

ПО ИТОГАМ ПРОЕКТОВ  
РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
Проект РФФИ # 07-02-00319

## Аномальное взаимодействие потока плазмы с погранслоем геомагнитной ловушки

С. П. Савин<sup>△</sup>, В. П. Будаев<sup>△□</sup>, Л. М. Зеленый<sup>△</sup>, Э. Амата\*, Д. Сайбек<sup>°</sup>, В. Н. Луценко<sup>△</sup>, Н. Л. Бородкова<sup>△</sup>,  
Х. Занг<sup>°</sup>, В. Ангелопулос<sup>▽</sup>, Я. Шафранкова<sup>▷</sup>, З. Немечек<sup>▷</sup>, Я. Бленцки<sup>◁</sup>, Й. Бюхнер<sup>+</sup>, Л. В. Козак<sup>◇</sup>,  
С. А. Романов<sup>△</sup>, А. А. Скальский<sup>△</sup>, В. Красносельских<sup>§</sup>

<sup>△</sup> Институт космических исследований РАН

<sup>□</sup> Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”

\* *Interplanetary Space Phys. Inst., Roma, Italy*

<sup>°</sup> *NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA*

<sup>▽</sup> *University of California, Berkeley, USA*

<sup>▷</sup> *Charles University, Prague, Czech Rep.*

<sup>◁</sup> *Space Research Center, Warsaw, Poland*

<sup>+</sup> *Max-Planck Inst. Solar Physics, Katlenburg-Lindau, Germany*

<sup>◇</sup> *Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Украина*

<sup>§</sup> *Lab Phys. Chem. Envir., Orleans, France*

Поступила в редакцию 28 марта 2011 г.

После переработки 6 мая 2011 г.

На основе данных спутников ИНТЕРБОЛ-1, GEOTAIL, THEMIS и CLUSTER объяснен механизм аномальной динамики магнитослоя, границы которого могут локально деформироваться на расстояния, сравнимые с его толщиной. Так, граница магнитосферы – магнитопауза – прогибается на несколько радиусов Земли  $R_E$  под действием сверхмагнитозвуковых плазменных струй (СПС), а не минимумов давления плазмы, как предполагалось ранее. СПС с кинетическим давлением, в несколько раз большим давления солнечного ветра и магнитного давления под магнитопаузой, способны смять ее и даже вытолкнуть ее край из области магнитослоя, определяемой средним балансом давлений. Аномальная динамика магнитослоя инициируется аномалиями потока плазмы (АП), вызываемыми вращательными разрывами, скачками давления в солнечном ветре и межпланетными ударными волнами, взаимодействующими с головной ударной волной. Нами показано, что механизм образования СПС, прилегающих к АП, связан с компенсацией уменьшения потока в АП за счет ускорения потока в СПС, обусловленного полем поляризации на внешней границе АП. Статистически СПС являются экстремальными событиями со свойствами перемежаемости и мультифрактальности в погранслоях геомагнитной ловушки. Таким образом, СПС обеспечивают “дальнодействующую” связь между глобальными и микромасштабами. Подобную же роль могут играть быстрые концентрированные потоки в геомагнитном хвосте, в погранслоях термоядерных установок, в астрофизической плазме и в гидродинамике.

В этом письме мы обращаемся к проблеме взаимодействия движущихся потоков плазмы в ограниченном пространстве при доминировании динамических нестационарных эффектов. Основой служат плазменно-волновые измерения на границе земной магнитосферы, где наблюдаются статис-

тические характеристики турбулентности плазмы, подобные свойствам турбулентности в пограничных зонах лабораторных плазменных установок, неоднородных течениях астрофизической плазмы, а также в погранслоях гидродинамических турбулентных потоков [1, 2]. Во всех этих процессах

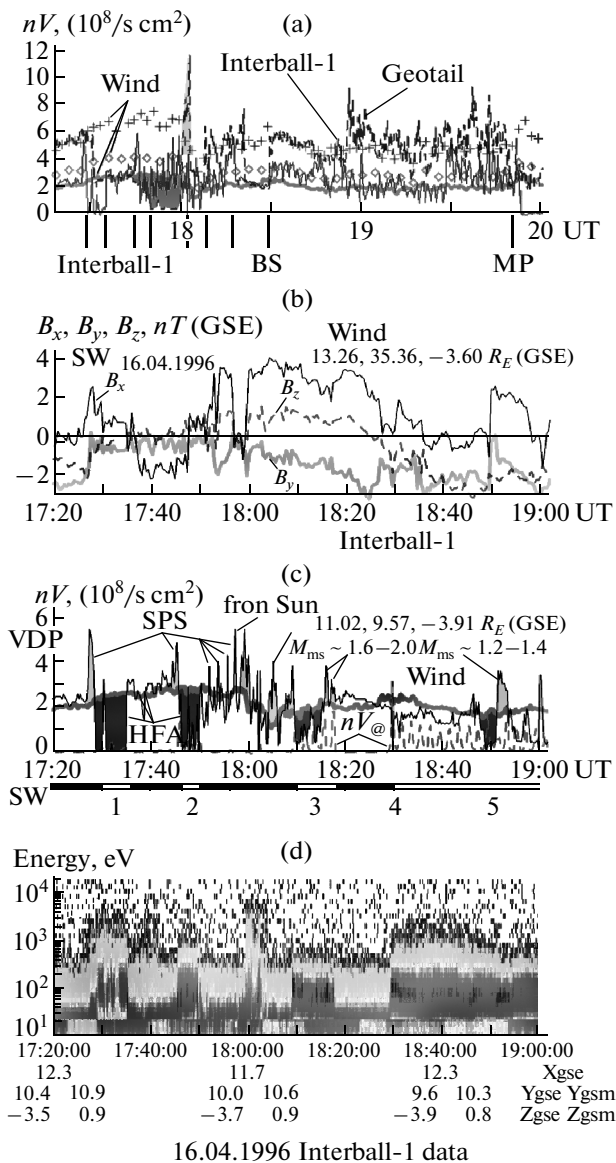


Рис. 1. (a) – Поток ионов  $nV$  (произведение плотности  $n$  на скорость  $V$  ионов. По данным ИНТЕРБОЛ-1 (тонкая линия), WIND (толстая кривая) и GEOTAIL (пунктир, координаты в GSE:  $(-4, 28, -3) R_E$ ). (b) – Магнитное поле в GSE на WIND (солнечный ветер,  $(13.26, 35.36, -3.6) R_E$  GSE); тонкая, жирная кривые и пунктир соответствуют компонентам  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$ , токовые слои – резким скачкам со сменой знака одной из компонент. (c) – Поток ионов от Солнца  $nV_{\perp}$ , одна из перпендикулярных компонент  $nV_{\perp}$  на ИНТЕРБОЛЕ-1 (тонкая линия и пунктир, модулирована с периодом вращения ИНТЕРБОЛА-1 2 мин) и  $nV$  с WIND (солнечный ветер, толстая линия). Цифрами обозначены события, обсуждаемые в тексте. Горизонтальные линии – участки нахождения ИНТЕРБОЛА-1 в солнечном ветре (SW). (d) – Энергоспектрограмма электронов с ИНТЕРБОЛА-1 (шкала интенсивности справа); низкие энергии ( $< 30$  эВ) – солнечный ветер, энергии 50–150 эВ на вертикальной оси – магнитослой

наблюдается перемежаемость в виде турбулентных пульсаций большой амплитуды, когда свойства турбулентности описываются более сложными каскадными моделями, чем известная модель K41 А.Н. Колмогорова для однородной развитой турбулентности (см. [2]). При этом одной из основных задач является выявление взаимосвязей глобальных и микромасштабов, обеспечивающих каскад энергии, дальний порядок корреляций и аномальный перенос. В данной работе рассмотрена роль крупномасштабных структур в обеспечении такого процесса.

В [1] были выделены “high kinetic energy density plasma jets” (плазменные струи с большой кинетической энергией) как вероятные носители свойств перемежаемости. Одной из основных их черт является возможность достигать сверхмагнитозвуковой скорости и отклоняться в сторону границы магнитосферы – магнитопаузы [1, 3, 4]. В настоящем письме мы показываем, что самые быстрые из них – СПС с типичным магнитозвуковым числом Маха  $1 < M_{ms} \leq 3$  – могут переносить возмущения через всю область взаимодействующих плазм от ударной волны до магнитосферных погранслоев с максимальной возможной – сверхмагнитозвуковой – скоростью. В СПС кинетическое давление в несколько раз превосходит давление в их источнике – солнечном ветре. По-видимому, СПС представляют собой необходимый структурный элемент сильной неізотропной турбулентности со статистической неоднородностью (т.е. с перемежаемостью). До сих пор не был объяснен механизм аномальной концентрации кинетической энергии на границе движущихся потоков. Для части исследуемых нами случаев таким механизмом служит перераспределение потока плазмы при обтекании солнечным ветром локальных препятствий вблизи головной ударной волны.

Аномалии потока плазмы определялись нами по резкому (более 50%) падению потока плазмы от Солнца, СПС – как уединенные всплески в спокойном потоке с амплитудой свыше полутора величин среднего потока плазмы или, в случае турбулентного сигнала, свыше двух стандартных отклонений. На рис. 1 показаны СПС (“SPS”, верхней заливкой выделены наиболее значимые) и АП на спутниках ИНТЕРБОЛ-1 и GEOTAIL (“HFA”, нижняя заливка на панелях (a) и (c)). Параметры солнечного ветра контролировались по данным спутника WIND. Все данные откалиброваны в пределах 20% по сигналу в солнечном ветре с цилиндра Фарадея на ИНТЕРБОЛЕ-1 как наиболее точному измерителю потока. Ромбы –  $1.5nV$ , крестики –  $2.5nV$  на WIND в солнечном ветре, что дает оцен-

ку для среднего увеличения потока в магнитослое по сравнению с солнечным ветром для ИНТЕРБОЛА-1 и GEOTAIL соответственно. Вертикальные линии – пересечения ударных волн (BS) и магнитопауза (MP) ИНТЕРБОЛОМ-1.

В АП в событии 1, обозначенном далее “АП 1”, видно касание магнитослоя ИНТЕРБОЛОМ-1. Поток ионов от Солнца падает, электроны разогреваются, но перпендикулярный поток ионов, появляющийся в магнитослое, мал. В окрестности АП 1 (включая окаймляющие СПС) средний суммарный поток ионов  $1.8$ , а в солнечном ветре по данным WIND –  $2.4 \pm 0.3 \cdot 10^8 / \text{с} \cdot \text{см}^3$ . Таким образом, даже вблизи подсолнечной точки АП 1 (см. обсуждение рис. 2 далее) СПС не компенсирует только 13% затенения потока,

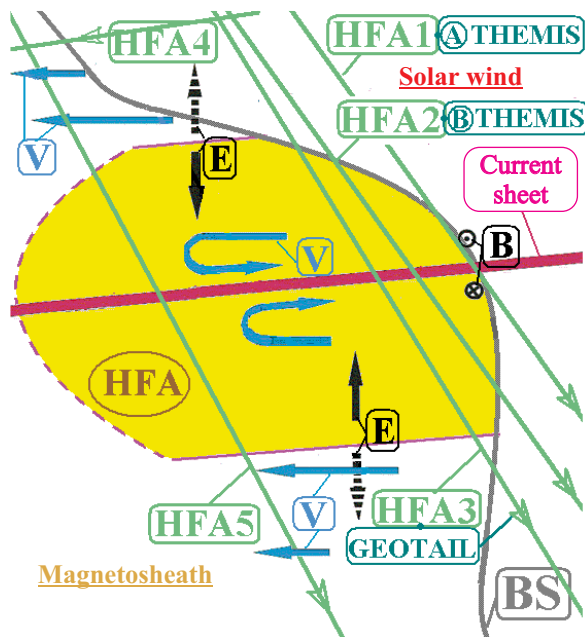


Рис. 2. Схема пересечения АП (HFA). Ударная волна (BS) выгнута в сторону Солнца. Остальные обозначения – см. рис. 1 и 3 и текст

что в основном связано с вариациями потока солнечного ветра на расстоянии около  $30 R_E$  между спутниками ИНТЕРБОЛ-1 и WIND. По-видимому, АП 1 вызвана взаимодействием с ударной волной токового слоя в солнечном ветре в 17:26 UT (см. повороты магнитного поля на рис. 1 (b, а также [5]).

Аномалия АП 2 коррелирует с токовым слоем в солнечном ветре в 17:48 UT. Внутри АП 2 хорошо видны перпендикулярные потоки, что свидетельствует о входе в магнитослой. Усредненные потоки плазмы в окрестности АП 2 близки к потокам в солнечном ветре по данным WIND (в пределах 10%, что характерно для расстояния около  $30 R_E$  между спутниками в солнечном ветре). Таким образом, окайм-

ляющие СПС компенсируют уменьшение потока в АП 2. Далее в солнечном ветре в 17:52–18:00 UT следует 5 токовых слоев, одновременных с серией СПС в солнечном ветре. Они предположительно связаны с возмущениями ударной волны с характерным периодом около 2 мин (ср. также с [6]).

В 18:02 UT поток в солнечном ветре значительно уменьшился, что, по всей видимости, и вызвало серию АП и СПС в 18:02–18:20 UT, включая АП 3. Передняя кромка АП 3 совпадает с ударной волной, СПС же на задней кромке регистрируется в магнитослое. Усредненный полный поток вокруг АП 3 в 1.4 раза превышает одновременный поток в солнечном ветре. Это объясняется увеличением плотности на ударной волне [4]. В среднем для ИНТЕРБОЛА-1 поток при входе в магнитослой увеличивается примерно в 1.5 раза. Так что и в случае АП 3 наблюдается локальный баланс потока. Для СПС на ее задней кромке магнитозвукое число Маха  $M_{ms} \sim 1.6-2$ . Среднее кинетическое давление  $W_k = M_p n V / 2$  (где  $M_p$ ,  $n$  и  $V$  – масса, плотность и скорость протонов) в СПС вдвое превышает давление в солнечном ветре и примерно на порядок – значение магнитного давления.

Аномалия АП 4 наблюдается на фронте ударной волны, движение которой наружу связано с понижением среднего динамического давления солнечного ветра в 18:02 UT. Необычность АП 4 состоит в том, что в связанной с ней СПС поток повернут перпендикулярно оси Солнце–Земля. При этом “функциональная” роль СПС понятна. Она “освобождает” место для расширяющегося магнитослоя (ср. [7]), выталкивая избыток плазмы наружу поперек течения. Для изучения детального механизма этого явления требуются многоточечные данные с лучшим временным разрешением (ср. [8]).

Аномалия АП 5 (коррелирующая с токовым слоем в солнечном ветре в 18:49 UT) наблюдается целиком в магнитослое. При этом средний поток при пересечении АП/СПС оказывается близок к потоку в равновесном магнитослое перед АП 5, превосходя величины потока на WIND в невозмущенном солнечном ветре в 1.7 раза. Хотя последнее отклонение от среднего значения, 1.5, невелико, мы считаем, что СПС на кромках АП 5 уже дают вклад в глобальное перераспределение потока плазмы в магнитослое из-за изменения внешнего потока солнечного ветра в 18:02 UT. Дело в том, что перед приходом магнитопаузы поток на ее пути на ИНТЕРБОЛЕ-1 в 19:00–19:28 UT (верхняя панель рис. 1) ниже средних предсказаний (ромбы). Кратковременный вход в магнитосферу в 19:56 UT (MP) наблюдается на 3 ч раньше окончательного входа в магнитосферу, что сравнимо со временем

пересечения равновесного магнитослоя. Усреднение потока на WIND и ИНТЕРБОЛА-1 между ударной волной и магнитопаузой в 18:30–19:56 UT дает именно среднее соотношение 1.5. Однако непосредственно перед магнитопаузой две СПС “освобождают” место для ее движения к Солнцу (ср. с [7] и с АП 4 на фронте ударной волны).

На спутнике GEOTAIL, который находился вниз по потоку от ИНТЕРБОЛА-1 вблизи ударной волны, одновременно с АП 3 и АП 5 наблюдаются менее значимые вариации потока относительно средних предсказаний (крестики), чем в АП 3 и АП 5. Это может быть связано с конечными размерами АП. Наиболее интересно развитие АП 2, которое, как мы считаем, регистрируется и на ИНТЕРБОЛА-1, и на GEOTAIL. На GEOTAIL на переднем фронте АП присутствует ударная волна. Далее следует падение потока. На задней кромке АП виден всплеск потока в СПС, почти вдвое больший предсказанной величины в магнитослое (крестики) и в 5 раз – потока в солнечном ветре до его падения. СПС “функционально” обеспечивает установление нового равновесия с менее плотным потоком в магнитослое, “сбрасывая” в импульсном режиме вниз по потоку избыток плазмы. Однако в литературе не обсуждался вопрос, почему вместо постепенного снижения потока в магнитослое в соответствии с его снижением в солнечном ветре наблюдаются необыкновенно интенсивный пик, а потом более глубокое падение относительно нового равновесного значения.

Серия СПС на GEOTAIL в 18:02–18:20 UT наглядно показывает их роль в установлении нового равновесия. Квазипериодические (с периодом  $\sim 6$ –7 мин) возмущения в среднем дают предсказанный по измерениям в солнечном ветре поток (крестики)  $nV \sim 4.8 \pm 1.8 [10^8/\text{с}\cdot\text{см}^3]$ . При этом вклад СПС в общий баланс потока по порядку величины можно оценить из разницы стандартных отклонений потока в магнитослое и солнечном ветре, как близкий к 30%. В СПС на GEOTAIL в 18:02 UT  $M_{ms} \sim 2.5$  (что близко к среднему значению в магнитослое на GEOTAIL),  $W_k \sim 28 \text{ кэВ}/\text{см}^3$  (в 4.5 раза больше, чем в солнечном ветре!). Для СПС на задней кромке АП 5 максимальное значение  $M_{ms} \sim 1.4$ . Приведенные выше величины  $M_{ms}$  в СПС являются характерными для магнитослоя [1, 3, 4], а  $W_k$  в СПС может превышать магнитное давление  $W_b$  под фланговой магнитопаузой более чем на порядок величины. Это позволяет существенно (на несколько  $R_E$ ) деформировать магнитопаузу (см. [3, 9] и обсуждение рис. 4 далее). В 18:55–19:56 UT GEOTAIL регистрирует поток, в 1.2 раза превышающий предсказания по измерениям на WIND

в солнечном ветре. Определяемая СПС в возмущенном магнитослое переменная составляющая [1] (свыше 20% на фоне 9% в солнечном ветре) свидетельствует о доминирующем вкладе СПС в избыточный поток. Отмеченный избыток потока на фланге магнитослоя соответствует описанному выше дефициту потока перед приближающейся аномально далекой магнитопаузой по данным ИНТЕРБОЛА-1 в 19:00–19:28 UT. Он представляет собой элемент глобального перераспределения потока в магнитослое при его динамической реакции на ослабление давления солнечного ветра в 18:02 UT.

Рис. 2 резюмирует наиболее вероятные сценарии пересечения спутниками АП (НФА). В соответствии с рис. 1 АП пересекаются спутниками сначала вблизи самой дальней от Земли (подсолнечной) точки, которая выходит далеко за стационарную ударную волну (АП 1/НФА1). Затем, по мере приближения спутников к Земле, они пересекают деформированную ударную волну на боковой поверхности АП (АП 2/НФА2), выходят из нее и входят непосредственно в солнечный ветер. Далее выходы из АП могут быть сначала в магнитослой, а потом в солнечный ветер (АП 3/НФА3, GEOTAIL). И, наконец, наиболее близкие к Земле области АП пересекаются целиком в магнитослое (АП 5/НФА5). Пересечения АП THEMIS-B (см. рис. 3, 4) согласуются с АП по данным ИНТЕРБОЛА-1 и GEOTAIL.

Согласно теоретическим представлениям об АП [5], возмущенное электрическое поле  $E$  внутри АП замедляет поток за счет дрейфа в скрещенных электрических и магнитных полях. В плоской геометрии наличие электрического поля внутри АП требует противоположно направленного поля на внешней ее границе [7]. Противоположные электрические поля на границе АП появляются из-за наличия на ней заряда как следствия граничных условий, вытекающих из уравнений Максвелла [7]. Таким образом, замедляющее поток электрическое поле внутри АП с неизбежностью вызовет ускорение плазмы снаружи АП.

Общий поток частиц через ударную волну в магнитослой равен суммарному потоку плазмы в магнитослое. Плотность потока солнечного ветра однородна на размерах магнитосферы. В магнитослое же возможны локальные вариации плотности потока как во времени, так и в пространстве [1, 8]. Нами установлено, что интегральный поток частиц, измеренный на масштабах локальных препятствий вблизи ударной волны, соответствует входящему потоку солнечного ветра.

Ранее существенное влияние СПС на границу магнитосферы только предполагалось [1]. Теперь есть

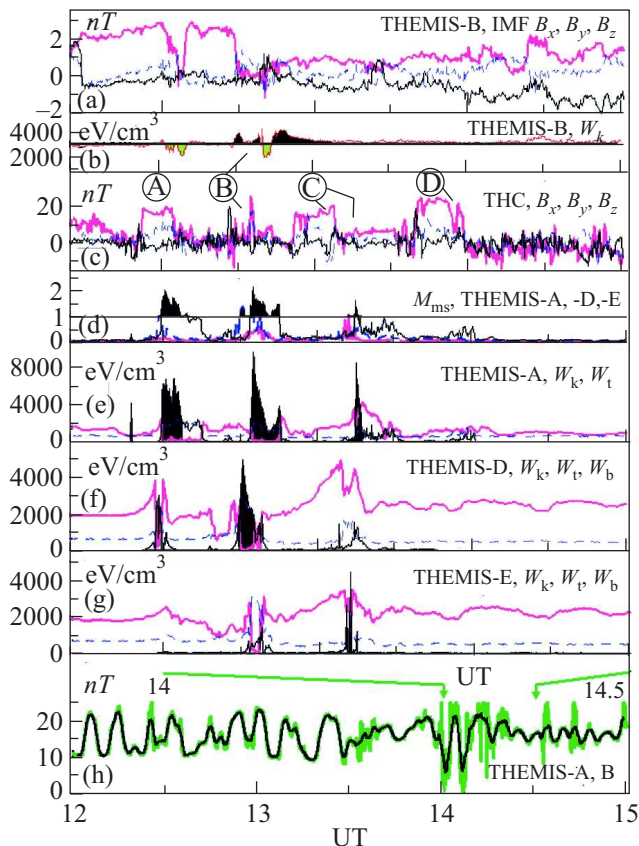


Рис. 3. Регистрация АП (выделены нижней заливкой на панели (b)) и СПС (выделены верхней заливкой на панелях (d)–(g)) по данным спутников THEMIS 30.10.2007 г. [9]. THEMIS-A, -D и -E регистрировали аномально глубокую магнитопаузу, THEMIS-C – аномально далекую магнитопаузу, THEMIS-B – АП (и ударную волну) далеко впереди равновесной ударной волны (см. рис. 4). (a) – THEMIS-B; магнитное поле в солнечном ветре в GSE,  $B_x$ ,  $B_z$ ,  $B_y$ ; тонкая, толстая линии и пунктир. (b) – THEMIS-B;  $W_k$ , СПС (верхняя заливка), окаймляющие АП в солнечном ветре (нижняя заливка). (c) – Магнитное поле на THEMIS-C примерно посередине между средними ударной волной и магнитопаузой; тонкая, толстая кривые и пунктир соответствуют компонентам  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$ . (d) – Магнитозвуковое число Маха  $M_{ms}$  для THEMIS-A, -D, -E, (тонкая, толстая кривые и пунктир, соответственно); верхняя заливка соответствует сверхмагнитозвуковому течению. (e) – THEMIS-A;  $W_k$ ,  $W_t$  (плотности кинетической и тепловой энергии ионов) и  $W_b$  (магнитное давление): тонкая, толстая кривые и пунктир соответственно. (f) – То же для THEMIS-D. (g) – То же для THEMIS-E. (h) – модуль магнитного поля  $|B|$  на THEMIS-A для расширенного интервала 12–15 UT: жирная кривая – опрос раз в 3 с, тонкая – скользящее среднее по 41 точке

возможность показать это наглядно, уточнив интерпретацию недавно опубликованного случая по дан-

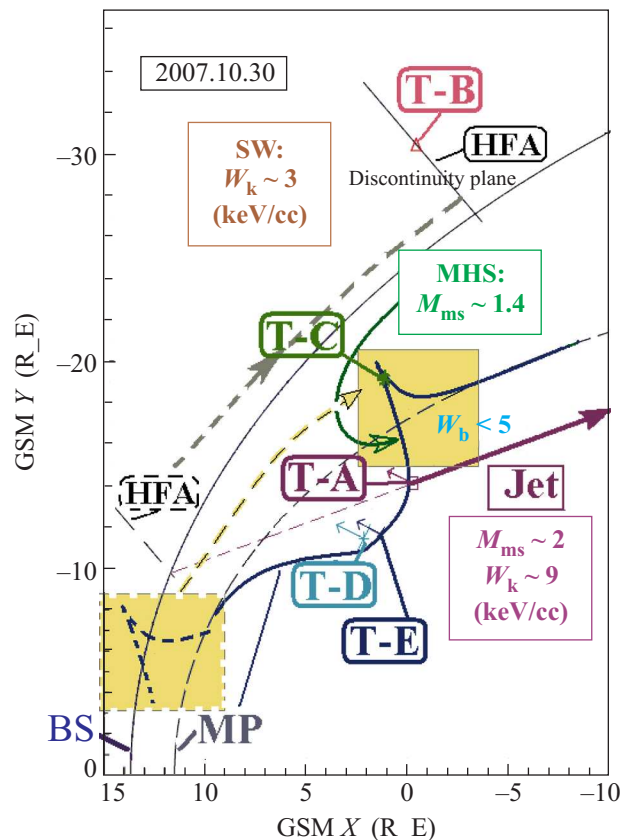


Рис. 4. Деформация магнитопаузы (MP; THEMIS, 30.10. 2007 г.) под действием СПС (Jet,  $M_{ms} \sim 2$ ), вызванным, по всей видимости, АП (HFA) в событии В на рис. 3; SW – солнечный ветер; MSH – магнитослой;  $W_b$  – магнитное давление [ $\text{кэВ}/\text{см}^3$ ]. Приблизительная позиция АП (HFA) в событии В, в которой образовался СПС (Jet), показана пунктиром (см. HFA в пунктирной рамке в левой нижней части). Тонким пунктиром на продолжении вектора Jet дана вероятная траектория СПС (Jet) от ударной волны до магнитопаузы. В дневном магнитослое выступ магнитопаузы (пунктир в залитом квадрате с пунктирной границей) может выходить за среднюю ударную волну (BS)

ными THEMIS [9] демонстрацией определяющей роли СПС. В [9] показана связь АП и аномальной динамики магнитопаузы. В качестве механизма передачи возмущения от АП к магнитопаузе предполагалось распространение к магнитопаузе минимума динамического давления перед АП [10]. Однако дополнительное рассмотрение данных по давлениям на рис. 3 показывает, что наиболее быстрые и энергетически значимые возмущения приносят к магнитопаузе именно СПС. Их кинетическое давление более чем вдвое превосходит и соответствующие всплески магнитного давления  $W_b$  под магнитопаузой, и среднее значение  $W_k$  в солнечном ветре. СПС вблизи магнитопа-

узы имеют пространственно-временные характеристики, близкие к СПС на рис. 1 и в [1, 3, 4, 9, 11].

СПС на THEMIS-A и -D (В на рис. 3b), вызывает и выход в магнитослой THEMIS-E и хорошо коррелирует с АП перед ударной волной (ср. с рис. 2). Эта АП окаймляется СПС в солнечном ветре так, что локально сохраняется баланс потока (как и для АП 2 на рис. 1; см. также рис. 2). В окрестности события А на рис. 3 (в котором уменьшение потока менее 40%) не наблюдается баланса потока, по всей видимости из-за близости переднего края возмущенной области, где происходит бифуркация набегающего потока (см. рис. 2). Необходимо также принять во внимание наложение эффектов от двух близких токовых слоев (см. рис. 3a).

СПС А с  $M_{ms} > 1$  видны на THEMIS-A (край – на THEMIS-D), В – на THEMIS-A и -D, С – на THEMIS-A (край – на THEMIS-E). Это свидетельствует о поперечном размере СПС в несколько тысяч км. Между сверхзвуковыми СПС и магнитопаузой образуется вторичная ударная волна [4], которая, по всей видимости, и выталкивает магнитопаузу за пределы равновесных границ, как показано на рис. 4. Как свидетельство диссипации кинетической энергии СПС за вторичной ударной волной, нужно отметить в 1.5 раза большую величину плотности тепловой энергии ионов  $W_t$  в событии В на THEMIS-E (где уже  $M_{ms} < 1$ ) по сравнению с  $W_t$  в СПС на THEMIS-A. Максимальные всплески  $W_b$  под магнитопаузой на THEMIS-E и -D сопоставимы с  $W_k$  в СПС, что свидетельствует о локальном балансе давлений при отражении или существенном отклонении СПС глубоко внутри магнитосферы. Каждому СПС соответствует вход под магнитопаузу THEMIS-C посередине равновесного магнитослоя (видимый по доминирующему положительному  $B_z$ ; рис. 3с; буквы А–D). Однако для магнитопаузы в событии D ни СПС, ни возмущений в солнечном ветре не видно. Не видно в нем и триггера для события С, включающего СПС на THEMIS-A. Так что причинно-следственная связь аномальных возмущений магнитосферы с внешними факторами далеко не всегда очевидна! Надо отметить, что события А–D имеют приблизительный период повторения около 6 мин, что близко к периоду СПС на GEOTAIL (18:02–18:20 UT; рис. 1). Более наглядна периодичность возмущений на рис. 3h. На спокойном участке в 12:00–13:30 UT виден период  $\sim 9$  мин (частота 1.6 мГц, ср. с [12]). В 14–15 UT после воздействия трех СПС наблюдаются волны на  $\sim 3$  мГц. Это близко ко второй гармонике резонансных колебаний магнитослоя как целого, а также к резонансной частоте полярного каспа [12]. Поскольку размеры каспа близки

к размерам возмущений, производимых СПС на магнитопаузе (см. рис. 4 и [9]), частоты их собственных мод тоже должны быть близки (т.е. быть порядка обратного времени пересечения альвеновской волной области возмущения [12]). Эти же частоты, отсутствующие в солнечном ветре, присутствуют и в сигналах на GEOTAIL и ИНТЕРБОЛЕ-1 в 18:00–18:20 и в 18:50–19:50 UT. Таким образом, резонансные колебания магнитослоя (а также, возможно, и резонансные волны на магнитопаузе и ударной волне) представляют собой существенную черту динамических процессов взаимодействия движущихся потоков плазмы, без учета которой не всегда могут быть понятны причины появления значительной части СПС и аномальных пересечений границ.

Для определения статистических свойств возмущений мы провели анализ высших моментов (структурных функций) флуктуаций магнитного поля и потока плазмы в таких протяженных турбулентных зонах, как, например, на GEOTAIL в 18:50–19:50 UT (см. рис. 1a). На рис. 5a представлен скейлинг  $\zeta(q)$  структурной функции  $S_q(\tau) = \langle |\delta_\tau X(t)|^q \rangle \sim \tau^{\zeta(q)}$  (нормированный на скейлинг 3-го порядка) в зависимости от порядка  $q$ , где  $\delta_\tau X(t) = X(t+\tau) - X(t)$ . Параметризация скейлинга структурных функций может быть осуществлена с помощью логпуассоновской модели:

$$\zeta(q) = (1 - \Delta) \frac{q}{3} + \frac{\Delta}{1 - \beta} [1 - (\beta)^{q/3}], \quad (1)$$

где индекс “ $\beta$ ” характеризует степень перемежаемости ( $\beta = 1$  для неперемежаемой однородной развитой турбулентности, например K41-модели),  $\Delta$  – параметр, связанный с геометрией диссипативных структур и краевыми эффектами [13]). Модель (1) является достаточно общей для количественного описания свойств статистически неоднородной турбулентности (см. [1, 2]), обладающей свойствами обобщенного самоподобия в анизотропном турбулентном каскаде. Такая турбулентность описывается мультифрактальной статистикой [2], которая обуславливается существованием характерного максимального масштаба. В предыдущих публикациях в основном изучались статистические свойства магнитных флуктуаций. В этом письме мы сравниваем их с флуктуациями потока плазмы. Из рис. 5a и табл. 1 видно, что хотя параметры логпуассоновского каскада  $\beta$  и  $\Delta$  могут заметно отличаться, временной скейлинг степенного закона среднеквадратичного смещения частиц  $\langle \delta x^2 \rangle \propto \tau^\gamma$ , который мы оцениваем по формуле [1, 2]:

$$\gamma = 1 + \Delta(1 - \beta)/\beta, \quad (2)$$

№ на рис. 5		$\Delta$	$\beta$	$\gamma$	$\eta$
	ТПС у магнитопаузы Земли, $B_x$ (ИНТЕРБОЛ-1, 19.06.1998, см. [12, 1])	0.24	0.38	1.39	
	ТПС у магнитопаузы Земли, ионный поток (ИНТЕРБОЛ-1, 29.03.1996, см. [1])	0.2	0.36	1.36	
1	ТПС у магнитопаузы Земли, ионный поток (ИНТЕРБОЛ-1, 23.06.1998, см. [14])	0.25	0.51	1.24	
	ТПС у магнитопаузы Земли, $B_y$ (ИНТЕРБОЛ-1, 23.06.1998, см. [14])	0.37	0.64	1.21	
2	ТПС, $B_z$ (CLUSTER, 02.02.2003, < 2 Гц, см. [16])	0.11	0.28	1.28	2.2
3	ТПС, $nV_z$ (CLUSTER, 02.02.2003, < 2 Гц, см. [16])	0.45	0.37	1.76	1.94
4	ТПС, $B_y$ (GEOTAIL, 16.04.1996, 18:54–20:04 UT, ср. рис. 1)	0.2	0.3	1.47	2
5	Геомагнитный хвост, $B_z$ (ИНТЕРБОЛ-1, 22.12.1996, см. [2])	0.15	0.26	1.42	2
6	ТПС, $nV$ (GEOTAIL, 16.04.1996, 18:54–20:04 UT, ср. рис. 1)				1.3

оказывается достаточно близким почти для всех исследованных данных. Величина экспериментально найденного показателя  $\gamma > 1$  характеризует наблюдаемый процесс как супердиффузию. Для случая № 3 в табл. 1 значение  $\gamma \approx 1.76$  больше остальных. При этом использовались данные в максимально доступной полосе частот 0–2 Гц, верхняя граница которой ниже максимального доплеровского сдвига (оцененного по инерционной длине протона и измеренной скорости в 2–4 Гц), но больше средней гирочастоты протонов (около 1 Гц). Экспериментальные данные в диапазоне частот 1–2 Гц могут включать циклотронные резонансы, т.е. в этом частотном диапазоне ограничена применимость МГД-приближения. Методика оценки скейлинга структурных функций основана на предположении  $\zeta(3) = 1$  для гидродинамической турбулентности и, соответственно, анализе экспериментальной зависимости  $\zeta(q)/\zeta(3)$  от  $q$  [2]. Следовательно, анализ будет корректным лишь в гидродинамическом приближении (в нашем случае МГД-приближении). Дополнительный анализ в полосе частот 0–1 Гц, соответствующей МГД-приближению, дал  $\gamma \approx 1.41$ , что близко как к значениям из табл. 1, так и к характерным значениям  $\gamma$ , оцененным для переноса в пристеночной плазме термоядерных установок [2]. Зависимости  $\zeta(q)/\zeta(3)$  от  $q$  на рис. 5а отличаются от известных каскадных моделей турбулентности с перемежаемостью (например, Ше–Левека). Они демонстрируют наличие свойств мультифрактальности и обобщенного самоподобия [1, 2]. Эти свойства связаны с “дальнодействием” – взаимосвязью глобальных и локальных масштабов. В нашем случае такой даль-

ний порядок корреляций обеспечивают когерентные структуры – СПС.

Чтобы подтвердить это, мы выделили в сигналах экстремальные события – всплески амплитуды, превышающие 2 величины стандартного отклонения. В случае потока или плотности кинетической энергии плазмы подобным образом и выделялись концентрированные струи в [1, 12]. Далее мы построили функции распределения времен ожидания  $\Delta T$  между последовательными экстремальными событиями (рис. 5б). Если бы экстремальные события возникали в результате простейшего случайного процесса, скейлинг  $\eta$  функции распределения времен ожидания  $P(\Delta T) \sim \Delta T^\eta$  был бы близок к  $\eta \sim -1$  (см. [15]). Однако рис. 5б и табл. 1 демонстрируют систематическое отклонение  $\eta$  от  $-1$ . Это подтверждает, что именно экстремальные события в плане концентрации кинетической энергии и потока плазмы (СПС) и являются “носителями дальнодействия” в статистическом смысле.

В случаях турбулентных зон, таких, как показано на рис. 1 по данным GEOTAIL, мы провели анализ не только флуктуаций магнитного поля, но и потока плазмы (ср. рис. 5а и б). Качественно экстремальные события по данным потока (СПС) на рис. 5б и в табл. 1 показывают похожие отклонения от монофрактальных моделей (как и данные магнитного поля). Возвращаясь к сравнению свойств флуктуаций потока плазмы и магнитного поля, на CLUSTER 02.02.2003г. (см. № 3 и 2 в табл. 1) можно заметить близость наклонов ( $\eta$  на рис. 5б), т.е. статистика экстремальных событий для этих величин демонстри-

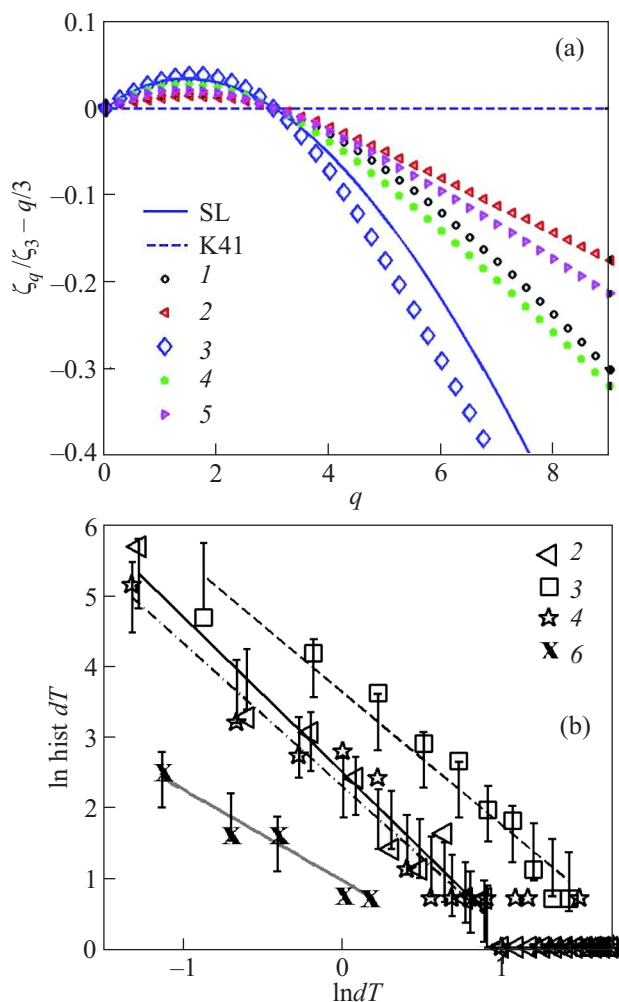


Рис. 5. (а) – Отклонение скейлингов (показателей степени) структурных функций, нормированных на скейлинг 3-го порядка,  $\zeta(q)/\zeta(3)$ , от колмогоровской модели K41 ( $q/3$ , пунктир); сплошная линия – лог-пуассоновская модель Ше–Левека (SL) для параметров  $\beta = \Delta = 2/3$ . Номера и значки справа вверху соответствуют табл. 1, в которой приведены только значения для интервалов, содержащих свыше 4000 точек. (б) – Функции распределения времен ожидания экстремальных событий (пиков свыше 2 стандартных отклонений) в логарифмических координатах. Номера в правом верхнем углу соответствуют табл. 1. Проведена аппроксимация степенной функцией  $P(t) \sim t^{-\eta}$  (определен “скейлинг”; прямые линии). Квадратам соответствует пунктир, звездочкам – штрих-пунктир, треугольникам – тонкая сплошная линия

рует их близкие свойства при тех же опросах данных.

Мы провели дополнительную проверку роли СПС в обеспечении дальних корреляций путем хаотизации фаз сигнала  $nV_z$  (направление  $Z$  в данном случае с точностью до  $20^\circ$  совпадает со средней нормалью к

магнитопаузе) для 02.02.2003 г. (см. [16], табл. 1 и рис. 5). Наклон функции распределения экстремальных событий, как и ожидалось, приблизился к  $-1$ , структурные функции – к колмогоровской модели K41, а более 85% экстремальных пиков потока плазмы с амплитудой свыше 2 стандартных отклонений исходного сигнала исчезло. Таким образом, вместе с экстремальными событиями, СПС, исчезли и “дальние” корреляции.

Итак, нами продемонстрирована наиболее быстрая (сверхмагнитозвуковая) и энергетически эффективная (с превышением в несколько раз кинетического давления над давлением в фоновом магнитослое и над магнитным давлением под магнитопаузой) передача глобальных ( $\sim$  нескольких  $R_E$ ) возмущений от внешних (ударная волна, головная часть магнитослоя) к внутренним (магнитопауза, погранслои, хвостовая часть магнитослоя) областям магнитосферы с помощью среднemasштабных СПС (тысячи км в поперечнике), границы и субструктуры которых соответствуют микромасштабам, т.е. 10–100 км. Возможна и обратная передача возмущений с участием СПС – от магнитопаузы к ударной волне, как показывают аномально далекие магнитопаузы на рис. 1, 3. Зона взаимодействия потоков плазмы (см. магнитослой после 18:30 UT на рис. 1) может значительно отличаться от равновесных предсказаний (ромбы и крестики) при доминирующем вкладе СПС в процесс установления нового равновесия в соответствии с изменившимися внешними параметрами солнечного ветра и/или в ответ на внешние триггеры – токовые слои или скачки потока, межпланетные ударные волны и т.п. [3, 11, 17]. Таким образом, СПС и как индивидуальные когерентные структуры, и как статистически значимые экстремальные события, обеспечивают взаимосвязь процессов от микро- до макромасштабов во всей зоне взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой. При этом наблюдаемые свойства СПС демонстрируют наличие перемежаемости и обобщенного самоподобия.

Именно сверхмагнитозвуковая скорость СПС и их сфокусированное динамическое давление делают их уникальными образованиями, которые реализуют взаимосвязь между микро- и глобальными масштабами, передавая через всю систему взаимодействующих потоков плазмы наиболее энергетически емкие возмущения с наибольшей скоростью. Сверхмагнитозвуковые СПС структурируют всю область взаимодействия солнечной и магнитосферной плазмы между ударной волной и магнитопаузой и модулируют пограничные слои под ней, “экспортируя” таким образом промежуточные (т.е. свои поперечные) и мик-



ромасштабы (соответствующие толщине их границ) внутрь магнитосферы. Специфической глобальной особенностью взаимодействия является модуляция появления СПС и аномальных пересечений магнитопаузы и ударной волны резонансными колебаниями магнитослоя как целого, а также, по-видимому, и колебаниями границ и таких характерных полостей, как касп.

В [1, 12] предполагалось влияние солитообразных структур, в том числе плазменных струй с аномальной концентрацией кинетической энергии, на установление “дальнодействия” в пределах турбулентных зон на магнитопаузе и у ударной волны, а также отмечалась их синхронизация на собственных частотах магнитослоя 1–2 мГц. В этом письме мы демонстрируем, что наиболее быстрые струи, СПС, не только обеспечивают “дальнодействие” в глобальном смысле по всей области взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой, но и осуществляют взаимосвязь масштабов, существенно возмущая весь магнитослой и погранслои и привнося в них свои характерные масштабы. Подтверждена роль СПС не только в статистическом смысле как экстремальных событий, но и как передаточного механизма индивидуальных аномальных воздействий, приводящих к деформации границ на глубину порядка толщины магнитослоя. СПС оказались универсальными звеньями в установлении новых состояний равновесия в ответ на изменение внешних условий.

Обратимся теперь к проблеме генерации СПС (это относится и к дозвуковым концентрированным струям), которая до сих пор почти не исследована. В [1] сохранение потока плазмы в присутствии СПС в магнитослое, причем на глобальных масштабах, только предполагалось. Теперь мы продемонстрировали, что для АП вблизи ударной волны поток плазмы сохраняется локально (т.е. на поперечных масштабах, сравнимых с масштабами АП). Увеличение наклона ударной волны на флангах АП объясняет также и сверхзвуковой характер СПС, прилегающих к АП [4]. Компенсация уменьшения потока в АП с помощью сверхзвуковых СПС, возникающих под воздействием поляризации флангов АП, позволяет, наконец, говорить о феноменологической модели генерации СПС (рис. 2), в частности вблизи ударной волны. Это указывает путь и к самосогласованной теоретической модели генерации СПС и более медленных струй, появление которых до сих пор объяснялось только “функционально” как “освобождающих” путь приближающейся магнитопаузе [7]. (При обсуждении рис. 1 подобный подход применен как к ударной волне перед АП4, так и к магнитопаузе (MP).)

Мы надеемся, что гипотеза, высказанная в [1] и подтверждаемая данными, приведенными на рис. 1 и 3, о СПС как о собственных модах в системах с взаимно движущимися плазмами найдет соответствующее теоретическое обоснование. Приведенные на рис. 5 и в табл. 1 данные с ИНТЕРБОЛА-1 22.12.1996 г. свидетельствуют о том, что в геомагнитном хвосте магнитные флуктуации имеют сходные статистические характеристики с возмущениями на границе магнитосферы (ср. также с [1, 3, 4, 9, 12]). Так что, вероятно, и в геомагнитном хвосте ускоренные потоки плазмы проявляют свойства “дальнодействия”, или, другими словами, обеспечивают наиболее быструю передачу информации в центральную магнитосферу о ходе пересоединения в геомагнитном хвосте. Известно также, что, как и СПС в магнитослое, в хвосте наиболее энергоемкими возмущениями являются ускоренные потоки плазмы (bursty bulk flows).

Итак, мы считаем, что обеспечение “дальнодействия” в областях взаимодействия потоков плазмы, ограниченных в пространстве, с помощью быстрых когерентных структур является достаточно общей чертой. Статистический анализ показал, что СПС являются не автономными явлениями, а структурными элементами статистического ансамбля флуктуаций различной амплитуды. Таким образом, СПС вовлечены в каскадный процесс передачи энергии между флуктуациями разной амплитуды. Они обеспечивают один из максимальных масштабов, необходимых для формирования мультифрактального каскадного процесса. Необходимо напомнить, что подобные явления экстремальных флуктуаций большой амплитуды наблюдаются также во многих турбулентных потоках с перемежаемостью: “блобы” и “стриммеры” в пристеночной плазме термоядерных установок [2]; “джеты” в астрофизической плазме; когерентные структуры (very large scale motion – VLSM) в погранслоях гидродинамических турбулентных потоков [2, 12]. Мы полагаем, что струи с концентрированной кинетической энергией играют существенную роль в обеспечении свойства многомасштабности и дальних корреляций в широком классе турбулентных пограничных слоев.

Авторы признательны за поддержку работы в рамках программ РАН ОФН-15 и П-4 грантов MNiSW # 307 101935, грантов РФФИ # 100200135 и 11-02-90491, а также благодарят Г.Н. Застенкера за предоставление данных по потоку плазмы (ИНТЕРБОЛ-1) и экспериментальные группы по измерениям магнитных полей и параметров плазмы на спутниках WIND, ACE, GEOTAIL, CLUSTER и THEMIS за воз-

возможность использования данных, полученных через CDAWeb.

1. S. Savin, E. Amata, L. Zelenyi et al., *JETP Letters* **87**, 593 (2008).
2. В. П. Будаев, С. П. Савин, Л. М. Зеленый, *УФН*, принято к печати (2011).
3. E. Amata, S. Savin, D. Ambrosino et al., *Planet. Space Sci.*, doi:10.1016/j.pss.2010.07.021 (2010).
4. H. Nietala, T. V. Laitinen, K. Andre'eva' et al., *Phys. Rev. Lett.* **103**, 245001 (2009).
5. S. J. Schwartz et al., *Journ. Geoph. Res.* **105**, 12639 (2000).
6. S. A. Grib and E. A. Pushkar, *Planet. Space Sci.* **58**, 1850 (2010).
7. S. Savin, E. Amata, M. Andre et al., *Nonlin. Proc. Geophys.* **11**, 377 (2006).
8. S. Savin, L. Zelenyi, E. Amata et al., *Planet. Space Sci.* doi:10.1016/ j.pss.2010.05.001 (2010).
9. K. S. Jacobsen, T. D. Phan, J. P. Eastwood et al., *J. Geophys. Res.* **114**, A08210, doi:10.1029/2008JA013873 (2009).
10. D. Sibeck, N. Borodkova, G. Zastenker et al., *Geophys. Res. Lett.* **25**(4), 453 (1998).
11. H. Zhang, Q.-G. Zong, D. G. Sibeck et al., *J. Geophys. Res.* **114**, A00C12, doi:10.1029/2008JA013488 (2009).
12. С. П. Савин, Л. М. Зеленый, Э. Амата и др., *Письма в ЖЭТФ* **79**, 452 (2004).
13. B. Dubrulle, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 959 (1994).
14. Л. В. Козак, С. П. Савин, В. П. Будаев и др., *Геомагнетизм и Аэрномия*, в печати (2011).
15. V. P. Budaev, S. Takamura, N. Ohno, and S. Masuzaki, *Nuclear Fusion* **46**, S181 (2006).
16. E. A. Kuznetsov, S. Savin, E. Amata et al., *JETP Lett.* **85**, 288 (2007).
17. J.-H. Shue, J.-K. Chao, P. Song et al., *Geophys. Res. Lett.* **36**, L18112, doi:10.1029/2009GL039842 (2009).