

УДК 550.383

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ НИЗКОШИРОТНОГО ПОГРАНСЛОЯ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2013 г. С. С. Знаткова<sup>1</sup>, Е. Е. Антонова<sup>1,2</sup>, М. С. Пулинец<sup>1</sup>, И. П. Кирпичев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, г. Москва

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва

e-mail: svetlana.znatkova@yandex.ru; elizaveta.antonova@gmail.com

Поступила в редакцию 12.03.2013 г.

Описана методика определения толщины низкоширотного погранслоя (LLBL) магнитосферы Земли в дневные часы вблизи экваториальной плоскости по данным пересечения слоя одним спутником с учетом измеряемой на спутнике скорости движения плазмы. Методика может быть использована при флуктуациях положения магнитопаузы и параметров магнитослоя. Проанализирована необходимость учета существования внешней и внутренней областей LLBL. Проведено тестирование разработанной методики по результатам анализа почти одновременных близко лежащих пересечений магнитопаузы спутниками миссии THEMIS, когда имеется достаточно точная информация о толщине LLBL. Показано, что разработанная методика позволяет определить толщину LLBL с точностью ~10%.

DOI: 10.7868/S0016794013060175

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Низкоширотный погранслой (LLBL – Low-Latitude Boundary Layer) представляет собой область на низких широтах магнитосферы Земли, примыкающую к магнитопаузе, в которой одновременно существуют плазма магнитосферы и магнитослоя. Величина концентрации, температуры и скорости плазмы в LLBL является промежуточной между значениями в магнитосфере (плазменном слое) и магнитослое. Анализ физических процессов, приводящих к формированию LLBL, представляет большой интерес для изучения передачи массы, импульса и энергии между магнитослоем и магнитосферой. Но, не смотря на это, LLBL в настоящее время является сравнительно плохо изученной областью магнитосферы. Многие проблемы, связанные со структурой и особенностями формирования LLBL, остаются пока нерешенными (см. [Россоленко и др., 2008; Rossolenko et al., 2006, 2008; Shi et al., 2009, Antonova et al., 2012] и ссылки в данных работах). В магнитослое характерная энергия ионов и электронов составляет от 100 эВ до нескольких кэВ. Концентрация частиц составляет  $\sim 10 \text{ см}^{-3}$ . В плазменном слое и окружающем Землю плазменном кольце (MPR – magnetospheric plasma ring [Antonova et al., 2011; Антонова и др. 2012]) ионы и электроны обладают энергией  $\sim 1\text{--}10 \text{ кэВ}$ , концентрация плазмы  $\leq 1 \text{ см}^{-3}$ . Плазма LLBL обладает промежуточными значениями концентрации и энергий частиц. Для выделения LLBL может быть использована диаграмма зависимости концентрации от температуры [Hargood and Bryant, 1992;

Vaisberg et al., 1998]. Эта зависимость показывает, что структура LLBL четко выстроена и ее нестационарность связана с движениями магнитопаузы. Изменение наклона зависимости концентрации электронов от температуры в работе [Dušik et al., 2007] позволило выделить внутреннюю и внешнюю части LLBL.

Важной характеристикой LLBL является его толщина. Толщина LLBL может меняться практически от 0 до примерно  $2R_E$  [Fedorov et al., 2003]. Определение зависимости толщины LLBL от параметров солнечного ветра может иметь существенное значение для решения проблемы проникновения плазмы магнитослоя внутрь магнитосферы. Важным аспектом проблемы является также определение роли турбулентных процессов переноса внутри слоя (см. [Antonova 2005, 2006, Wang et al., 2011]). Исследование зависимости толщины LLBL от различных факторов, как и определение самой толщины, сопряжено с определенными трудностями, связанными с быстрыми движениями магнитопаузы, к которой прилегает LLBL.

LLBL формируется при проникновении плазмы магнитослоя через магнитопаузу. Магнитопауза обычно определяется [Савин, 2008] как токовый слой, где магнитное поле поворачивается от направления, соответствующего солнечному ветру, к направлению, определяемому геомагнитным диполем. В обзоре [Савин, 2008] говорится также, что при турбулентном переходе магнитопауза может соответствовать протяженной зоне, в которой среднее направление магнитного поля теряет

корреляцию с межпланетным магнитным полем (ММП). В работе [Пулинец и др., 2012] показано, что направление магнитного поля у магнитопаузы в дневной магнитосфере слабо коррелирует с ММП. Поэтому ниже будет анализироваться, в основном, положение сравнительно легко выделяемой резкой границы между плазмами магнитослоя и магнитосферы – МРВ (magnetospheric plasma boundary). В работе [Знаткова и др., 2011] показано, что МРВ хорошо прослеживается по спектрограммам энергий ионов и электронов при переходе спутника через границу LLBL – магнитослой. Скорость движения МРВ соответствует скорости движения магнитопаузы.

Хорошо известно, что в магнитослое почти постоянно наблюдается высокий уровень турбулентности ([Россоленко и др., 2008; Знаткова и др., 2011; Antonova et al., 2012] и ссылки в данных работах). Высокий уровень турбулентности плазмы магнитослоя проявляется как во флуктуациях магнитного поля, так и во флуктуациях потока плазмы. При этом, как показано в работе [Николаева и др., 1998], возникают колебания положения магнитопаузы, не связанные с колебаниями параметров солнечного ветра. В соответствии с работой [Николаева и др., 1998], быстрые и большие локальные движения магнитопаузы определяются резкими изменениями полного давления плазмы магнитослоя вследствие вариаций динамического давления плазмы магнитослоя. Но необходимо учитывать, что динамическое давление плазмы магнитослоя мало вблизи подсолнечной магнитопаузы по результатам работы [Знаткова и др., 2011], и основной вклад в баланс давлений в данной области вносит статическое давление. Колебания полного давления могут иметь различный характер в разных точках магнитопаузы. Необходимо также учитывать формирование сверхплотных струй в магнитослое, динамическое давление которых может значительно превышать давление солнечного ветра [Савин, 2012].

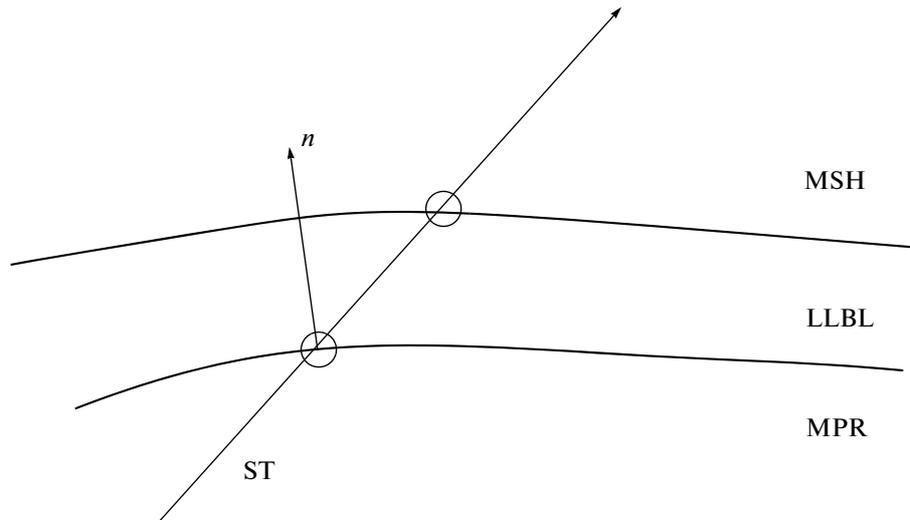
Первые результаты по определению толщины LLBL были получены по данным измерений на спутниках HEOS-2 [Haerendel, et al., 1978] и IMP-6 [Eastman and Hones, 1979]. Измерения проводились преимущественно при  $X > 0$ , т.е. в дневной части магнитосферы. В работе [Haerendel et al., 1978] толщина LLBL оценивалась по времени пересечения слоя спутником и не учитывались движения магнитопаузы. В работе [Eastman and Hones, 1979] принималось во внимание движение магнитопаузы. При определении толщины LLBL с учетом флуктуаций положения магнитопаузы определялось отношение времени пересечения спутником LLBL ко времени пересечения магнитопаузы перпендикулярно к положению магнитопаузы, задававшейся моделью [Howe and Binsack, 1972]. Считалось, что толщина магнитопаузы не изменяется от пролета к пролету и по порядку величины рав-

на ларморовскому радиусу иона. В работе [Eastman and Hones, 1979] было показано, что толщина LLBL значительно превышает толщину магнитопаузы. Отмечалось, что толщина LLBL сильно варьирует. Оцененное в работе отношение толщины LLBL к толщине магнитопаузы составляло от 4 до 80 при средней величине 25. При толщине магнитопаузы в 100 км данная оценка давала толщину LLBL в  $0.4 R_E$ . Основная сложность данного подхода связана с предположением о постоянной толщине магнитопаузы, так как последующие результаты показали [Савин, 2008], что толщина магнитопаузы может изменяться в достаточно широких пределах.

Позднее толщина LLBL была определена по данным спутника ISEE 1 в работе [Mitchell et al., 1987]. В работе получена зависимость толщины LLBL (точнее, времени пересечений спутником LLBL) от величины и ориентации межпланетного магнитного поля. Отмечалось, что время пересечения спутником LLBL дает информацию о толщине слоя при усреднении с учетом движений слоя относительно спутника. Выводы работы [Mitchell et al., 1987] были основаны на анализе времени пролета спутника ISEE 1 через слой. Получение более точной информации о толщине слоя связано с началом многоспутниковых наблюдений. Так в работе [Šafránková et al., 2007] толщина LLBL была определена по одновременным данным измерений на спутниках ИНТЕРБОЛ/Хвостовой зонд и Магион-4 5 марта 1997 г. на вечернем фланге магнитосферы. Однако такие наблюдения до сих пор ограничиваются описанием отдельных событий. Поэтому определение зависимости толщины слоя от параметров солнечного ветра, ММП и геомагнитной активности, требующие большой статистики, пока могут опираться, в основном, на пересечения LLBL одним спутником. При этом возникает вопрос о точности результатов, полученных при одиночном пересечении.

С запуском многоспутниковой миссии THEMIS, результаты измерений пяти спутников которой находятся в прямом доступе (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>, <http://THEMIS.ssl.berkeley.edu/>), появилась возможность определять толщину LLBL по одновременным измерениям на нескольких спутниках и разработать методику определения толщины слоя, используя результаты наблюдений на одном спутнике с учетом определяемой на спутнике скорости движения плазмы.

В данной работе рассмотрена методика определения толщины LLBL по измерениям на одном спутнике, если имеются результаты измерений скорости плазмы. Методика тестируется в ходе анализа почти одновременных пересечений слоя спутниками THEMIS-B и THEMIS-C на расстоянии 500 км 8 сентября 2007 г.



**Рис. 1.** Схема, иллюстрирующая методику определения толщины LLBL в дневные часы. MSH — область магнитосферы (magnetosheath), MPR — окружающее Землю плазменное кольцо, переходящее в ночные часы в плазменный слой (magnetospheric plasma ring-MPR).

## 2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ LLBL

Толщину слоя можно оценить, зная время пересечения спутником LLBL и скорость плазмы вдоль направления нормали к магнитопаузе. В соответствии с результатами [Nargood and Bryant, 1992; Vaisberg et al., 1998; Николаева и др., 1998; Dušik et al., 2007] предполагается, что основной вклад в определяемую на спутнике усредненную по слою скорость плазмы вносит движение слоя относительно спутника как целого, т.е. не учитываются изменения скорости за время пересечения слоя спутником.

Скорость плазмы вычисляется по данным измерений потоков частиц. Основной вклад в гидродинамическую скорость плазмы вносят ионы, так как  $\mathbf{V} = \frac{1}{(m_i n_i + m_e n_e)} \sum (m_i n_i \mathbf{V}_i + m_e n_e \mathbf{V}_e)$ ,  $n_i \cong n_e$ ,  $m_i \gg m_e$ , поэтому  $\mathbf{V} \cong \mathbf{V}_i$ , если средняя энергия электронов не превышает намного энергию ионов.

Для определения толщины слоя по результатам наблюдений на одном спутнике необходимо знать вектор нормали к магнитопаузе. Обычно вектор нормали к магнитопаузе определяется методом минимальных вариаций по результатам магнитных измерений. Однако высокий уровень турбулентных флуктуаций в магнитосфере и LLBL создает определенные трудности для определения направления нормали по результатам магнитных измерений. Поэтому, при получении усредненных характеристик, в первом приближении, могут быть использованы модели магнитопаузы, описанные в работах [Sibeck et al., 1991; Shue et al., 1998; Dmitriev and Suvorova, 2000; Verigin et al., 2009] и др. Динамическое давление солнечного ветра является основ-

ным фактором, определяющим положение магнитопаузы. Форма магнитопаузы за исключением экстремальных событий сравнительно слабо зависит от межпланетного магнитного поля. Поэтому в первом приближении будет использована модель Веригина [Веригин и др., 2008], где входным параметром является только динамическое давление солнечного ветра. Результаты тестирования модели [Tátrallyay et al., 2012] показали ее применимость даже при экстремальных параметрах солнечного ветра. Предполагается, что магнитопауза не меняет направление движения за время наблюдений и является почти плоской структурой на масштабах, сравнимых с толщиной LLBL. Необходимо также отметить, что данная методика может использоваться, если скорость плазмы вдоль слоя не превышает значительно скорость поперек слоя, т.е. в основном в дневных областях.

Определение толщины LLBL предполагает:

I. *Определение границ LLBL.* На рисунке 1 эти границы изображены окружностями на границах LLBL вдоль траектории спутника (ST). Границы слоя определяются по данным приборов спутника (температура, концентрация, скорости и спектрограммы энергий ионов и электронов).

II. *Нахождение времени пролета спутника в слое  $t$ ,* с учетом найденных границ LLBL. Оно измеряется в направлении ST согласно рис. 1. При расчете учитывается, что скорость движения слоя как целого, как правило, намного превышает скорость спутника.

III. *Нахождение скорости плазмы в направлении поперек магнитопаузы.* а) Нахождение конфигурации магнитопаузы при параметрах солнечного

ветра данного события. Так, например, в модели [Verigin et al., 2009]:

$$y(x) = \frac{D}{\pi} \arctg \left( \frac{\pi}{D} \sqrt{2R_0(r_0 - x)} \right), \quad (1)$$

где  $r_0 = 10.8R_E D_p^{-1/6}$  – расстояние от центра Земли до подсолнечной точки магнитопаузы;  $R_0 = 16.9R_E D_p^{-1/6}$  – радиус кривизны магнитопаузы в подсолнечной точке;  $D = 94.5R_E D_p^{-1/6}$  – диаметр хвоста на больших расстояниях ( $x \rightarrow -\infty$ ),  $D_p$  – динамическое давление солнечного ветра в единицах нПа,  $x$  – ось антипараллельная скорости солнечного ветра,  $y$  – расстояние от оси  $x$ .

б) Определение направления  $\mathbf{n}$ , перпендикулярного магнитопаузе в точке модельной магнитопаузы, ближайшей к точке пересечения спутником реальной магнитопаузы (рис. 1).

в) Определение вектора скорости плазмы  $\mathbf{v}_{\text{plasma}}$  как среднего значения каждой из компонент  $v_x$ ,  $v_y$  и  $v_z$  скорости плазмы внутри LLBL. Средние значения компонент скорости могут отличаться от мгновенных значений на величину до 100 км/с как в рассматриваемом ниже событии.

г) Определение скорости плазмы  $v_{\text{plasma}}^\perp$  в найденном направлении:

$$v_{\text{plasma}}^\perp = |\mathbf{v}_{\text{plasma}}| \cdot \cos(\mathbf{n}, \mathbf{v}_{\text{plasma}}) - \text{скорость плазмы.}$$

IV. *Расчет толщины LLBL* по формуле  $L_{\text{LLBL}} = v_{\text{plasma}}^\perp t$ . Внутреннюю и внешнюю части слоя можно выделить, как указывалось выше, при анализе зависимости концентрации от температуры ионов и электронов вдоль траектории спутника при пересечении LLBL. Во внутреннем и внешнем LLBL различен характер изменения концентрации, температуры и скорости течения. Поэтому необходимо понять в какой степени разделение LLBL на внутренний и внешний слои может повлиять на результаты вычисления толщины слоя в целом. При этом оценивается усредненная скорость плазмы для каждой части отдельно, затем вычисляются толщины каждой части слоя и вычисленные величины суммируются, образуя толщину всего LLBL. Полученную таким образом толщину LLBL можно сравнить с толщиной, полученной с использованием усредненной по всему слою скорости плазмы.

При расчете толщины LLBL необходимо учитывать возможные ошибки и неточности, возникающие при использовании описанной выше методики. Возникают искажения в результате использования определенной модели магнитопаузы. Реальный вектор нормали к магнитопаузе может отличаться от модельного, что приведет к завышению или занижению значения проекции скорости на нормаль к магнитопаузе. Анализ результатов, приведенных в работе [Tátrallyay et al., 2012] показывает, что вносимая ошибка для дневных пересечений может соста-

вить ~10%. При наборе статистики надо учитывать, что модели магнитопаузы строятся по результатам усреднения большого числа событий. Поэтому при статистических исследованиях данная погрешность может приводить к увеличению дисперсии полученных значений, но, скорее всего, не приводит к смещению средней величины толщины слоя. Возможны неточности в определении границ LLBL. Параметры, по которым находятся внешняя и внутренняя границы слоя (температура, концентрация плазмы и визуализированные в спектрограммах энергии частиц и их потоки), зависят от временного разрешения приборов спутника.

Прибор ESA по измерению параметров ионов на спутниках проекта THEMIS позволяет измерять параметры плазмы с временным разрешением в 3 с. Чем меньше скорость плазмы и больше время пролета в слое, тем меньше возникающая погрешность. При скорости плазмы ~100 км/с ошибка в определении толщины слоя составляет ~300 км, что, как правило, <5% от измеряемой величины. В ряде случаев переход от значений характерных для LLBL к значениям, например, MPR является плавным, что затрудняет установление точной границы между слоями. Такие события требуют проведение подробного численного анализа параметров плазмы. В некоторых событиях характер изменения разных параметров плазмы на границах слоя отличается друг от друга. Например, граница магнитослой – LLBL по температуре определена в одно время, а по концентрации – в другое. Величина разницы в определении границы LLBL по разным параметрам может достигать 3–9 с, то есть несколько отсчетов приборов спутника. При этом необходимо отслеживать одновременные изменения нескольких параметров плазмы для точного определения границ LLBL.

Применимость методики можно проверить при анализе результатов одновременных наблюдений на двух или более спутниках, пересекающих на близких расстояниях магнитопаузу и LLBL. LLBL прилегает к магнитопаузе, которая почти всегда быстро движется. При проведении одновременных измерений на двух спутниках, пересекающих LLBL и магнитопаузу на относительно близких расстояниях, можно определить скорость магнитопаузы и получить достаточно точную оценку толщины LLBL. Для этого определяется время между пересечениями магнитопаузы двумя спутниками, расстояние между спутниками, скорость магнитопаузы и границы MPR, их проекции на направление нормали к магнитопаузе. При этом необходимо, чтобы магнитопауза не меняла направление движения за время наблюдений. Дополнительно могут быть определены времена пересечения двумя спутниками границы MPR. Однако, в ряде случаев трудно бывает определить скорость данной границы.

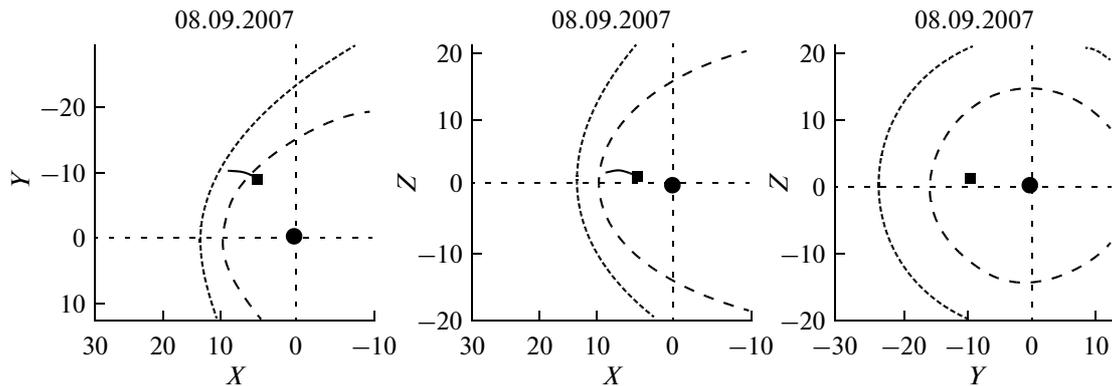


Рис. 2. Траектории спутников THEMIS-B и THEMIS-C в GSM координатах для события 8 сентября 2007 г. для интервала времени 06–12 UT.

При анализе результатов наблюдений на двух и более спутниках используется приближение, основанное на предположении о том, что все возмущения магнитопаузы имеют масштаб, намного превышающий расстояние между спутниками. Такое приближение оправдывает себя при небольшом времени наблюдения и малых расстояниях между спутниками не превышающих масштабы волн, распространяющихся вдоль магнитопаузы.

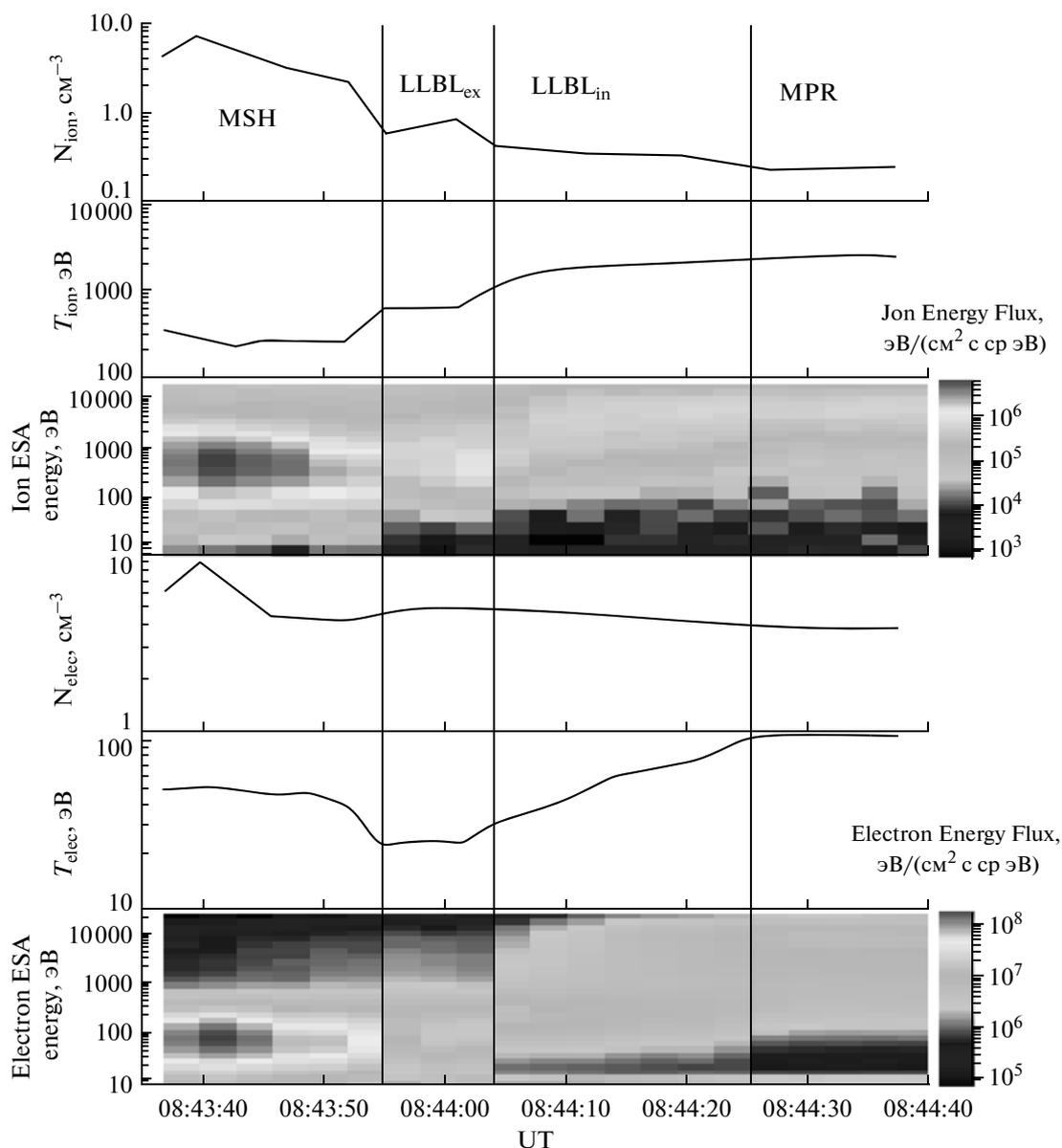
Как уже указывалось выше, при сильных флуктуациях магнитного поля вблизи магнитопаузы бывает трудно найти местоположение магнитопаузы. В этих случаях определяется МРВ, как было сделано в работе [Знаткова и др., 2011], и оценивается ее скорость. Определяется  $v_{\text{MPB}} = S/t_{\text{MPB}}$ , где  $S$  – расстояния между точками пересечения МРВ двумя спутниками,  $t_{\text{MPB}}$  – время между моментами пересечения. Далее, находится проекция найденной скорости на направление  $\mathbf{n}(v_{\text{MPB}}^{\perp})$  и рассчитывается толщина LLBL как  $L_{\text{LLBL}} = v_{\text{MPB}}^{\perp} t$ .

### 3. ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ LLBL СПУТНИКАМИ THEMIS-B И THEMIS-C 8 СЕНТЯБРЯ 2007 ГОДА

Проанализируем событие, в котором два спутника с малой разницей по времени и расстоянию пересекали магнитопаузу и LLBL. Рассмотрим пролеты спутников THEMIS-B и THEMIS-C 8 сентября 2007 года с 08:43:35 до 08:44:40 UT. В это время была достаточно спокойная геомагнитная обстановка:  $Dst = -10$  нТл,  $AU = 17$  нТл,  $AE = 32$  нТл,  $AL = -15$  нТл, компоненты межпланетного магнитного поля (ММП)  $B_x = -2.4$  нТл,  $B_y = 0.4$  нТл,  $B_z = -0.8$  нТл. Спутники летели из магнитослоя через LLBL в МРВ. На рисунке 2 показаны траектории спутников с 06 до 12 UT и модельное расположение магнитопаузы и ударной волны для

этого события с сайта <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>. Координаты спутника THEMIS-B для этого события в 08:44 UT составляют  $X_{\text{GSM}} = 7.9$ ,  $Y_{\text{GSM}} = -9.7$ ,  $Z_{\text{GSM}} = 1.6R_E$ , спутника THEMIS-C –  $X_{\text{GSM}} = 7.97$ ,  $Y_{\text{GSM}} = -9.7$ ,  $Z_{\text{GSM}} = 1.6R_E$ . Расстояние между спутниками было  $\sim 500$  км. Спутники находились достаточно близко друг к другу и поэтому на рис. 2 их траектории слились в одну кривую. Конечное положение спутников в 12:00 UT указано квадратом. На рисунках 3 и 4 представлены концентрация, температура и спектрограмма энергий ионов (1–3 панели сверху) и электронов (4–6 панели сверху) по данным спутников THEMIS-B (рис. 3) и THEMIS-C (рис. 4). Вертикальными линиями обозначены границы LLBL определенные по числовым данным спектрограмм энергий, температуры и концентрации ионов и электронов. Спутник THEMIS-B находился в LLBL с 08:43:55 до 08:44:25 UT (30 с), спутник THEMIS-C – с 08:43:51 до 08:44:24 UT (33 с). Граница между внутренним и внешним LLBL проходила в 08:44:07 UT по данным спутника THEMIS-B и в 08:44:06 UT для THEMIS-C. Эта граница была определена по зависимостям концентрации от температуры ионов и электронов. Данные зависимости показаны на рис. 5а и 5б. Зависимость четко прослеживается по графикам  $n(T)$  для электронов по данным спутника THEMIS-C и по графикам для ионов по данным обоих спутников в виде излома аппроксимационной кривой. По данным одного спутника время пролета в LLBL составляло 30 с, по данным другого спутника – 33 с. Разница времени пересечения, таким образом, составляет 3 с, что соответствует временному разрешению определения параметров плазмы. Из этого следует, что толщина LLBL мало менялась за время пересечения слоя спутниками.

Данные измерений показывают, что спутники пересекали резкую границу между плазмами магнитослоя и магнитосферы – МРВ. Согласно рис. 5а и 5б наблюдаются два близлежащих пере-



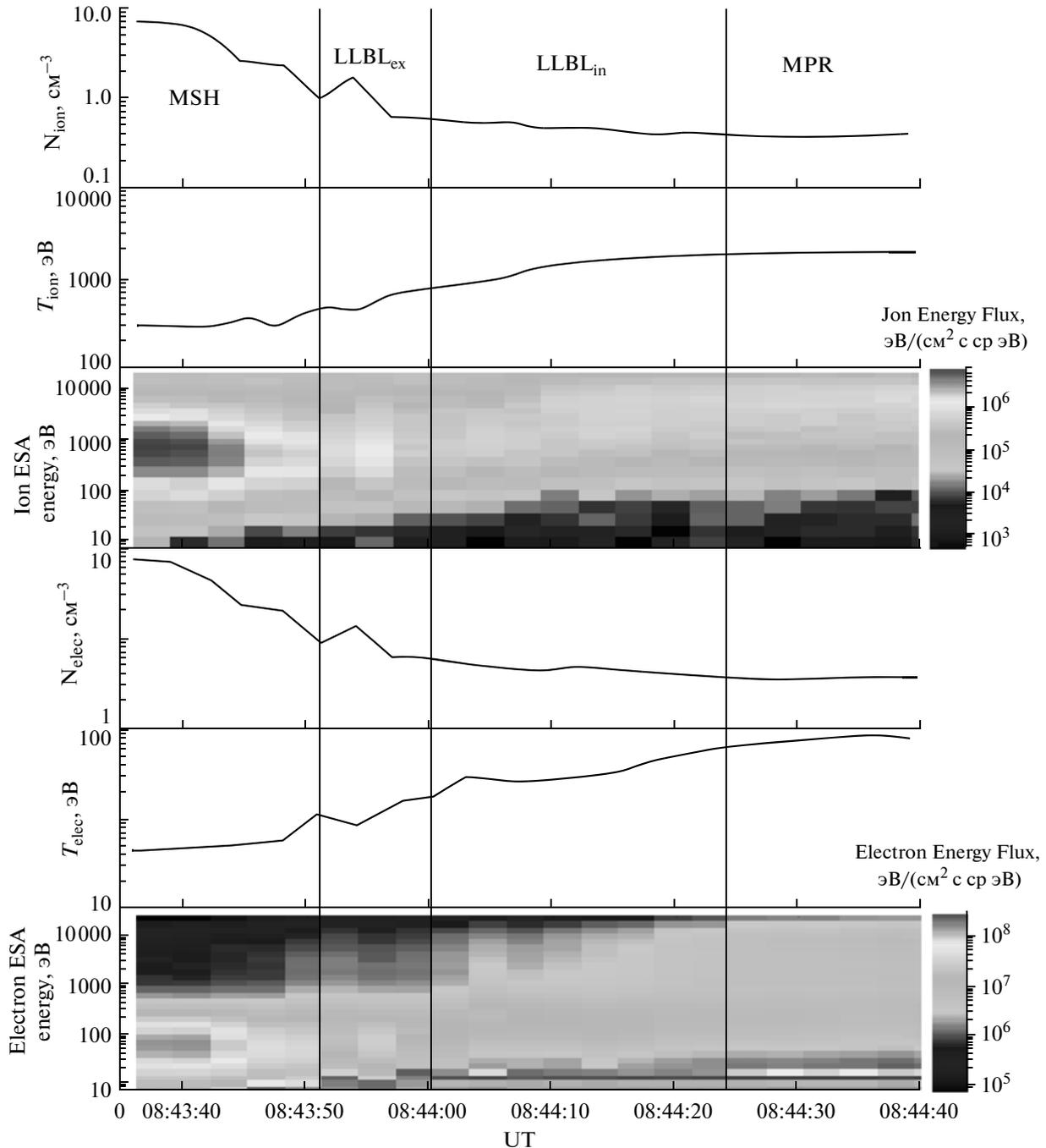
**Рис. 3.** Концентрация, температура и спектрограммы энергий ионов (1–3 панели сверху) и электронов (4–6 панели) для события 8 сентября 2007 года по данным прибора ESA спутника THEMIS-B. Спектрограммы изображены в черно-белой палитре, фиксирующей поток частиц  $10^3$ – $10^9$  эВ/( $\text{cm}^2$ -с-ср-эВ).

сечения MPB в 08:43:55 UT (THEMIS-B) и 08:43:51 UT (THEMIS-C) на расстоянии 490 км по X, 25 км по Y, 47 км по Z. Эти пересечения также представляют собой внешние границы LLBL. Интервал времени между пересечениями MPB составляет 4 с. Таким образом, скорость MPB, а значит и магнитопаузы вдоль отрезка, соединяющего спутники, 123 км/с.

Динамическое давление солнечного ветра для исследуемого события  $\approx 0.9$  нПа ( $D_p = 0.9$ ) по данным спутника WIND. Единичный вектор нормали к поверхности магнитопаузы, описанной формулой (1),  $\mathbf{n} = (0.34; -0.94; 0.04)$ . Расчет скорости

магнитопаузы в направлении перпендикулярном магнитопаузе дает  $\approx 48$  км/с. Скорости обоих спутников в этом событии не превышали 1 км/с ( $\sim 2\%$  от скорости магнитопаузы), что позволяет не учитывать движение спутников. Толщина слоя составляет 1420 км для THEMIS-B, 1584 км для THEMIS-C. Разница в толщине для этих пересечений составляет  $\sim 3\%$ .

Оценим толщину слоя для обоих спутников, используя усредненную по LLBL скорость плазмы. На рисунках 6а и 6б представлены три компоненты скорости ионов по данным обоих спутников. На рисунках указаны области внешнего и



**Рис. 4.** Концентрация, температура и спектрограммы энергий ионов (1–3 панели сверху) и электронов (4–6 панели) для события 8 августа 2007 года по данным прибора ESA спутника THEMIS-C. Спектрограммы изображены в черно-белой палитре, фиксирующей поток частиц  $10^3$ – $10^9$  eV/(cm<sup>2</sup>-с-ср-эВ).

внутреннего LLBL и границы слоя прилегающие к магнитослою и MPR. Из рисунков 6а и 6б следует, что компоненты скорости флуктуируют внутри LLBL. Усредненные компоненты скорости могут отличаться от мгновенной на величину до 100 км/с. Плавный переход от значений магнитослоя к значениям плазменного слоя наблюдается только

для компоненты  $v_y$  ионов, измеренной на спутнике THEMIS-B и во внутреннем LLBL. По данным приборов спутника THEMIS-B усредненные компоненты скорости ионов внутри слоя составляют  $\mathbf{v} = (14.6; -41.7; 7.6)$ , полное значение скорости ионов 44.8 км/с, в направлении  $\mathbf{n}$  эта скорость равна ~44 км/с. По данным приборов спут-

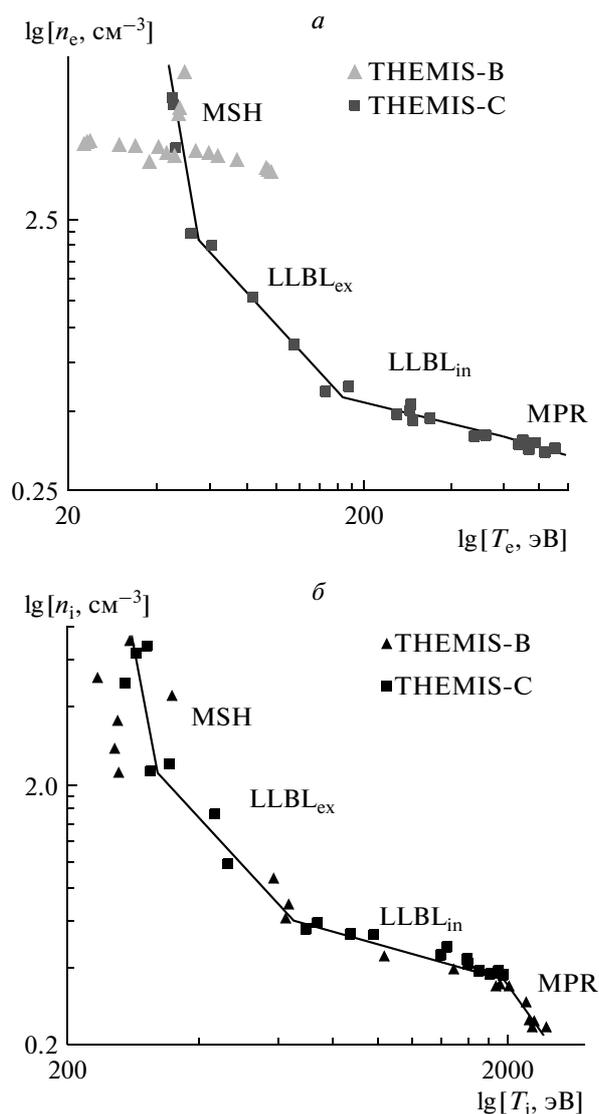


Рис. 5. Зависимость концентрации электронов (а) и ионов (б) от температуры. Треугольники – данные THEMIS-B, квадраты – THEMIS-C.

ника THEMIS-C компоненты усредненной скорости  $\mathbf{v} = (-18; -66; -0.5)$ , ее полное значение 68 км/с, а проекция в направлении  $\mathbf{n}$  составляет

~56 км/с. То есть усредненная скорость в пределах 15% совпадает с определенной скоростью магнитопаузы. Толщина LLBL по данным спутника THEMIS-B для этого метода расчета составит 1320 км, по данным THEMIS-C – 1845 км. Толщина слоя, оцененная по усредненной скорости плазмы по данным THEMIS-B меньше толщины оцененной по скорости магнитопаузы по данным двух спутников на 1%, а толщина слоя, оцененная по данным спутника THEMIS-C больше толщины оцененной через скорость магнитопаузы на 10%.

В таблице представлены результаты определения толщины слоя при его разделении на внешний и внутренний LLBL: усредненные компоненты скоростей, проекция скорости в направлении  $\mathbf{n}$ , время, проведенное спутником в каждой части слоя. Толщина слоя по данным THEMIS-B составила 1425 км (где 1160 и 265 км – толщины внешнего и внутреннего LLBL соответственно), что на ~8% больше толщины слоя, рассчитанной по усредненной по всему слою скорости плазмы и на ~7% больше толщины, рассчитанной с использованием скорости магнитопаузы. По данным спутника THEMIS-C эта толщина равна 1760 км (1044 и 715 км), что больше толщин оцененных другими способами на 5% и 4% соответственно. Данные оценки показывают, что разделение слоя на внешний и внутренний LLBL практически не приводит к изменению точности вычисления толщины слоя, что позволяет не учитывать данную особенность при определении толщины LLBL.

Можно выделить следующие особенности усредненных значений скоростей для данного события:

- Во внешнем LLBL все компоненты скоростей отрицательны по данным обоих спутников, то есть плазма двигалась от Солнца, учитывая, что спутник находился в утренней области магнитоферы ( $Y_{GSM} < 0$ ). Во внутреннем LLBL есть и положительные и отрицательные усредненные значения скоростей, что говорит об изменившемся характере течения плазмы при переходе от внешнего во внутренний LLBL.

#### Скорости плазмы и время пролета в LLBL

Параметр/Спутник	THEMIS-B		THEMIS-C	
	Внешний LLBL	Внутренний LLBL	Внешний LLBL	Внутренний LLBL
$\langle v_x \rangle$ , км/с	-27	38	-65	15
$\langle v_y \rangle$ , км/с	-114	-0.6	-117	-30
$\langle v_z \rangle$ , км/с	-32	31	-26	19
$ \langle v \rangle _n$ км/с	97	15	87	34
$T$ , с	12	18	12	21

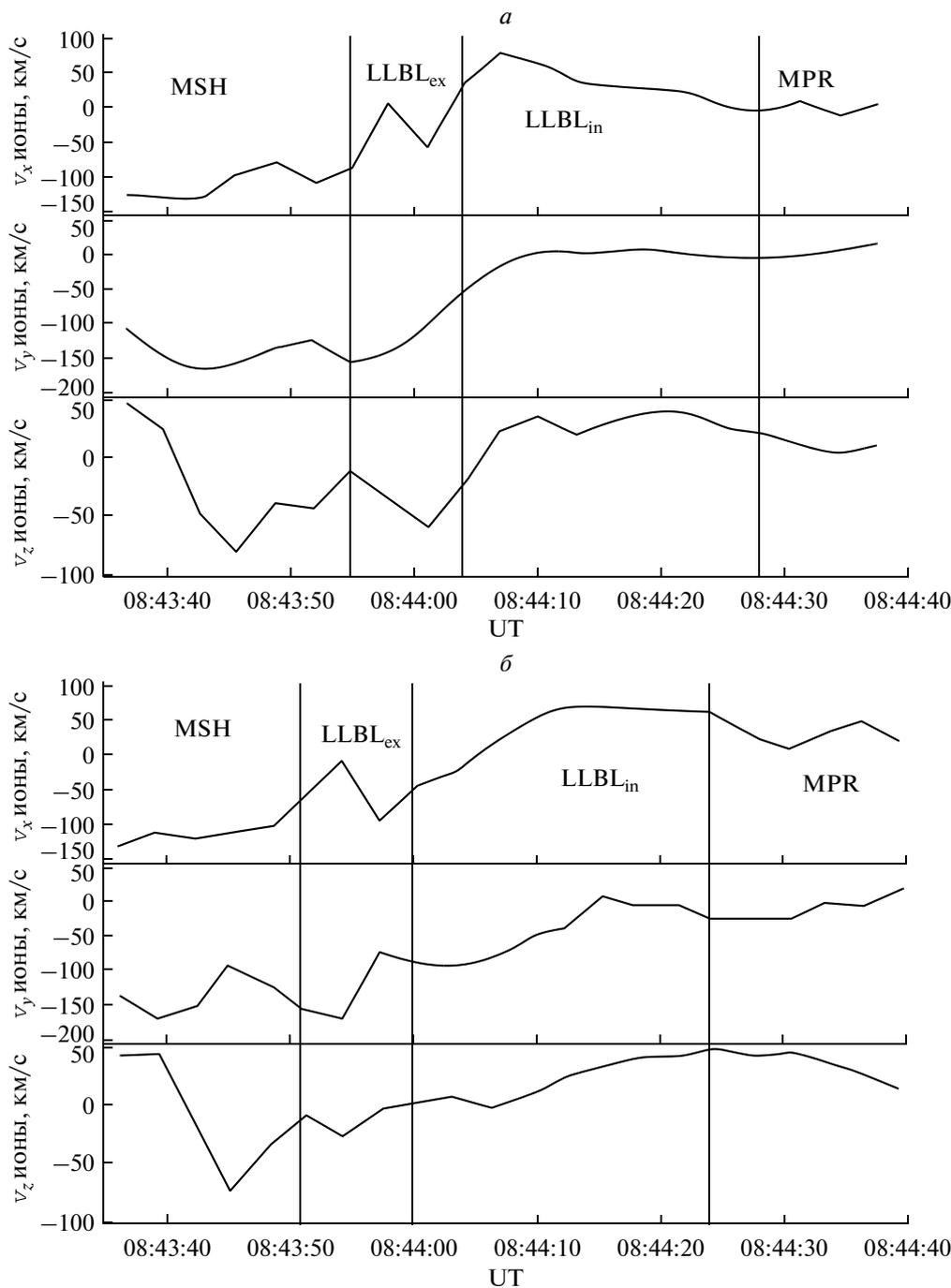


Рис. 6. Компоненты скорости для события 8 августа 2007 года по данным прибора ESA спутника THEMIS-B (а) и THEMIS-C (б).

• Во внешнем LLBL компонента скорости  $v_y$  имеет наибольшее значение среди всех трех компонент, что говорит о доминирующем течении плазмы вдоль границы магнитосферы в плоскости эклиптики (рис. 2). Во внутреннем LLBL компонента скорости  $v_y$  имеет наименьшее значение по данным спутника THEMIS-B, но по

данным THEMIS-C как и во внешнем LLBL  $v_y$  доминирует.

• Значение скорости плазмы во внешнем LLBL больше, чем во внутреннем в 2 и больше раз, что указывает на близость внешнего LLBL к магнитослою, где скорость плазмы больше, чем в магнитосфере. При этом скорости плазмы внутри маг-

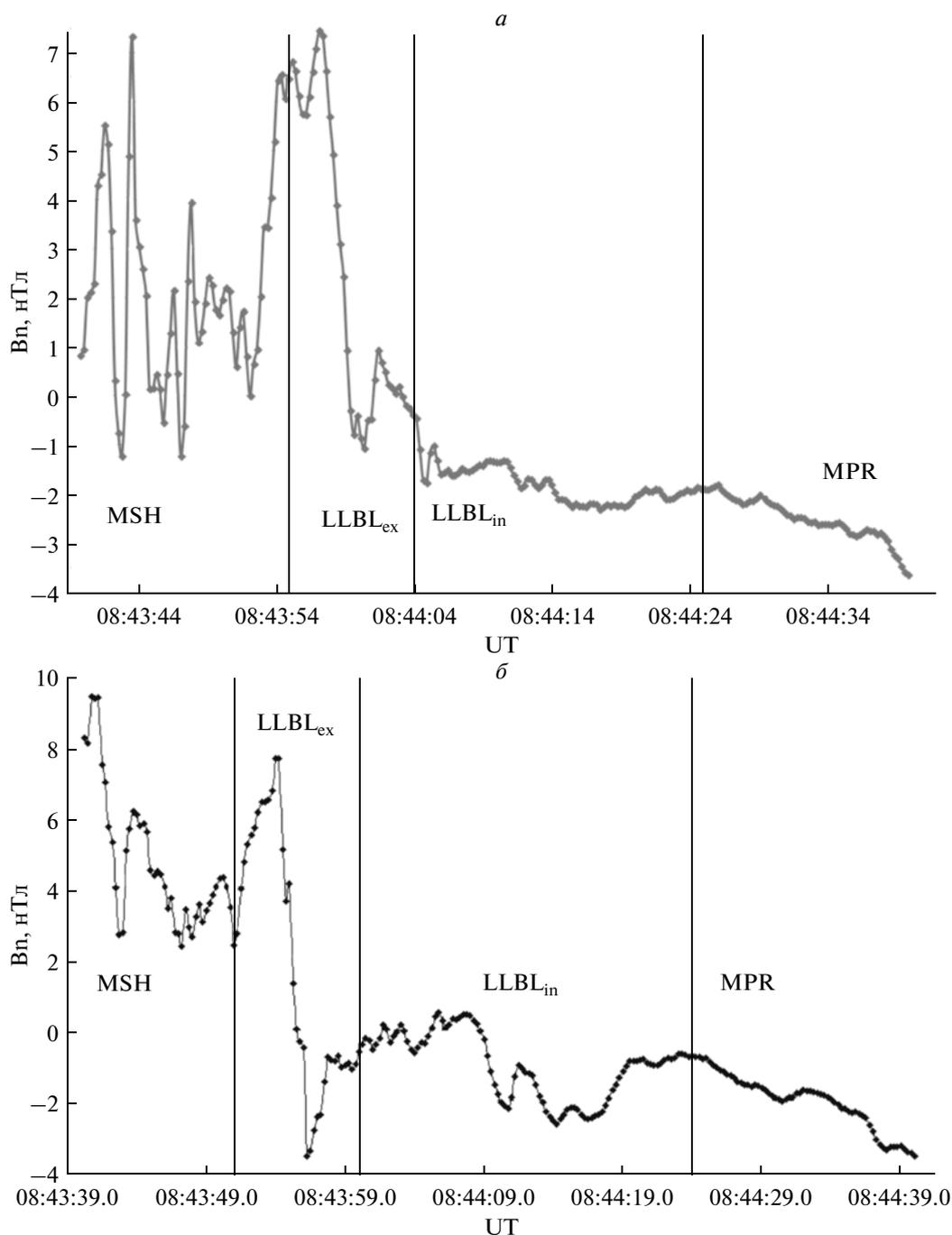


Рис. 7. Магнитное поле по данным прибора FGM спутника THEMIS-B (а) и THEMIS-C (б).

нитослоя превышают скорости плазмы во внешнем и внутреннем LLBL.

Значения температуры ионов и электронов и компоненты скоростей плазмы во внутреннем LLBL (см. рис. 3, 4, 6а и 6б) меняются более плавно, чем во внешнем. Несмотря на небольшой интервал наблюдения (12–15 с), во внешнем LLBL наблюдаются флуктуации скорости на 50–70 км/с. Во внутреннем LLBL флуктуации скорости дости-

гают не более 20 км/с. На рисунках 7а и 7б представлены значения магнитного поля  $B_n$  в направлении  $\mathbf{n}$  по данным спутников THEMIS-B и THEMIS-C соответственно. Во внешнем LLBL компонента магнитного поля  $B_n$  меняет знак по данным обоих спутников и сильно флуктуирует. Обращение в ноль нормальной к магнитопаузе компоненты магнитного поля говорят о том, что исследуемые пересечения имеют признаки, харак-

терные для тангенциального разрыва. Во внутреннем LLBL  $V_n$  почти всегда отрицательно и флуктуирует слабо. Таким образом, параметры плазмы и магнитного поля сильно флуктуируют во внешнем LLBL и плавно изменяющийся во внутреннем.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе описана методика определения толщины LLBL по данным одного спутника при известной скорости плазмы в слое и направлении нормали к магнитопаузе, выделены ограничения данной методики. В соответствии с методикой требуется определение скорости плазмы усредненной по всему слою или двум частям слоя. Методика протестирована по данным близлежащих пересечений слоя двумя спутниками для события 8 сентября 2007 г., при которых удается сравнительно точно определить толщину слоя.

Показано, что методика дает возможность оценить толщину слоя с точностью  $\sim 10\%$ , по сравнению с более точным методом, в котором используются данные двух спутников. Такая точность позволяет даже при сильных флуктуациях параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое оценить толщину LLBL с достаточно хорошей точностью при наличии данных одного спутника.

Проведенный анализ вариаций концентрации и температуры плазмы поперек слоя продемонстрировал разделение LLBL на внутренний и внешний слои. Учет такого разделения не привел к увеличению точности методики. Данный анализ показал, что в пределах  $\sim 10\%$  точности имеет место совпадение величин, полученных разными методами.

Необходимо отметить, что при пересечениях тонких структур с масштабами  $\sim 300$  км необходимо учитывать разрешение приборов, измеряющих функцию распределения плазмы каждые 3 с.

В работе были проанализированы компоненты скорости плазмы во внешнем и внутреннем LLBL. Было показано, что во внешнем LLBL усредненное направление движения плазмы в целом совпадает с направлением движения плазмы в магнитослое. Во внешнем LLBL, как и в магнитослое, присутствуют сильные флуктуации компонент скорости, концентрации и температуры плазмы. Но значения этих параметров плазмы являются промежуточными между значениями в магнитослое и MPR. Во внутреннем LLBL характер изменения параметров плазмы и магнитного поля становится плавным, как внутри магнитосферы.

При оценке толщины LLBL возможны погрешности, связанные с определением границ слоя из-за плавности или не одновременности перехода параметров плазмы от значений LLBL к значениям MPR или магнитослоя. Кроме того, существует по-

грешность, связанная с неточностью модели магнитопаузы. Приведенные результаты показывают, что несмотря на указанные неточности методики и трудности при определении границ LLBL, возможно достаточно точно (с точностью  $\sim 10\text{--}15\%$ ) определить толщину слоя даже при флуктуациях параметров плазмы и магнитного поля внутри LLBL и в магнитослое при внимательном детальном анализе спутниковых данных. Описанная методика позволит при наборе статистики получить зависимость толщины слоя от параметров солнечного ветра и геомагнитной активности.

Авторы выражают благодарность группе разработчиков проекта THEMIS и группе поддержки сайтов спутниковых данных <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> и <http://THEMIS.ssl.berkeley.edu/>.

Авторы признательны V. Angelopoulos и участникам NASA гранта NAS5-02099 за использование и подготовку данных проекта THEMIS. В особенности: С.W. Carlson и J.P. McFadden за использование данных прибора ESA, К.H. Glassmeier, U. Auster и W. Baumjohann за использование данных инструмента FGM, подготовленных под руководством Technical University of Braunschweig и с финансовой поддержкой Германского Министерства Экономики и Технологии, а так же Германским Центром Авиации и Космоса (DLR) в рамках контракта 50 ОС 0302.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грантами № 12-02-31224, 12-05-00984 и 12-02-00217.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова Е.Е., Кирпичев И.П., Рязанцева М.О., Маршин Б.В., Пулинец М.С., Знаткова С.С., Степанова М.В. Магнитосферная суббурия и дискретные дуги полярного сияния // Вест. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. № 6. С. 31–38. 2012.
- Веригин М.И., Котова Г.А., Безруких В.В., Застенкер Г.Н., Николаева Н. Аналитическая модель околоземной магнитопаузы по данным спутников “Прогноз” и “Интербол”. // Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 1. 133–137. 2008.
- Знаткова С.С., Антонова Е.Е., Застенкер Г.Н., Кирпичев И.П. Баланс давлений на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки по данным наблюдений спутников проекта THEMIS // Космич. исслед. Т. 49. № 1. С. 5–23. 2011.
- Николаева Н., Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З., Ноздрачев М.Н., Романов С.А., Ермолаев Ю.И., Эйсмонт Н.А. Об источниках и амплитудах движения магнитопаузы // Космич. исслед. Т. 36. № 6. С. 576–588. 1998.
- Пулинец М.С., Рязанцева М.О., Антонова Е.Е., Кирпичев И.П. Зависимость параметров магнитного поля вблизи подсолнечной точки магнитосферы от межпланетного магнитного поля по данным эксперимента THEMIS // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 6. С. 769–778. 2012.

- *Россоленко С.С., Антонова Е.Е., Ермолаев Ю.И., Веригин М.И., Кирпичев И.П., Бородкова Н.Л.* Турбулентные флуктуации параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое и формирование низкоширотного погранслоя: многоспутниковые наблюдения 2 марта 1996 г. // *Космич. исслед.* Т. 46. № 5. С. 387–397. 2008.
- *Савин С.П.* Магнитопауза и пограничные слои магнитосферы // *Плазменная гелиофизика.* Т. 1. С. 398–411. 2008.
- *Савин С.П.* Нелинейные взаимодействия и перенос плазмы на границе магнитосферы // Lambert, Academic publishing. 434 С. 2012.
- *Antonova E.E.* Quasiturbulent transport and LLBL properties // *Adv. Space Res.* V. 37. P. 532–536. 2006.
- *Antonova E.E.* The structure of the magnetospheric boundary layers and the magnetospheric turbulence // *Planet. Space Sci.* V. 53. P. 161–168. 2005.
- *Antonova E.E., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L., Pulinets M.S., Znatkova S.S., Orlova K.G., Stepanova M.V.* Topology of High-Latitude Magnetospheric Currents // *IAGA Special Sopron Book Series.* V. 3: The Dynamic Magnetosphere. Ed. William Liu and Masaki Fujimoto. Springer. P. 2001–2010. 2011.
- *Antonova E.E., Pulinets M.S., Riazantseva M.O., Znatkova S.S., Kirpichev I.P., Stepanova M.V.* Turbulence in the magnetosheath and the problem of plasma penetration inside the magnetosphere // Chapter 18: Exploring the solar wind. Ed. M. Lazar. INTECHOPEN.COM, ISBN 978-953-51-0339-4. P. 417–438. 2012.
- *Dmitriev A.V., Suvorova A.V.* Three-dimensional artificial neural network model of the dayside magnetopause // *J. Geophys. Res.* V. 105(A8). P. 18.909–18.918. 2000.
- *Dušik Š., Šafránková J., Němeček Z.* A study of LLBL profile using n-T plots // *WDS'07 Proc. Contributed Papers.* Part II. P. 42–49. 2007.
- *Eastman T.E., Hones W.E.* Characteristics of the Magnetospheric Boundary Layer and Magnetopause Layer as Observed by Imp 6 // *J. Geophys. Res.* V.84(5). 2019–2028. 1979.
- *Fedorov A., Budnik E., Stenuit H., Moreau T., Sauvaud J.-M.* Antiparallel reconnection as a possible source of high- and low-latitude boundary layer // *Earth's Low-Latitude Boundary Layer.* Ed. P.T. Newell and T. Onsager. AGU Monograph. Washington. DC. № 133. 139–148. 2003.
- *Haerendel G., Pashmann G., Scopke N., Rosenbauer H., Hedgecock C.* The frontside boundary layer of magnetosphere and the problem of reconnection // *J. Geophys. Res.* V. 83(A7). 3195–3216. 1978.
- *Hargood M.A., Bryant D.A.* Exploring the magnetopause boundary layer // *Planet Space Sci.* V. 40. P. 1431–1459. 1992.
- *Howe H.C., Jr., Binsack J.H.* Explorer 33 and 35 plasma observations of magnetosheath flow // *J. Geophys. Res.* V. 77(19). P. 3334–3344. 1972.
- *Mitchell D.G., Kutchko F., Williams D.J., Eastman T.E., Frank L.A., Russell C.T.* An extended study of the low-latitude boundary layer on the dawn and dusk flanks of the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 92(7). P. 7394–7404. 1987.
- *Rossolenko S.S., Antonova E.E., Yermolaev Yu.I., Kirpichev I.P., Borodkova N.L., Budnik E.Yu.* Formation and characteristics of low latitude boundary layer // *Adv. Space Res.* V. 41(10). P. 1545–1550. 2008.
- *Rossolenko S.S., Antonova E.E., Yermolaev Yu.I., Kirpichev I.P., Lutsenko V.N., Borodkova N.L.* Plasma sheet and magnetosheath plasma mixing in LLBL: Case study // *Adv. Space Res.* V. 38(8). P. 1744–1749. 2006.
- *Šafránková J., Němeček Z., Prěch L., Šimůnek J., Sibeck D., Sauvaud J.-A.* Variations of the flank LLBL thickness as response to the solar wind dynamic pressure and IMF orientation // *J. Geophys. Res.* V. 112. A07201, doi:10.1029/2006JA011889. 2007.
- *Shi Q.Q., Zong Q.G., Zhang H. et al.* Cluster observations of the entry layer equatorward of the cusp under northward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 114. A12219. doi: 10.1029/2009JA014475. 2009.
- *Sibeck D.G., Lopez R.E., Roelof E.C.* Solar wind control of the magnetopause shape, location, and motion // *J. Geophys. Res.* V. 96(A4). P. 5489–5495. 1991.
- *Shue J.-H., Song P., Russel C.T. et al.* Magnetopause location under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* V. 103(A8). P. 17691–17700. 1998.
- *Tátrallyay M., Erdős G., Németh Z., Verigin M.I., Vennerstrom S.* Multispacecraft observations of the terrestrial bow shock and magnetopause during extreme solar wind disturbances // *Ann. Geophys.*, 30, 1675–1692. 2012. doi:10.5194/angeo-30-1675-2012
- *Vaisberg O.L., Smirnov V.N., Avakov L.A., Waite J.H., Burch J.L., Russell C.T., Skalsky A.A., Dempsey D.L.* Observation of isolated structures of the low latitude boundary layer with the Interball Tail Probe // *Geophys. Res. Lett.* V. 25(23). P. 4305. 1998.
- *Wang, C.-P., Lyons L.R., Nagai T., Weygand J.M., Lui A.T.Y.* Evolution of plasma sheet particle content under different interplanetary magnetic field conditions // *J. Geophys. Res.* V. 115. A06210. doi:10.1029/2009JA015028. 2010.