

УДК 533.932

## ЗАРЯД НА МАГНИТОПАУЗЕ И ПЕРЕДАЧА ИМПУЛЬСА И ЭНЕРГИИ ВНУТРЬ МАГНИТОСФЕРЫ

С. П. Савин<sup>1</sup>, В. В. Ляхов<sup>2</sup>, В. М. Нецадим<sup>2</sup>, [Е. Амата<sup>3</sup>], Ж.-Л. Рош<sup>4</sup>,  
В. П. Силин<sup>6</sup>, В. Ю. Попов<sup>7,1,9</sup>, В. П. Будаев<sup>8,1</sup>, С. И. Климов<sup>1</sup>,  
А. А. Скальский<sup>1</sup>, Л. А. Лежен<sup>1</sup>, Я. Бленцки<sup>5</sup>

*Сравниваются теория заряженных границ с плазменными данными спутников Прогноз-8, Интербол-1, Полар и Кластер. Показана возможность передачи импульса и энергии внутрь магнитосферы, независимо от пересоединения магнитных силовых линий, как специфичный динамоэффект. Это связывает статистические свойства турбулентных погранслоев с характером переноса через тонкую границу.*

**Ключевые слова:** заряженные токовые слои, передача энергии и импульса, плазменная турбулентность и пограничные слои, аномальный перенос.

*Введение и описание модели.* Работа посвящена сравнению теории заряженной магнитопаузы с экспериментальными данными проектов ПРОГНОЗ-8, ИНТЕРБОЛ-1 ПОЛАР и КЛАСТЕР. Учет заряда на магнитопаузе открывает новые возможности объяснения передачи импульса и энергии через магнитопаузу (МП), независимо от присутствия пересоединения магнитных силовых линий. В [1] предложена стационарная модель магнитопаузы для уравнений Власова–Максвелла, причем присутствует электрическое поле, нормальное к магнитопаузе. В [2] дан обзор равновесных состояний в

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, 117342 Россия, Москва, Профсоюзная ул., 84/32; e-mail: ssavin@iki.rssi.ru.

<sup>2</sup> SLLP “Institute of Ionosphere”. “NTsKIT”, NSA RK.

<sup>3</sup> INAF, Istituto Astrofisica e Planetologia Spaziali, Italy.

<sup>4</sup> Laboratory Phys. & Chemistry Environment, Orleans, France.

<sup>5</sup> СВК, Warsaw, Poland.

<sup>6</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

<sup>7</sup> Физический факультет МГУ им. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, ул. Ленинские Горы, 1, с. 2.

<sup>8</sup> НИЦ “Курчатовский Институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

<sup>9</sup> Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, 101000 Россия, Москва, Мясницкая ул., 20.

космической плазме. Работа [3] показывает данные виртуального спутника с использованием данных магнитогидродинамического (МГД) моделирования МП (см. обсуждение рис. 4). Однако поляризация пограничных слоев и влияние соответствующих электрических полей остается актуальной задачей для плазменных границ (МП и пристеночных областей термоядерных установок, см. [1, 4–6]). Поверхностный заряд (естественное следствие уравнений Максвелла на границах движущихся плазм) приводит к следующему: противоположно направленные электрические поля на квазиплоских границах, вызванные этим зарядом, ведут к дрейфу плазмы внутри магнитосферы за счет части кинетической энергии потоков снаружи МП. В [3] данные виртуального спутника демонстрируют эффекты заряда без усиления поля у МП (см. обсуждение рис. 4 далее). Мы используем методы, разработанные в [7, 8] и соответствующих ссылках, для моделирования тангенциального разрыва между движущимися плазмами в геометрии вставки на рис. 1. Исследуемая среда описывается уравнением Власова. Нами выбраны функции распределения в следующем виде:

$$f_{0\alpha}(W_\alpha, P_{y\alpha}) = \left(\frac{m_\alpha}{2\pi\theta}\right)^{3/2} n_0 \exp\left(-\frac{W_\alpha}{\theta}\right), \text{ при } P_{y\alpha}, \text{ лежащем в области } (-\infty, 0), \quad (1)$$

$$f_{0\alpha}(W_\alpha, P_{y\alpha}) = C_\alpha \left(\frac{m_\alpha}{2\pi\theta}\right)^{3/2} n_0 \exp\left(-\frac{W_\alpha}{\theta}\right), \text{ при } P_{y\alpha}, \text{ лежащем в области } (0, +\infty),$$

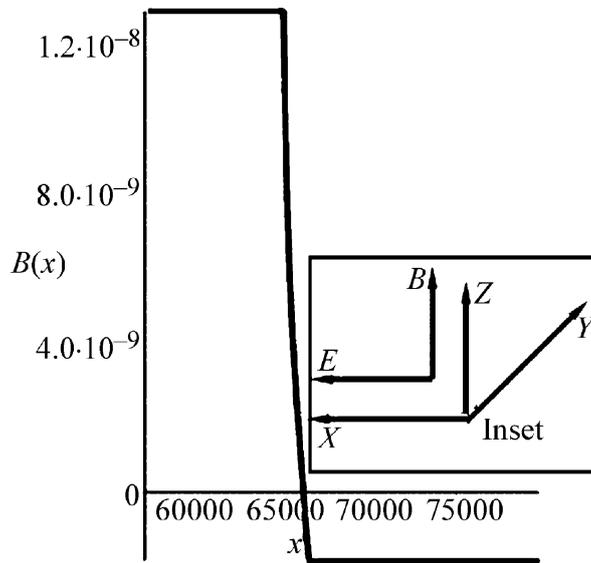


Рис. 1: Модельное магнитное поле ( $[T]/[m]$ , магнитосфера слева. Вставка: система координат, связанная с магнитопаузой.

где  $P_{y\alpha}$  – импульс компоненты  $\alpha$  в направлении  $y$ ,  $W_\alpha$  – ее энергия,  $\theta$  – температура в энергетических единицах. Такой выбор дает достаточно простую модель, описывающую тангенциальный разрыв, т.е. переход плазмы от одного состояния к другому. Параметр модели – коэффициент  $C_\alpha$  определяет фактически степень анизотропии потока каждой из компонент плазмы относительно направления  $Y$  (горизонтально вдоль низкоширотной МП). Скорость плазмы – вдоль оси  $Y$ . Ось  $X$  – направлена на Солнце,  $Z$  – к северному полюсу (рис. 1).

На основе функции распределения (1) можно описать структуру равновесной МП. Рассмотрен случай с отрицательным направлением северо-южной компоненты межпланетного магнитного поля (ММП)  $B_z < 0$ . ММП направлено противоположно земному магнитному полю на низких широтах. МП в этом случае можно моделировать тангенциальным разрывом со скачком магнитных полей противоположных направлений. Самосогласованное решение вблизи токового слоя ищется в приближении квазинейтральности, т.е. разложением в ряд по малому параметру  $\frac{\epsilon_0\mu_0\theta}{m_-}$ . Исследован первый член ряда.

*Результаты модельных расчетов.* Расчеты проведены в пакете MAPLE для следующих параметров:  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m;  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6}$  G/m;

$\mu = \mu_+ = 0.00055$ ;  $\mu_- = 1$ ;  $m_- = 9.1 \cdot 10^{-31}$  kg;  $m_+ = 1836 \cdot 9.1 \cdot 10^{-31}$  kg;  $e_- = -1.6 \cdot 10^{-19}$  Q;

$$e_+ = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Q}; \theta_- = \theta_+ = \theta = 1.6 \cdot 10^{-18} \text{ J}; n_0 = 16 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}.$$

Параметр  $\frac{\epsilon_0\mu_0\theta}{m_-} = 1.9 \cdot 10^{-5}$  – реально мал.

На рис. 1, 2 – магнитосфера слева от нулевых точек электромагнитного поля, плазма дрейфует вдоль оси  $Y$  со скоростью  $\vec{V}_{dr} = \frac{[\vec{E}, \vec{B}]}{B^2}$ .

Решение получено в системе отсчета  $K'$ , движущейся с плазмой. Для  $\frac{V_y}{c} \ll 1$  это решение пересчитано в систему МП ( $\sim$  систему спутника)  $E_z(x) = \frac{c}{E'_x(x)} + V_y B'_z(x)$ ;  $B_z(x) = B'_z(x) + \frac{V_y}{c^2} E'_x(x)$ .

На рис. 2((b), (c)) приведены данные для утренней и вечерней МП с  $V_y = +/- 200000$  м/с в магнитослое (МГС), соответственно. Только те частицы плазмы участвуют в дрейфовом движении, которые удовлетворяют адиабатическим условиям,  $R_i(x) \frac{dB(x)}{dx} \ll B(x)$ , где  $R_i(x) = \frac{m_i v_i}{e_i B(x)}$  – гирорадиус,  $v_i = \sqrt{\frac{2\theta_i}{m_i}}$  – тепловая скорость. Около МП электрическое поле вызывает дрейф вдоль нее. Решения (2а) получены для подсолнечной точки. Магнитное поле дано на рис. 1. Слой МП заряжен отрицательно, а электрические поля с обеих сторон направлены внутрь МП. Дальше от МП на обеих

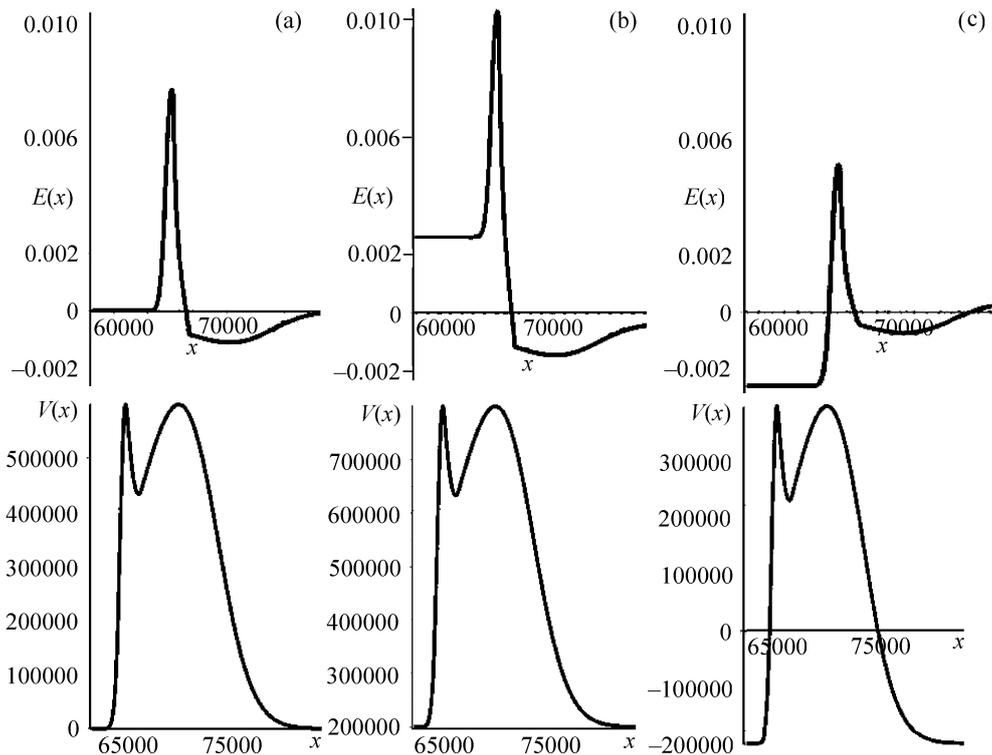


Рис. 2: (a) Полуденные электрические поля (вверху,  $[V/m]/[M]$ ); дрейфовая скорость,  $[m/s]/[M]$ ; (b) Утро, электрические поля (вверху,  $[V/m]/[M]$ ); дрейфовая скорость,  $[m/s]/[M]$ ; (c) Вечер, электрические поля (вверху,  $[V/m]/[M]$ ); дрейфовая скорость,  $[m/s]/[M]$ .

её сторонах располагается положительный заряд, компенсируя заряд в центре, так что электрическое поле вдали от МП падает до нуля. Для утренней МП (рис. 2(b)) как ее центральная часть, так и она в целом заряжены отрицательно, а электрические поля с обеих сторон направлены внутрь МП. Тангенциальное движение плазмы в магнитослое (МГС) сопровождается движением плазмы такого же направления в прилегающих слоях магнитосферы. Для вечерней МП (рис. 2(c)) центральный ее слой также заряжен отрицательно, но интегральный заряд слоя оказывается положительным, электрические поля с обеих сторон вдалеке от точки инверсии направлены от МП. Тангенциальное движение плазмы в МГС сопровождается движением плазмы такого же направления в магнитосфере в далеких областях от центрального слоя. В центральном слое плазма дрейфует в противоположном направлении.

*Сравнение модели и эксперимента.* На рис. 3 даны первые измерения электрического заряда на МП на ПРОГНОЗЕ-8 18/01.1981 [9]. С разных сторон МП видны проти-

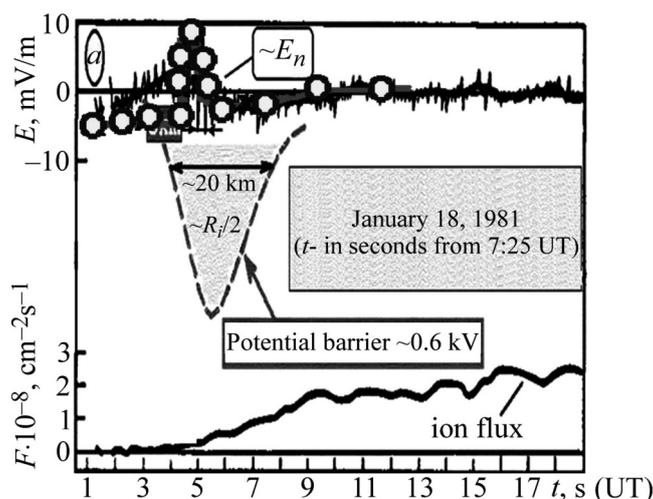


Рис. 3: Нормальное электрическое поле  $E_n$  (толстая линия – усреднение) и ионный поток  $F$  с Прогноза-8 для выхода из МП (вечер). Кривая с кружками – с рис. 2(b).

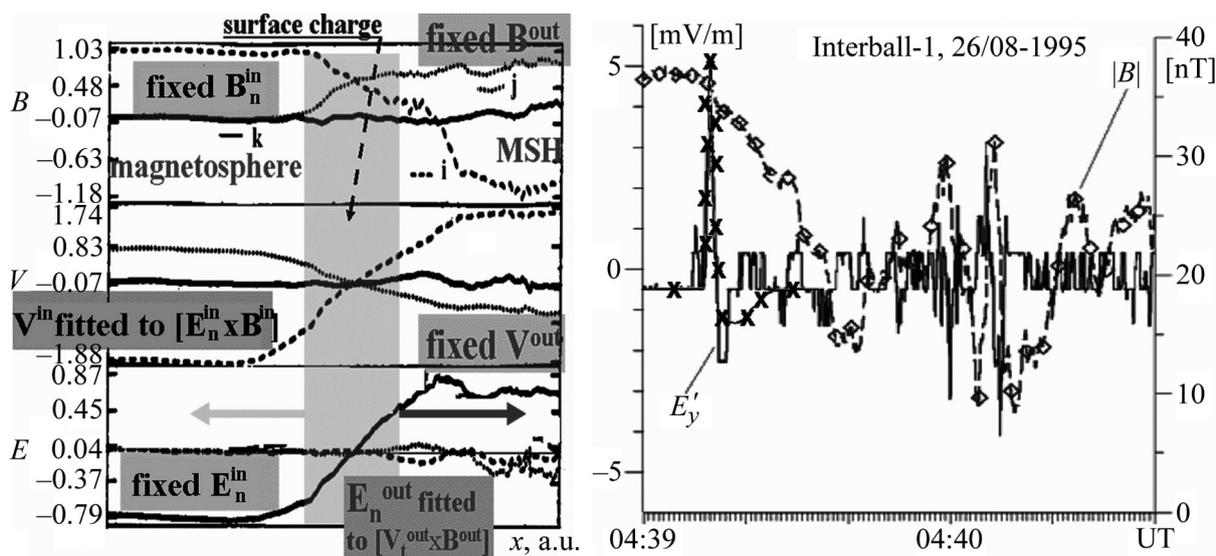


Рис. 4: (Слева) МГД-моделирование из [3]. Сверху: магнитное поле ( $k$  – направление минимума вариаций,  $i$  – максимума,  $j$  – промежуточных, соответствуют  $X, Y, Z$  GSM), скорость и электрическое поле (ср. рис. 2). (Справа) INTERBALL-1 выход из магнитосферы в августе 26, 1995 (GSM координаты  $(-2.4; -7.6; 14) R_E$ ). Сплошная – электрическое поле в системе спутника, пунктир с квадратами – модуль магнитного поля (шкала справа) и модельное поле с рис. 2(a), крестики.

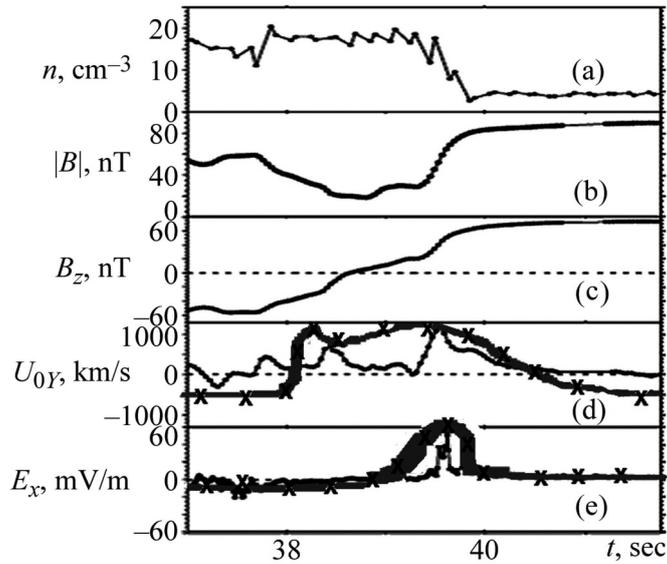


Рис. 5: ПОЛАР, March 16, 2003. (a) плотность плазмы, ((b)-(c)) магнитное поле, (d) скорость, (e) электрическое поле ( $Y_{\text{GSM}} = 0.2R_E$ ,  $Z_{\text{GSM}} = 2R_E$ ), кривые с крестиками – с рис. 2(b). 16 марта 2003 г., 12 – 08 UT.

воположные электрические поля ( $\sim \pm 5$  мВ/м), подразумевающие скачок потенциала  $\sim 0.6$  кВ, что согласуется с прямым ускорением в электрическом поле ионов с гиро-радиусом ( $R_i$ ), сравнимым с толщиной МП (см. среднюю и нижнюю части и [5, 9]). Профиль поля близок к рис. 2(c) (см. кривую с кружками), хотя всплески электрического поля множественны, что может быть объяснено нижнегибридными волнами [9]. Рис. 3 качественно согласуется с рис. 2. На рис. 4 мы представляем соответствующий пример со спутника ИНТЕРБОЛ-1 (справа) вместе с данными с виртуального спутника из МГД модели [3] (левая часть). Магнитное поле ( $i$ -компонента, верхняя панель) меняет знак (ср. рис. 1), как и продольная скорость (средняя панель) и перпендикулярное электрическое поле (нижняя панель,  $k$ -компонента). Авторы [3] интерпретировали внешний турбулентный погранслои (ТПС) справа от МП как следствие неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, хотя усиление потока вблизи МП не было предсказано. В [3] скорость и магнитное поле в магнитослое заданы условиями во внешнем обтекающем потоке (fixed  $V^{\text{out}}$  and  $B^{\text{out}}$ ), что приводит к генерации “ $[V^{\text{out}} \times B^{\text{out}}]$ ” – это подстраиваемое под внешний поток внешнее электрическое поле. Внутри же МП происходит соответственное ускорение внутренней плазмы за счет нормального к МП электрического поля, и в конечном счете за счет кинетической энергии потока в МГС. Подобный динамомеханизм впервые обсуждался в [10]. На рис. 4 (правая панель) показаны данные

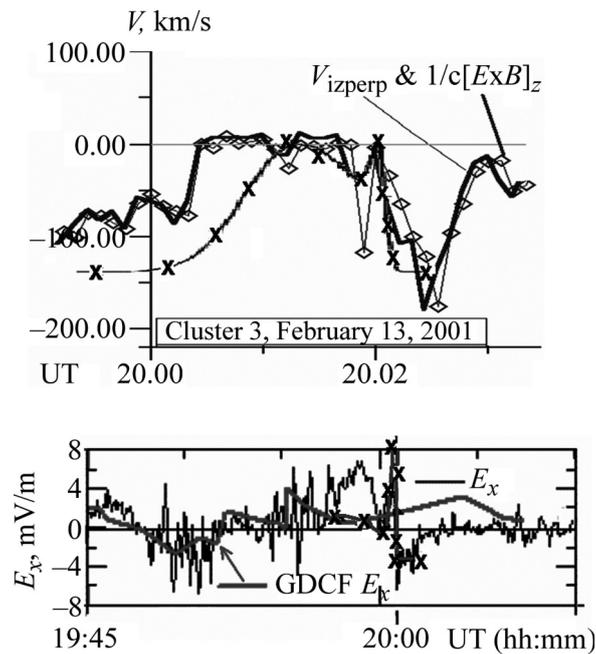


Рис. 6: Вход в МП CLUSTER-3 ~ 20:02 UT 13/02.2001. Вверху: дрейфовая скорость  $V_z$  (квадраты) и перпендикулярная магнитному полю  $Z$ -компонента скорости ионов (толстая линия). Крестиками показана скорость с рис. 2(с), произвольно масштабированная у МП. Внизу:  $X$ -компонента электрического поля, толстая линия – модель GDCF [5], крестики – поле с рис. 2(с) с произвольным коэффициентом.

ИНТЕРБОЛА-1, электрическое и магнитное (квадраты) поля. Выход из магнитосферы виден по падению магнитного поля в 04:39:20 UT, где также видны противоположные электрические поля (см. также крестами обозначенный контур с рис. 2(а)). Вблизи 04:40 UT видны также всплески противоположных электрических полей на токовых слоях (всплесках магнитного поля [3, 5]) в турбулентном погранслое (ТПС). На рис. 5 представлены данные спутника ПОЛАР, магнитная компонента  $B_z$  (и полное поле  $|\mathbf{B}|$ ), электрическое поле  $E_x$  и дрейфовая компонента скорости плазмы  $U_y$  у МП [11]. ПОЛАР вошел внутрь МП, где зафиксированы всплески потока плазмы и электрического поля, близкие к предсказаниям (см. рис. 2(б), данные с которого представлены крестиками). Так модель предсказывает наблюдаемые смены знака  $B_z$ , рост положительного потока плазмы у МП и электрического поля. На рис. 6 мы приводим данные пересечения МП 4 спутниками КЛАСТЕР [5]. Т.к. основная часть потока – вдоль доминирующего магнитного поля, параллельного оси  $Z$ , магнитное поле вращается на МП только на  $90^\circ$  и основной ток на МП переносится за счет эффекта Холла [5]. Для нас

достаточно удивительно, что на нижней панели рис. 6 предсказания с рис. 2(с) (кривая с крестами) неплохо воспроизводят профиль электрического поля. Дрейф ионов на верхней панели (ромбы) хорошо соответствует измеренной скорости ионов, кроме одной точки на самой МП, где холловский эффект доминирует на масштабах ионного гирорадиуса [5]. Толстая линия на нижней панели предсказывает поведение поля, исходя из условий в солнечном ветре, по газодинамической модели GDCF [5]; отклонения от этой модели – чистые локальные эффекты, в частности, противоположные электрические поля на МП. Разница между теорией (крестики) и экспериментом на рис. 6 слева от МП ( $\sim$  в 20:00 UT) может быть из-за прохода поверхностной волны по МП [5].

*Обсуждение и выводы.* Как мы продемонстрировали выше, поверхностный заряд, как правило, присутствует на МП, вызывая противоположные электрические поля с разных сторон МП. Именно это приводит к своеобразному динамоэффекту: ускорению внутренней плазмы за счет части кинетической энергии внешнего потока (ср. [10]).

В отличие от МГД-моделирования (левая панель рис. 4), вблизи заряженного слоя электрическое поле (и соответствующие дрейфовые потоки) усиливается за счет кинетических эффектов и эффектов конечного гирорадиуса ионов для потока плазмы, поперечного магнитному полю (ср. с. [5]). Появление ускоренной плазмы под МП чаще всего рассматривается как свидетельство пересоединения наружных и внутренних магнитных силовых линий. Однако, как мы показали, сначала надо учесть более простой МГД эффект – поляризацию границы движущихся плазм (мы начали учитывать кинетические эффекты в своей статье). Следующим шагом для тонкой (с толщиной  $\sim$  ионного гирорадиуса) МП должен быть учет прямого проникновения внутрь наиболее энергичных ионов, переносящих основной импульс вдоль магнитного на высоких широтах [5] (наша модель построена для низких широт, где нет внешнего потока вдоль поля). Учет влияния поляризации и эффектов конечного гирорадиуса на статистику процессов переноса в зависимости от параметров внешнего ТПС только планируется. Кроме того, внутри МП регулярно существует минимум магнитного поля, усиливающий эффекты конечного гирорадиуса, а также дополнительная поляризация МП из-за ее движения [5, 6].

Только после корректного учета этих эффектов можно надеяться на надежное выделение черт пересоединения как у МП, так и в токовых слоях в геомагнитном хвосте, на Солнце и в лабораторных установках. В будущем мы попытаемся перейти к количественным предсказаниям динамоэффектов на заряженных токовых слоях с использованием измеренных величин магнитного поля и внешнего потока в каждом конкретном

случае. Это относится и к выделению той части заряда на движущихся токовых слоях, которая обеспечивает ускоренный дрейф плазмы, освобождающей путь приближающейся МП [5].

Таким образом, наша модель учитывает только основную черту заряженных токовых слоев – поляризацию неподвижного стационарного токового слоя без учета остальных эффектов конечного гирорадиуса ионов. Она дает возможность для дальнейшего исследования более тонких эффектов, которые хорошо видны в измерениях космической плазмы на спутниках, начиная с 1981 г. (рис. 3) и заканчивая действующими проектами (рис. 6, [4]). Мы планируем связать статистические свойства “толстых” пограничных слоев, где накоплены базы данных по статистическим свойствам турбулентности, с переносом через тонкие подвижные границы (заряженные токовые слои), такие как МП, статистические измерения на которых не возможны [4, 12].

Авторы из ИКИ РАН благодарны за поддержку работы Л. М. Зеленому и ОФН15 РАН, а также экспериментаторам POLAR и CLUSTER за предоставление данных через CSDS и SPDF. Авторы из SLLP “Institute of Ionosphere”, “NTsKIT”, NSA RK благодарят за поддержку работы № 0115RK01275 RK Program.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] L. C. Lee and J. R. Kan, *J. Geophys. Res.* **84**, 6417 (1979).
- [2] M. Roth, de Keyser, J., Kuznetsova, and M. M. Vlasov, *Space Sci. Rev.* **76**, 251 (1996).
- [3] B. Nikutowski, J. Buchner, and H. Wiechen, *Adv. Space Res.* **22**, 161 (1998).
- [4] V. P. Budaev, L. M. Zelenyi, and S. P. Savin, *J. Plasma Phys.* **81**, 1 (2015).
- [5] S. Savin, E. Amata, Andre, et al., *Nonlin. Proc. Geophys.* **13**, 377 (2006).
- [6] S. Savin, E. Amata, V. Budaev et al., *Письма в ЖЭТФ* **99**, 19 (2014).
- [7] V. V. Lyahov and V. M. Neshchadim, *Adv. Space Res.* **51**, 730 (2013).
- [8] V. V. Lyahov and V. M. Neshchadim, *Adv. Space Res.* **54**, 1 & 901 (2014).
- [9] О. Л. Вайсберг, А. А. Галлеев, Л. М. Зеленый и др., *Космич. исслед.*, **21**, 57 (1983).
- [10] R. Lundin and E. M. Dubinin, *Planet. Space Sci.* **33**, 891 (1985).
- [11] F. S. Mozer et al., *Phys. Rev. Lett.* **91**, 245002-1 (2003).
- [12] В. П. Силин, *Физика плазмы* **37**, 739 (2011).

Поступила в редакцию 4 декабря 2015 г.