стабилен, но его конфигурация может меняться от одного солнечного оборота к другому. Так, в годы солнечного минимума он находится примерно в экваториальной плоскости Солнца, в максимуме его форма и расположение могут быть разнообразными. На орбите Земли (т. е. на 1 а. е. $\approx 200 R_S$, R_S — расстояние от Земли до Солнца) ГТС обнаруживается на границе секторов с противоположным направлением межпланетного магнитного поля; в этой области плотность плазмы резко возрастает, а величина магнитного поля минимальна. Внутри плазменного слоя ГТС может располагаться произвольным образом относительно плоскости симметрии. Электрический ток гелиосферного слоя имеет круговое направление вблизи Солнца, на больших расстояниях

он течет по спирали, а далее разворачивается практически в радиальном направлении [1, 5]. По своему составу плазма СВ является многокомпонентной (кроме электронов и протонов в её состав входят $\sim 5\%$ альфа-частиц и небольшая доля тяжелых ионов), в результате этого следует ожидать, что ГТС имеет сложную внутреннюю структуру и состоит из нескольких вложенных друг в друга слоев, поддерживаемых разными плазменными компонентами [6–31].

Будем предполагать, что на границе слоя функция распределения ионов является суммой функций распределения двух популяций ионов с температурами T_{α} и тепловыми скоростями $V_{T\alpha}$ (здесь и далее будем использовать индекс $\alpha = 1, 2$, обозначающий номер популяции, причем $\alpha = 1$ соответствует более холодной, а $\alpha = 2$ — более горячей ионной популяции). На границах ТС функции $f_{\alpha}(v)$ выбраны в виде смещенных максвелловских распределений с потоковыми скоростями $v_{D\alpha}$, направленными практически вдоль магнитных силовых линий к слою и от слоя [13]:

$$f_{\alpha}(v) = \frac{n_{0\alpha}}{2(\sqrt{2\pi}v_{T\alpha})^3 \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{v_{D\alpha}}{v_{T\alpha}}\right)\right)} \times \sum_{s=1,2} \exp\left\{-\frac{(v_{\parallel} + (-1)^s v_{D\alpha})^2 + v_{\perp}^2}{2v_{T\alpha}^2}\right\}. \quad (1)$$

Здесь $n_{0\alpha}$ — плотность плазмы вне токового слоя, $v_{D\alpha}$ и $v_{T\alpha}$, соответственно, средняя потоковая и тепло-

*E-mail: masterlu@mail.ru

†E-mail: hmalova@yandex.ru

вая скорости популяции ионов с индексом $\alpha = 1, 2$, v_{\parallel} и v_{\perp} — проекции скоростей ионов вдоль и поперек магнитного поля. Индексы $s = 1, 2$ соответствуют входящим и выходящим ионным потокам на границах ГТС. Функция распределения (1) определена на интервале изменения адиабатических инвариантов протонов $I_z \leq v_0^2 m / \omega_0$ ($v_0 = \sqrt{v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2}$ — полная скорость, $\omega_0 = eB_0 / mc$ — частота вращения ионов в поле B_0 на краях токового слоя).

Можно записать функцию распределения в виде функции только интегралов движения и, используя теорему Лиувилля, расширить область применимости функций на весь слой. При этом используется связь между магнитным моментом заряженной частицы $\mu = mv_{\perp}^2 / (2B_0)$, квазиадиабатическим инвариантом I_z движения $I_z = (2mc/e)\mu$ вдали от токового слоя, тогда функция распределения может быть представлена в виде функции, зависящей от двух интегралов движения: полной энергии $W = mv^2/2 + e\Phi(z)$ (Φ — электростатический потенциал, v — скорость частицы) и квазиадиабатического инварианта движения I_z :

$$f_{\alpha}(z, v) = \frac{n_{0\alpha}}{(\sqrt{2\pi} v_{T\alpha})^3 (1 + \operatorname{erf}(\varepsilon_{\alpha}^{-1}))} \times \exp \left\{ - \frac{\left(\sqrt{v^2 - \frac{\omega_0}{m} I_z + \frac{2e}{m} \Phi} - v_{D\alpha}^2 \right) + \frac{\omega_0}{m} I_z}{2v_{T\alpha}^2} \right\}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\alpha} = v_{T\alpha} / v_{D\alpha}$ — потоковый параметр. Квазиадиабатический инвариант движения ионов I_z выражается соотношением [44]:

$$I_z(z, v) = \frac{m}{\pi} \int_{z_0}^{z_1} \left(v_y^2 + v_z^2 + \frac{2e}{m} (\Phi(z) - \Phi(z')) - \left(v_y + \frac{e}{mc} \left[\int_{z'}^z B(z'') dz'' \right] \right)^2 \right)^{1/2} dz', \quad (3)$$

где верхний и нижний пределы определяются из условия обращения в 0 подинтегральной функции. Окончательно, система «ионных» уравнений Власова–Максвелла принимает следующий вид:

$$f_{\alpha}(z, \mathbf{v}) = F_{\alpha}(W(z, \mathbf{v}), I_z(z, \mathbf{v})),$$

$$v_z \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial z} + \frac{e}{m_p} \left(-\nabla \Phi(z) + \frac{1}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \right) \cdot \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \mathbf{v}} = 0, \quad \alpha = 1, 2$$

$$\frac{dB_x}{dz} = \frac{4\pi}{c} \left\{ \int_{\mathbb{R}^3} v_y f_1(z, \mathbf{v}) d^3 \mathbf{v} + \int_{\mathbb{R}^3} v_y f_2(z, v) d^3 v + j_{ey}(z) \right\}, \quad (4)$$

$$B_x(z) |_{z \rightarrow \pm \infty} = B_0, \quad \Phi(z) |_{z \rightarrow \pm \infty} = \Phi_0,$$

$$n_1(z) + n_2(z) + n_e(z) = n(z), \quad n(z) |_{z \rightarrow \pm \infty} = n_0.$$

Уравнения движения электронов имеют вид [31]:

$$m_e \frac{dv_{e\parallel}}{dt} = -eE_{\parallel} - \frac{\nabla_{\parallel} p_{e\parallel}}{n_e} + \frac{1}{n_e} (p_{e\parallel} - p_{e\perp}) \nabla_{\parallel} (\ln B) \quad (5)$$

$$j_{e\perp} = -en_e c \frac{[\mathbf{E} \times \mathbf{b}]}{B} + \frac{c}{B} [b \times \nabla_{\perp} p_{e\perp}] + \frac{c}{B} (p_{e\parallel} - p_{e\perp}) [b \times (b, \nabla) b]. \quad (6)$$

Система уравнений (4), дополненная уравнениями для движения электронов (5), (6), являются основой самосогласованной модели ГТС.

Система уравнений (4)–(6) была решена численно, методом итераций найдены самосогласованные решения для разных параметров модели. Рис. 1 показывает, какие плазменные компоненты участвуют в поддержке токового слоя и их относительный вклад. На рисунке представлены самосогласованные профили (а) плотности тока и плазмы в зависимости от поперечной к слою координаты z , а также (б) магнитного поля в гелиосферном токовом слое без учета горячей компоненты СКЛ, при следующих значениях параметров: $B_z/B_0 = 0.1$; $\varepsilon_1 = 0.3$; $p_{e\parallel}/p_{e\perp} = 1.1$; $T_{e\perp, \parallel}/T_{i1} = 5$. Как видно из рис. 1а, ГТС состоит из двух вложенных токовых слоев (внутреннего, толщиной менее теплового радиуса и внешнего, толщиной порядка 4-х гирорадиусов), вложенных в гораздо более широкий плазменный слой. Как было показано в более ранних работах ([33] и ссылки там же), внутренний, самый тонкий токовый слой, поддерживается дрейфовыми электронными токами, а его толщина оценивается как $L_e \approx \rho_0 (B_z/B_0)^{4/3}$ [31]. Внешний, более широкий токовый слой, образуется за счет квазиадиабатических протонов, которые размагничиваются в нейтральной области и совершают перемещение в Y направлении, и, таким образом, переносят ток. Толщина поддерживаемого ионами токового слоя была оценена как $L \approx \rho_0 (v_T/v_D)^{1/3}$ [45], а затем уточнена для широкого диапазона параметров токового слоя [31] (в частности, при $v_T/v_D \leq 1$ толщина $L \approx \rho_T$). Весь токовый слой, в свою очередь вложен внутрь намного более толстого

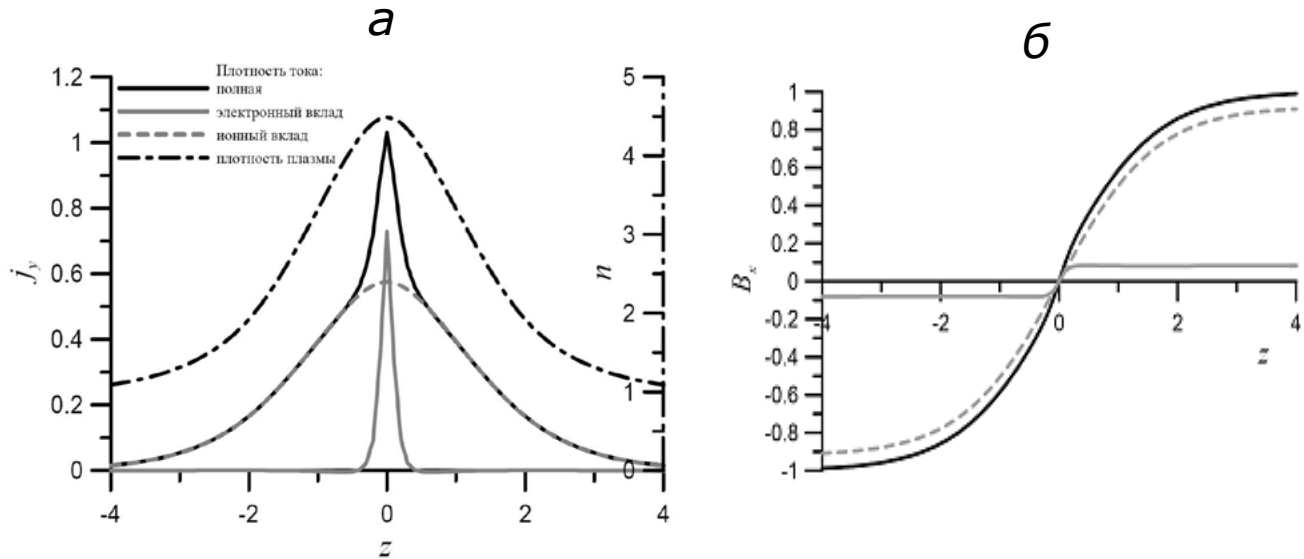


Рис. 1: Вклад протонов и электронов в распределение *a* — плотностей тока и плазмы и *б* — магнитного поля в ГТС. На рис. *б* показана структура тангенциального магнитного поля: полные профили плотности тока и магнитного поля показаны толстой черной линией; светло-серые профили соответствуют вкладу электронной компоненты, серая пунктирная линия соответствует ионному вкладу, штрих-пунктирная линия обозначает плотность плазмы

плазменного слоя, чьи границы в модели «отодвинуты» на бесконечность, т. е. плотность плазмы выходит на константу на краях). На рис. 1*а,б* показаны вклады отдельных плазменных популяций в полную плотность тока и магнитное поле. Плотность тока в токовом слое с доминирующими электронами показана сплошной серой линией, а плотность тока квазиadiaбатических ионов — прерывистой серой линией. Те же обозначения использованы для соответствующих магнитных полей. Из рис. 1*а,б* видно, что для данной токовой конфигурации электронный вклад много меньше ионного и вклад в полное магнитное поле составляет не более 10% от величины на краях ГТС. Сравнение электронных вкладов для рассматриваемых здесь и ниже диапазонов изменения параметров задачи показывает, что электронный вклад в полный ток меньше ионного, что согласуется с результатами наблюдений и независимых исследований [13].

Построенная нами квазиadiaбатическая модель дает хорошее качественное совпадение с наблюдаемыми экспериментальными закономерностями. В частности, модель воспроизводит малую ширину ГТС по сравнению с окружающим плазменным слоем, что также

можно видеть на рис.1*а*, свойство вложенности токовых слоев с доминированием различных плазменных компонент — электронной и ионной, скачок плотности плазмы внутри токового слоя. Можно утверждать, что квазиadiaбатическая модель, в отличие от имеющихся на сегодняшний день МГД-моделей, согласуется с имеющимися экспериментальными закономерностями, по крайней мере, на качественном уровне и, таким образом, может быть применена для описания ГТС.

Поскольку модель ГТС, основанная на квазиadiaбатической динамике протонов, предлагается впервые, мы провели ее проверку путем сравнения полученных результатов с результатами взаимодополняющей численной модели, выполненной методом трассирования заряженных частиц в заданном магнитном поле. Схожесть результатов, полученных на основании различных подходов к моделированию ГТС, а также сопоставление с имеющимися экспериментальными закономерностями могут свидетельствовать об адекватности используемой модели для описания структуры ГТС.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда 14-12-00824.

- [1] Georgieva K. The Environments of the Sun and the Stars. Notes in Physics. **857**. (Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, 2013).
- [2] Базилевская Г. А., Стожков Ю. И. Плазменная геофизика. (М.: Физматлит, 2008).
- [3] Мирошниченко Л. И. Физика Солнца и солнечно-земных связей. (М.: Университетская книга, 2011).

- [4] Roberts DA., Keiter PA., Goldstein ML. J. Geophys. Res. **110**. P. A06102. (2005).
- [5] Коваленко В. А. Солнечный ветер. (М.: Наука, 1983).
- [6] Yermolaev Yu. I., Stupin V. V. J. Geophys. Res. **102**. P. 2125. (1997).
- [7] Иванов К. Г. Геомагн. Аэрон. **С36**. С. 19. (1996).
- [8] Liu Y. C.-M., Huang J., Wang C., Klecker B., Galvin A. B.,

- Simunac K. D. C., Popecki M. A., Kistler L., Farrugia C., Lee M. A., Kucharek H., Opitz A., Luhmann J. G., Jian Lan J.* Geophys. Res. **119**. P. 8721. (2014).
- [9] *Parker E. N.* Astrophys. J. **128**. P. 664. (1958).
- [10] *Israelevich P. L., Gombosi T. I., Ershkovich A. I., Hansen K. C., Groth C. P. T., DeZeeuw D. L., Powell K. G.* Astronomy and Astrophysics. **376**. P. 288. (2001).
- [11] *Gershman D. J., Zurbuchen T. H., Fisk L. A., Gilbert J. A., Raines J. M., Anderson B. J., Smith C. W., Korth H., Solomon S. C.* J. Geophys. Res. **117**. P. A00M02. (2012).
- [12] *Safrankova J., Nemecek Z., Prech L., Zastenker G., Cermak I., Chesalin L., Komarek A., Vaverka J., Beranek M., Pavlu J., Gavriloava E., Karimov B., Leibov A.* Space Science Reviews. **175**. P. 165. (2013).
- [13] *Zelenyi L. M., Malova H. V., Popov V. Yu., Delcourt D. C., Ganushkina N. Yu., Sharma A. S.* Geophys. Res. Lett. **33**. L05105. (2006).
- [14] *Petrukovich A. A., Artemyev A. V., Malova H. V., Nakamura R., Popov V. Yu., Zelenyi L. M.* J. Geophys. Res. **116**. P. A00I25. (2011).
- [15] *Бережко Е. Г., Крымский Г. Ф.* УФН. **154**. С. 49. (1988).
- [16] *Бережко Е. Г., Елиин В. К., Крымский Г. Ф., Петухов С. И.* Генерация космических лучей ударными волнами. АН СССР Сиб.отд., Институт космофизических исследований и аэронауки: (Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1988).
- [17] *Lee L. C., Wu B. H.* Astrophys. J. **535**. P. 1014. (2000).
- [18] *Gloeckler G., Jokipii J. R.* Phys. Rev. Lett. **17**. P. 203. (1966).
- [19] *Дорман Л. И.* Вариации космических лучей и исследование космоса. (М.: Изд. АН СССР, 1963).
- [20] *Bazilevskaya G. A., Cliver E. W., Kovaltsov G. A., Ling A. G., Shea M. A., Smart D. F., Usoskin I. G.* Space Science Reviews. **186**. P. 409. (2014).
- [21] *Thomas S. R., Owens M. J., Lockwood M., Barnard L., Scott C. J.* Astrophys. J. **801**. P. 8. (2015).
- [22] *Schwadron N. A.* Geophys. Res. Lett. **29**. P. 8-1. (2012).
- [23] *Schatten K. H.* Current sheet magnetic model for the solar corona, in Solar Wind. *Ed. by Charles P. Sonett, Paul J. Coleman, and John M. Wilcox*, (Washington, Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, 1972). P. 44.
- [24] *Echim M. M., Lemaire J., Lie-Svendsen O.* Surv. Geophys. **32**. P. 1. (2011).
- [25] *Mikić Z., Linker J. A., Schnack D. D., Lionel R., Tarditi A.* Phys. Plas. **6**. P. 2217. (1999).
- [26] *Riley P., Linker J. A., Mikić Z. J.* Geophys. Res. **106**. P. 15889. (2001).
- [27] *Hoeksema J. T.* Space Science Reviews. **72**. P. 137. (1995).
- [28] *Smith E. J.* J. Geophys. Res. **106**. P. 15819. (2001).
- [29] *Вьхнер J., Zelenyi L. M.* J. Geophys. Res. **94**, P. 11821. (1989).
- [30] *Chen J., Palmadesso P. J.* J. Geophys. Res. **91**. P. 1499. (1986).
- [31] *Zelenyi L. M., Malova H. V., Popov V. Yu., Delcourt D., Sharma A. S.* Nonlinear Processes in Geophysics. **11**. P. 579. (2004).
- [32] *Cityplace Delcourt D. C., H. V. Malova H. V., Zelenyi L. M.* J. Geophys. Res. **109**. P. A01222. (2004).
- [33] *Zelenyi L. M., Malova Kh. V., Artemyev A. V., Popov V. Yu., Petrukovich A. A.* Plasma Physics Reports. **37**. P. 118. (2011).
- [34] *Нейштадт А. И.* Прикл. Мат. Мех. **51**. С51. С. 750.
- [35] *Kaiser M. L., Kucera T. A., Davila J. M., St. Cyr O. C., Guhathakurta M., Christian E.* Space Sci. Rev. **136**. P. 5. (2008).
- [36] *Acuña M. H., Curtis D., Scheifele J. L., Russell C. T., Schroeder P., Szabo A., Luhmann J. G.* Space Sci. Rev. **136**. P. 203. (2008).
- [37] *McComas D. J., Gosling J. T., Phillips J. L., Bame S. J., Luhmann, J. G., Smith E. J.* J. Geophys. Res. **94**. P. 6907. (1989).
- [38] *Foullon C., Lavraud B., Luhmann J. G., Farrugia C. J., Retino A., Simunac K. D. C., Wardle N. C., Galvin A. B., Kucharek H., Owen C. J., Popecki M., Opitz A., Sauvaud J.-A.* Astrophys. J. **1**. P. 737. (2011).
- [39] *Cityplace Anderson B. R., Skoug R. M., Steinberg J. T., McComas D. J.* J. Geophys. Res. **117**. P. A04107. (2012).
- [40] *Sonnerup B. U. Ц. Scheible M.* Minimum and Maximum Variance Analysis in Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data, *ed. by G. Paschmann and P. W. Daly* (ISSI, ESA Publication Division, Noordwijk, 1998). P. 185.
- [41] *Kislov R. A., Khabarova O., Malova H. V.* J. Geophys. Res. **120**. (2015). DOI: 10.1002/2015JA021294.
- [42] *Khabarova O. V.* Astron. Rep. **57**. P. 844. (2013).
- [43] *Mingalev O. V., Mingalev I. V., Malova Kh. V., Zelenyi L. M.* Plasma Physics Reports. **33**. P. 942. (2007).
- [44] *Malova H., Popov V. Yu., Mingalev O. V., Mingalev I. V., Melnik M. N., Artemyev A. V., Petrukovich A. A., Delcourt D. C., Shen C., Zelenyi L. M.* J. Geophys. Res. **117**. P. A04212. (2012).
- [45] *Francfort P., Pellat R.* Geophys. Res. Lett. **3**, N 8. P. 433.

Modeling the interaction of the heliospheric current sheet with energetic particles of the solar wind

V. Yu. Popov^{1,2,3,a}, H. V. Malova^{2,4,b}

¹Department of mathematics, Faculty of Physics,

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University Moscow, 119991, Russia

³Space Research Institute (IKI RAS), Moscow, 117997, Russia

⁴Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow 125993, Russia

E-mail: ^amasterlu@mail.ru, ^bhmalova@yandex.ru

The work is devoted to modeling the interaction of solar cosmic rays (SCR) with the heliospheric current sheet (GTS) in the solar wind (SW). The proposed kinetic self-consistent model GTS dynamics of ions is considered quasi-adiabatic, and GTS is

considered as the equilibrium current nested structure with low-energy background plasma SW and the high-energy plasma SCR. The numerical experiment shows that the GTS is the current structure of the multi-thin embedded in a wider plasma layer. Thus, in the GTS typically present shear (along the flow) of the magnetic field component. The presence of high-energy particles in cosmic rays SCR changes GTS structure. The solutions for different temperatures of SCR and the high-energy plasma concentrations at which there may be significant in satellite studies thickening GTS.

PACS: 52.20.-j, 52.20.Dq, 94.30.cq, 94.30.cs, 52.65.-y, 11.40.-q

Keywords: solar cosmic rays, solar wind, heliospheric current sheet, dynamics of charged particles, modeling of space plasma.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторах

1. Малова Хельми Витальевна — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник НИИЯФ МГУ, вед. науч. сотрудник ИКИ РАН; тел.: (495) 333-25-00, e-mail: hmalova@yandex.ru.
2. Попов Виктор Юрьевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры математики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова; тел.: (903) 515-50-99, e-mail: masterlu@mail.ru.