

УДК 524.1:550.385

СТРУКТУРА ШИРОТНОГО ПРОФИЛЯ СКЛ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ СУББРЕВОЙ АКТИВНОСТИ 26–27 ОКТЯБРЯ 2003 г.

© 2010 г. Л. Л. Лазутин, С. Н. Кузнецов

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Московского Государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия

E-mail: ll@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 19.08.2009 г.

После доработки 15.10.2009 г.

В работе исследуется структура проникновения солнечных космических лучей (СКЛ) с энергией 1–100 МэВ в магнитосферу Земли перед экстремально сильной магнитной бурей 29–31 октября 2003 г. по данным спутника КОРОНАС-Ф. Эффект северо-южной асимметрии наблюдался в полярных шапках более 12-ти ч, что позволило исследовать динамику границы между полярной шапкой (хвостом магнитосферы) и авроральной зоной (областью квазизахвата). В авроральной магнитосфере обнаружен не известный ранее эффект провалов в широтном профиле интенсивности СКЛ во время активных фаз суббури. Предложен механизм образования провалов из-за локального искажения конфигурации силовых линий магнитного поля, приводящего к радиальной диффузии частиц из этой области.

1. ВВЕДЕНИЕ

В конце октября 2003 г. серия солнечных вспышек вызвала несколько сильных магнитных бурь, начавшихся с SC в 0.6:12 UT 29.10.2003 г. Эти бури привлекли внимание исследователей, в частности большим коллективом отечественных авторов была опубликована обзорная статья [Панасюк и др., 2004]. В этой работе, в частности, анализировались измерения солнечных протонов на полярном спутнике КОРОНАС-Ф, было проведено сравнение потоков СКЛ в магнитосфере с потоками в межпланетном пространстве и следована динамика границы проникновения протонов с энергией 1–50 мэВ в глубь магнитосферы. Более подробно эти измерения анализировались в работе [Лазутин и др., 2007], где был исследован эффект захвата СКЛ солнечных космических лучей в протонный пояс Земли. В данной работе мы возвращаемся к измерениям СКЛ на спутнике КОРОНАС-Ф в предшествующий период 26–27.10.2003 г. когда необычные провалы в широтных профилях протонов, проникающих в магнитосферу, позволили определить особенности конфигурации магнитосферы во время суббури.

В области низких энергий (1–50 МэВ), о которых и будет идти речь в данной работе, велико влияние конфигурации магнитосферы на пространственное распределение частиц в полярной шапке и области квазизахвата. Все разнообразие наблюдаемых эффектов: свободное проникновение в полярную шапку вдоль магнитных силовых линий, асимметрия утренней и вечерней границ проникновения СКЛ и различия в потоках ча-

стиц, измеряемых в северной и южной полярных шапках, — связано с глобальной конфигурацией магнитосферы и ее локальных особенностей. Особенно переменчив характер проникновения СКЛ в авроральную зону, на замкнутые силовые линии. Известны случаи накопления солнечных протонов, квазизахват, в результате чего при переходе от полярной шапки в авроральную зону регистрируемый поток частиц возрастает, в других случаях такого возрастания не происходит (см. обзор Переясловой, [1982]).

Обсуждая новый эффект — провалы в широтном профиле интенсивности СКЛ во время активных фаз суббури, мы используем измерения СКЛ как источник информации о конфигурации магнитосферы.

2. ВСПЫШКА СКЛ И СОСТОЯНИЕ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

Потоки СКЛ с энергиями 1–5 МэВ в межпланетном пространстве появились 23 октября, когда активная область 0486 вышла из-за восточного лимба Солнца. 26 октября в 18:19 UT в области 0484 произошла вспышка балла X1.2, ее координаты N02W38. В этой вспышке генерировались протоны с энергией >165 МэВ (данные ИСЗ GOES). На рис. 1 представлены ключевые параметры солнечного вектра и индексы магнитной активности. Скорость солнечного ветра была умеренной, в максимуме не больше 600 км/с, динамическое давление солнечного ветра лишь в отдельные моменты поднималось до 2 нПа. Вх компонент межпланетного магнитного поля на

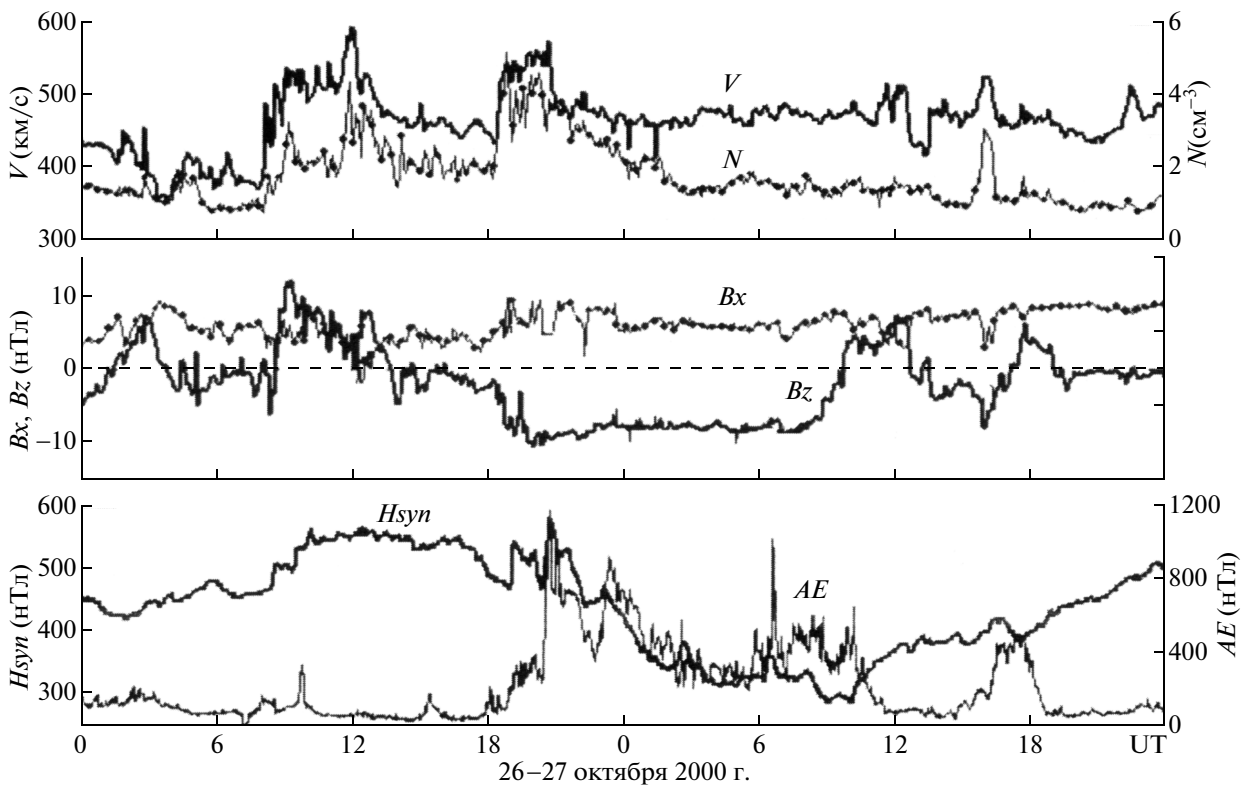


Рис. 1. Обстановка в околоземном межпланетном пространстве и геомагнитные возмущения 26–27 октября 2003 г. Сверху вниз: скорость V и плотность N солнечного ветра, B_x и B_z компонент межпланетного поля, H_{syn} и AE индексы геомагнитной возмущенности.

протяжении рассматриваемого периода был положительным, то есть Земля находилась в одном и том же секторе межпланетного поля. Единственным возмущающим фактором можно считать B_z компонент межпланетного магнитного поля, который в первую половину 26-го и вторую половину 27 октября флуктуировал вблизи нуля или был положителен, но вскоре после вспышки стал отрицательным, и отрицательное значение держалось около 13 ч (рис. 1). В результате, с 19:00 UT 26 октября начался длительный интервал суббурь, завершившийся в 10:00 UT 27 октября.

3. СКЛ В МАГНИТОСФЕРЕ

КОРОНАС-Ф измерял поток протонов в четырех энергетических интервалах, 1–5, 16–26, 26–50 и 50–90 МэВ. Приведенное на рис. 2 сравнение измерений на ИСЗ КОРОНАС-Ф в полярных шапках с измерениями в межпланетном пространстве на спутнике АСЕ показывает, что потоки имеют одинаковый временной ход и близки по величине. Сильная анизотропия потоков наблюдается одновременно в течение необычно продолжительного периода с 22:00 UT 26 октября до 12:00 UT 27-го. Слабая анизотропия противоположного знака, наблюдавшаяся до 20 ч 26 октября

и после 12:30 UT 27-го на спутнике, связана с условиями ориентации спутника в северной и южной шапках.

На рис. 3 сравниваются структуры потоков протонов СКЛ 27-го вблизи полуночи в северном и южном полушариях. В условиях слабой анизотропии потоков в межпланетном пространстве (см. рис. 2) потоки протонов в полярных шапках практически одинаковы. При анизотропии потоков в межпланетном пространстве и отрицательном B_z поток протонов в северной шапке существенно меньше, чем поток в южной.

На рис. 4 совмещены пролеты спутника в вечерних секторах южного и северного полушария. В северной полярной шапке наблюдается пониженный поток протонов по сравнению с южной, но он увеличивается на замкнутых силовых линиях и сравнивается с южным на $L = 10–12$ (71° исправленной геомагнитной широты), указывая нам на начало области квазизахвата. Здесь потоки протонов в сопряженных точках выравниваются. Такая структура границ авроральной зоны во время суббурь соответствует результатам классических работ по конфигурации овала полярных сияний [Старков и Фельдштейн, 1967; Старков, 1994]. Экваториальная граница квазизахвата дошла до $L = 4$, где в это время находится граница

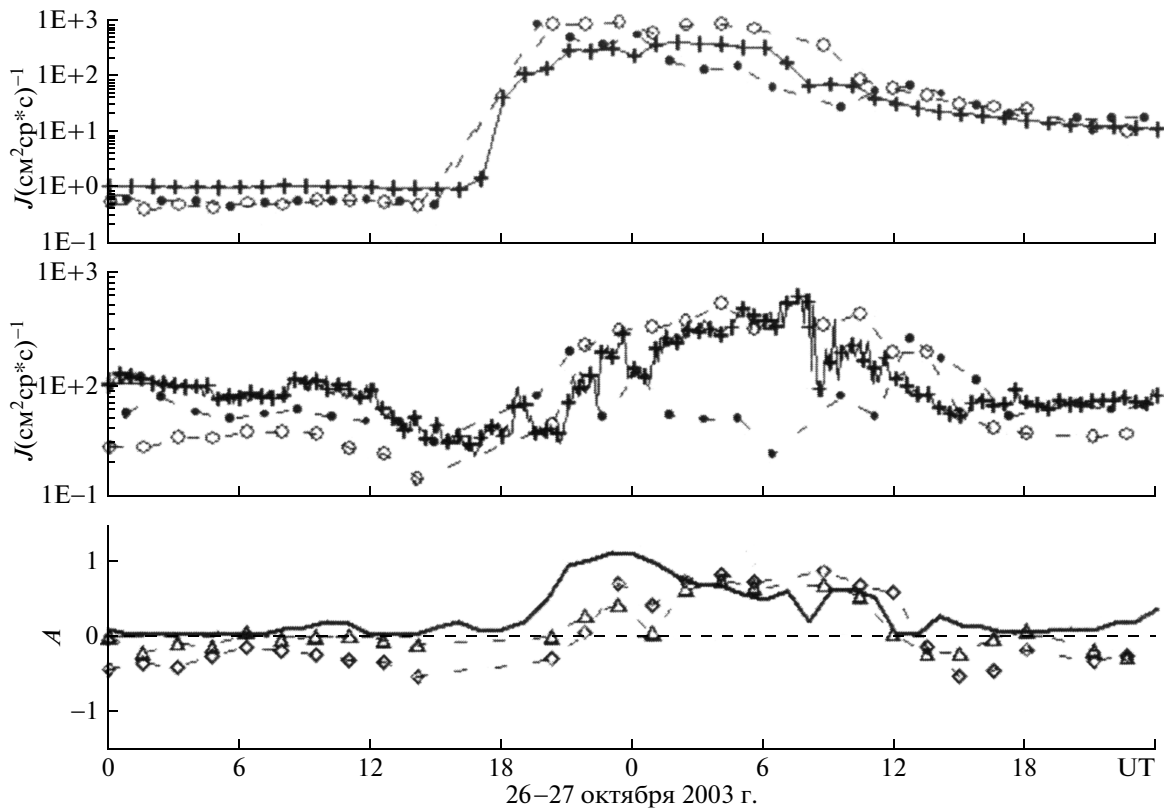


Рис. 2. Потоки солнечных космических лучей 26–27 октября 2003 г. Верхний блок: потоки протонов 14–26 МэВ в южной полярной шапке (кружки), в северной полярной шапке (точки), протоны >10 МэВ по данным ИСВ АСЕ (линия); средний блок: панель протоны 1–5 МэВ в полярных шапках и протонов 1.06–1.92 МэВ по данным АСЕ; нижний блок – анизотропия СКЛ: протоны 1–5 МэВ (ромбы), – протоны 14–26 МэВ (треугольники), протоны АСЕ (линия).

проникновения протонов СКЛ. Тот факт, что во время этой серии суббурь эта граница сдвигается на субавроральные широты, был отмечен в коллективной работе по экстремальной активности в октябре 2003 г. [Панасюк и др., 2004].

На рис. 5 суммированы результаты регистрации положения границ проникновения протонов с энергией 1–5 МэВ в зависимости от местного времени и направления вертикального компонента ММП и границы между полярной шапкой и авроральной зоной (областью квазизахвата).

Пунктирными линиями на рис. 5 показаны аппроксимации суточного хода этих границ по формулам:

$$\begin{aligned} \text{ГП}(B_z \sim 0) &= 67.27 - 1.97 \cos((\text{MLT} - 22.26) \times 15) \\ \text{ГП}(B_z < 0) &= 64.96 - 3.89 \cos(\text{MLT} \times 15) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{ГПШ}(B_z < 0) = 73.68 - 2.26 \cos((\text{MLT} - 18.2) \times 15).$$

Зависимость границы проникновения от знака B_z не наблюдается в полуденные часы, тогда как в широком секторе с вечера до утра переход от $B_z \sim 0$ к $B_z < 0$ приводит к смещению границ проникновения на существенно меньшие широты, что очевидно связано с суббревовой активностью.

4. СКЛ И СУББУРИ 26–27.10.2003 г.

В интересующем нас интервале широтные профили проникающих в магнитосферу протонов отличались необычной неоднородностью по широте и изменчивостью во времени. Обычно и в спокойное время, и во время магнитной бури, широтный профиль равный, лишь иногда встречаются возрастания в авроральной области. Но в исследуемый период профиль заметно менялся от пролета к пролету. Особенно необычными выглядели короткие спады интенсивности, провалы в радиальных профилях протонов СКЛ.

На рис. 6а–г приводятся четыре примера таких радиальных профилей протонов 26–27.10.2003 г.

Прежде всего, обращает на себя внимание тот факт, что провалы имеют разную амплитуду в зависимости от энергии – эффект в канале 1–5 МэВ меньше (рис. 6а и 6д), чем в старших энергетических каналах, или вовсе отсутствует (рис. 6б и 6с). Далее, диапазон широт, охваченных провалом, сильно варьирует, в первом примере он охватывает L -оболочки от 6 до 11, в последнем – от 5 до 6.5. Мы наблюдаем провалы как в ночном, так и в дневном секторе. Первый по времени регистрировался в 19:20 UT 26 октября, последний – в 8:45

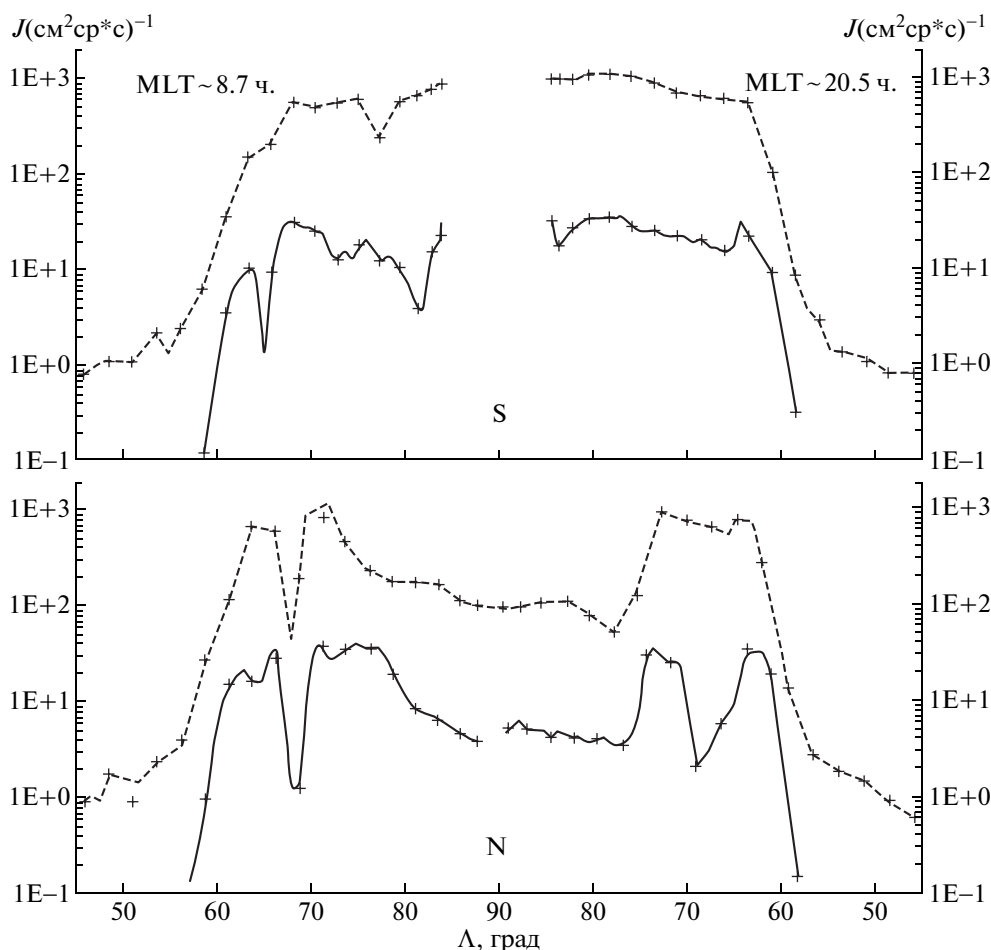


Рис. 3. Протоны 1–5 МэВ (пунктирная линия) и 14–26 МэВ 27 октября в северной (верхний блок) и в южной полярных шапках.

УТ 27 октября, что совпадает с началом и концом 13-часового периода повышенной суббуревой активности.

Характерно, что все провалы регистрируются в зоне квазизахвата между границей полярной шапки и границей проникновения. Это видно на рис. 7, где приведены результаты измерения положения границы проникновения протонов с энергией 14–26 МэВ в спокойные часы и во время серии суббурь, положение границы полярной шапки и верхняя и нижняя широты измеренных провалов в зависимости от местного времени. Аппроксимационные кривые выглядят следующим образом:

$$\Lambda p(B_z \geq 0) = 62.94 - 0.62 \cos((MLT - 18.6) \times 15)$$

$$\Lambda p(B_z > 0) = 61.86 - 0.8 \cos((MLT - 18.9) \times 15)$$

$$\Lambda p(\pi 1) = 66.19 - 1.23 \cos((MLT - 22.37) \times 15) \quad (2)$$

$$\Lambda p(\pi 2) = 69.47 - 2.18 \cos(MLT \times 15 - 23.7)$$

$$\Lambda p(B_z < 0) = 75.8 - 3.87 \cos((MLT - 21.2) \times 15).$$

Мы видим, что в условиях слабого давления солнечного ветра смена знака B_z приводит лишь к небольшому смещению границы проникновения протонов на $\sim 1^\circ$ по широте при всех локальных временах.

Из рассмотрения широтных профилей от пролета к полету видно, что провалы с различной глубиной и положением чередуются приблизительно в равном количестве с более-менее равномерными широтными профилями. Что может вызывать такие быстрые и кратковременные провалы в интенсивности уже, казалось бы, глубоко проникнувших в магнитосферу и захватившихся частиц? В поисках ответа на этот вопрос мы обратились к магнитограммам авроральной зоны, наиболее подробно отражающим локальные особенности развития суббуревой активности.

На рис. 8 приведена магнитограмма H -компоненты обсерватории Ловозеро, на которой вертикальными черточками отмечены пролеты с наиболее четкими и глубокими провалами, а горизонтальными черточками обозначены времена

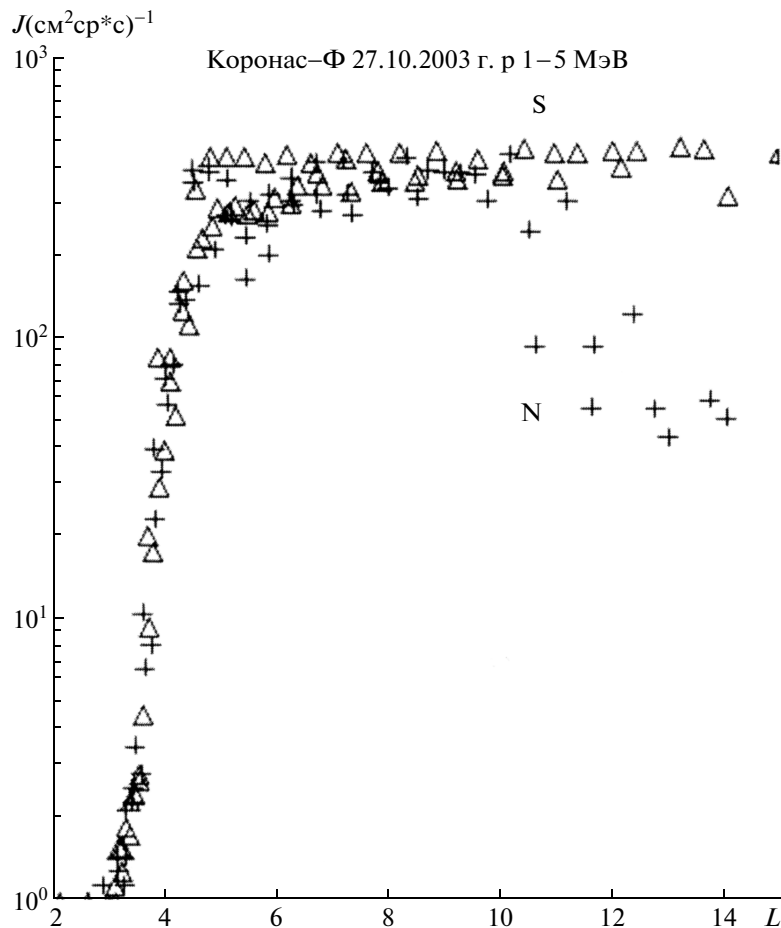


Рис. 4. Совмещение широтных профилей интенсивности солнечных протонов в северном и южном полушарии.

пролетов, когда профиль протонов был равномерным по широте. Из пяти пролетов с провалами три, кроме первого и последнего, совпадают с пиками бухтообразных возмущений, т.е. происходят в максимуме активной фазы суббури. Первый пролет совпадает с положительным возмущением магнитного поля — обсерватория Ловозеро находится в это время в вечернем секторе, к западу от разрыва Харанга и весьма вероятно, что и здесь мы попадаем на активную фазу суббури. И, наконец, последний, пятый пролет происходит когда обсерватория уже находится в утреннем секторе и бухтообразные возмущения слабо видны. Но и тут, когда магнитное поле восстанавливается после очередной активной фазы, в интересующий нас момент прерывается, величина H -компоненты магнитного поля не растет, и это прерывание есть следствие очередного бухтообразного возмущения. Таким образом, все пять провалов указывают на активную фазу суббури как на причину такого глубокого спада интенсивности протонов 1–50 МэВ. И наоборот, пролеты без очевидных провалов приходятся на периоды спада суббуровой активности, на фазу восстанов-

ления или (в цепочке суббурь они смыкаются) на подготовительную фазу следующей суббури. Зная, что суббури сопровождаются локальными кратковременными искажениями конфигурации магнитного поля авроральной магнитосферы, мы в этом и должны искать причину обнаруженного эффекта.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В этом разделе сначала рассмотрим проблему провалов СКЛ, затем суммируем результаты по динамике границ проникновения СКЛ и структурных границ магнитосферы.

5.1. Суббуревые провалы СКЛ

Суббуревая активность в авроральной зоне наблюдается часто, чуть ли не каждый день, почему же эффект провалов не был обнаружен раньше? В чем уникальность ситуации 26–27.10.2003 г? Дело в том, что помимо суббуревой активности, необходим приход к Земле повышенных потоков солнечных протонов. Кроме того, в это время не

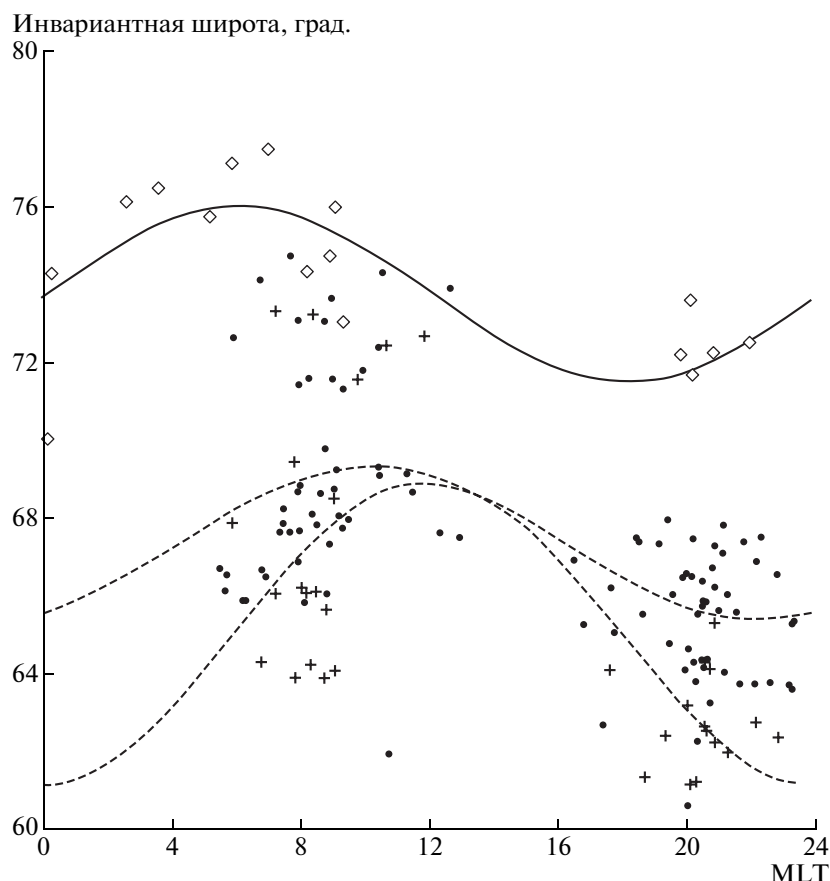


Рис. 5. Границы проникновения протонов 1–5 МэВ при $B_z \sim 0$ (точки) и $B_z < 0$ (кресты) и граница полярной шапки при $B_z < 0$ (ромбы).

должна иметь место магнитная буря. Во время магнитных бурь, особенно сильных, характер проникновения СКЛ с энергией 1–100 МэВ в магнитосферу Земли сильно меняется, причем пока еще не совсем понятным образом. В результате устанавливается ровный широтный профиль, и границы проникновения протонов от 1 до 50 МэВ часто совпадают [Lazutin et al., 2006]. Промежуток между приходом потока СКЛ от вспышки и началом магнитной бури как правило проходит в отсутствие суббуревой активности. Поиск событий с провалами в период работы спутника КОРОНАС-Ф с 2001 по 2005 гг. не выявил новых событий. Действительно, перед всеми бурями наблюдалась слабая активность, суббурь не было, и в этом смысле измерения в октябре 2003 г., когда большие потоки СКЛ наблюдаются во время суббуревой активности, но в отсутствие магнитной бури, являются уникальными.

В качестве основной гипотезы, объясняющей эффект провалом во время суббурь 26–27 октября 2003 г. можно предположить, что силовые линии, проходящие через широты провалов, вынянуты в районе экватора так, как показано на рис. 9. Энергичные протоны СКЛ на таких силовых ли-

ниях не удерживаются и будут выбрасываться на соседние силовые линии, ближе и дальше от Земли. Обратный поток на вытянутые силовые линии с квазидипольных будет много меньше, и, таким образом, соответствующие силовые трубки будут нести пониженный поток на всем протяжении магнитного дрейфа.

Образование тонких токовых слоев и соответствующее вытягивание силовых линий обычно связывают с хвостом магнитосферы. Но и в авроральной магнитосфере, в области замкнутых силовых линий такая локальная ситуация вполне возможна.

Во время суббуревых активизаций здесь появляются большие потоки свежееускоренных жлектронов и ионов с энергией от единиц до сотен кэВ, преимущественно вблизи экватора, что приводит к появлению азимутального тока и вытягиванию силовых линий. И то, и другое наблюдалось неоднократно [Лазутин, 2007]. В работе [Козелова и Козелов, 2003], основанной на измерениях на спутнике CRRES во время суббурь в районе экватора, был выполнен расчет суббуревых клина, соответствующего измерениям частиц и магнит-

ного поля, и рассчитана конфигурация силовых линий магнитного поля. Результаты расчета указывают на появление локальных вытянутых силовых линий в области квазизахвата, аналогичных показанным на рис. 9.

М.И. Пудовкин предполагал (частное сообщение), что таких локальных вытянутых структур может быть несколько, и они поочередно схлопываются при экспансии субури к полюсу. Подтверждением такого предположения служит тонкая структура полярных сияний в активной фазе суббури [Корнилова и др., 1990]. Существование двойной структуры видно и из формы провалов в некоторых пролетах, в частности в пролете, показанном на рис. 6а.

Поскольку спад интенсивности захваченных частиц может быть связан не только с радиальной, но и с питч-угловой диффузией в конус потерь, следует оценить, насколько этот эффект в режиме сильной диффузии способен обеспечить регистрируемую величину спада интенсивности во время провала. Оценочные формулы, описывающие движение энергичных частиц в области проникновения СКЛ, имеют следующий вид. Ларморовский радиус

$$\rho = K\sqrt{E}/B, \quad (3)$$

$K = 3.37 \times 10^3$ км для электронов и 1.4×10^5 км для протонов, E измеряется в МэВ, B — в нТл и ρ — в км. Период дрейфа частиц вокруг Земли, в с.

$$\tau_3 = 2640/EL. \quad (4)$$

Период колебаний протонов вдоль силовой линии в с, если E — в МэВ.

$$\tau_2 = 2.2L/\sqrt{E}. \quad (5)$$

Время жизни частиц из-за питч-угловой диффузии в с

$$\tau_{ж} = \tau_2 B/2B_{eq} = 1.1L^4/\sqrt{E}. \quad (6)$$

Отношение времени жизни протонов к периоду дрейфа

$$\tau_{ж}/\tau_3 = L^5\sqrt{E}/1200. \quad (7)$$

Время жизни протонов 1, 14 и 20 МэВ по этим формулам составляет 40, 10 и 6 мин, а период дрейфа — 350, 25 и 8 с соответственно.

Следовательно, за тот период времени, когда происходит авроральная активизация (5–10 мин), может понизиться в e раз поток протонов 15 и 40 МэВ, но только при условии, что он испытывает режим сильной диффузии все это время. Однако долготный размер активной области суббури всего 10 – 15° , т.е. длительность сильной диффузии в 10 – 20 раз меньше периода дрейфа, так как при выходе из активной области с искаженной конфигурацией магнитного поля меняется и ре-

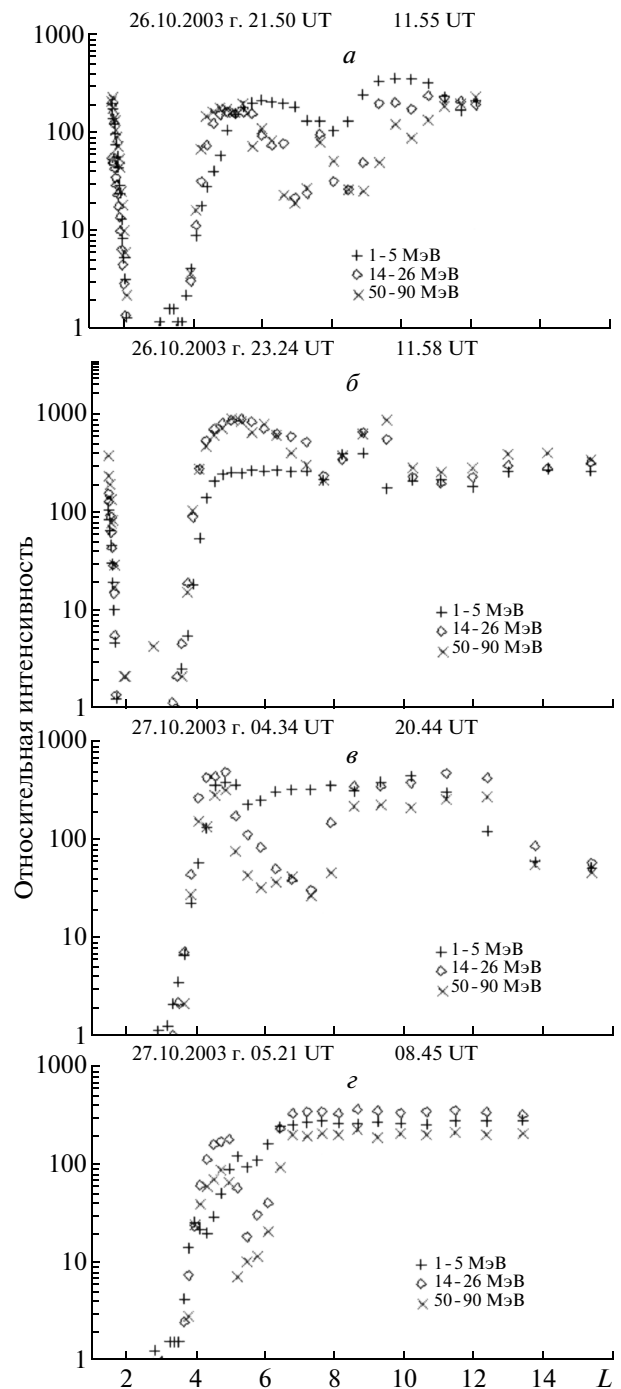


Рис. 6. а–г. Примеры широтных профилей солнечных протонов по измерениям в каналах спектрометра 1–5, 14–26 и 50–90 МэВ во время суббури активной фазы 26–27.10.2003 г.

жим питч-угловой диффузии в сторону ослабления. Таким образом, сброс частиц в атмосферу не обеспечивает наблюдавшиеся эффекты провала.

Остается предположить, что в таких случаях эффективно работает радикальная диффузия.

Разумеется, такие структуры очень быстротечны, один эпизод активизации продолжается от

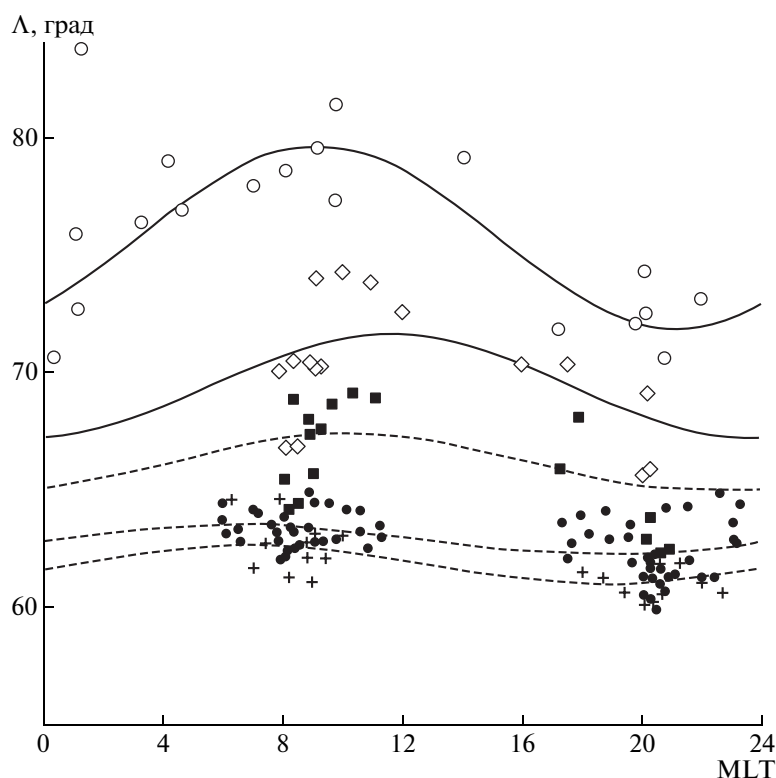


Рис. 7. Границы провалов протонов в канале 14–26 МэВ относительно границы полярной шапки (кружки) и границ проникновения протонов при $B_z \geq 0$ (точки) и $B_z < 0$ (кресты). Квадраты – низкоширотная граница провала, ромбы – высокоширотная граница провала.



Рис. 8. H -составляющая магнитограммы обсерватории Ловозеро. Вертикальные метки – профили с провалами СКЛ, горизонтальные – без провалов.

одной до нескольких минут, но для того, чтобы протоны ушли на соседние силовые линии при больших изменениях питч-угла, достаточно и одного скачка.

Зависимость глубины провала от энергии частиц говорят в пользу нашей гипотезы. На рис. 6а и б видно, что меньшая глубина провала наблюдается в канале 1–5 МэВ, так как протоны этих

энергий имеют меньший ларморовский радиус и, следовательно, не так легко расстаются с ведущей магнитной силовой линией.

5.2. СКЛ и структурные границы магнитосферы

Помимо выводов о кратковременной локализованной особенности в конфигурации магнито-

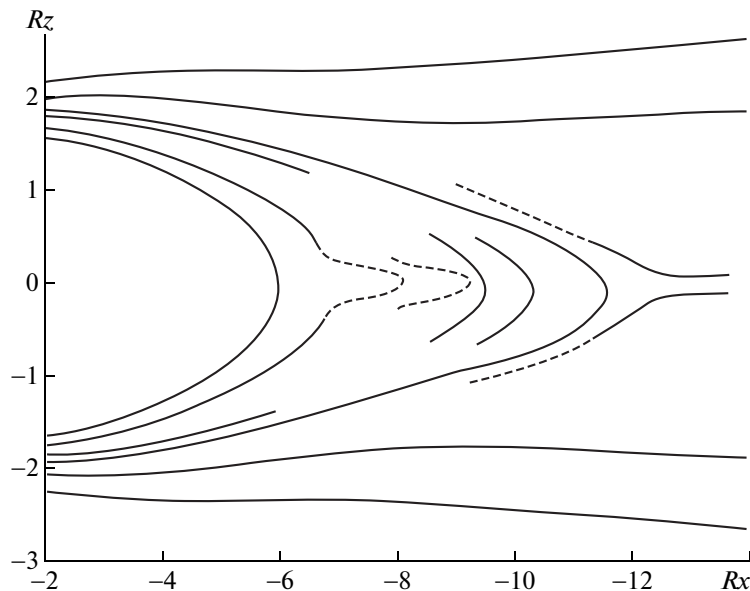


Рис. 9. Возможная структура магнитных силовых линий в полуночном секторе в момент активизации суббури.

сферы, анализируемые данные позволяют высказать и некоторые соображения о глобальной структуре магнитосферы. Солнечные протоны низких энергий (1–100 МэВ) тонко реагируют на структуру магнитного поля и ее изменения, и, следовательно, являются носителями соответствующей информации. Для определения границ магнитосферных доменов широко используются измерения на низковысотных спутниках электронов и протонов с энергией в десятки кэВ (см., например, [Фельдштейн и Гальперин, 1996] и цитированную там литературу). Есть, однако, некоторый изъян в этих методиках, проистекающий из того факта, что частицы указанных энергий активно участвуют в процессах возмущения внешней магнитосферы и сами испытывают воздействие этих процессов. Поэтому границы высыпающихся потоков отражает не только структуру магнитосферы, но и происходящие в этом месте возмущения. Солнечные протоны не воздействуют на магнитосферные возмущения и не испытывают воздействия, реагируя только на конфигурацию магнитного поля.

Низковысотный спутник КОРОНАС-Ф на высоте 500 км на всех орбитах, кроме нескольких пролетов над Бразильской магнитной аномалией, регистрирует высыпающиеся частицы. Для того, чтобы поток высыпающихся протонов был равен потоку квазизахваченных, который в свою очередь равен потоку в межпланетном пространстве, необходим сброс протонов в конус потерь в режиме сильной питч-угловой диффузии. Обеспечить такой сброс протонов может механизм питч-угловой диффузии за счет малой кривизны силовых линий, когда отношение ларморовского радиуса ча-

стицы ρ к радиусу кривизны силовых линий R_c , так называемый параметр адиабатичности $\varepsilon = \rho/R_c$ превышает критическую величину 0.1–0.2. Эти оценки были сделаны в работах по моделированию траекторий частиц [Сергеев и Цыганенко, 1982; Кузнецов и Юшков, 2002; Andersen et al., 1997; Young et al., 2008].

Область неадиабатичности располагается между границей проникновения СКЛ и внешней границей области квазизахвата (авроральной зоны) с хвостом магнитосферы (полярной шапкой).

Приведенное выше сравнение положения границы проникновения при различных знаках B_z ММП показывает, что граница проникновения при $B_z < 0$ с ночной стороны находится на существенно меньших широтах, чем граница проникновения при $B_z \sim 0$, а с дневной стороны границы практически совпадают. Этот вывод находится в соответствии с модельными расчетами границы адиабатичности из-за кривизны силовых линий [Кузнецов и Юшков, 2002], которые предсказывают, что протоны в спокойных условиях на широтах выше $\sim 65^\circ$ с ночной стороны движутся неадиабатически. С дневной стороны граница неадиабатичности протонов поднимается до $\sim 70^\circ$. В условиях слабого давления солнечного вектора при $B_z < 0$ ночная граница проникновения протонов смещается на $\sim 61^\circ$, а дневная граница адиабатического движения остается без изменения. Положение границы области квазизахвата с хвостом магнитосферы, определенное выше по границе северо-южной асимметрии СКЛ (рис. 7), как уже говорилось, соответствует положению приполюсной границы аврорального овала с полярной шапкой, найденное в работе Старкова и Фельдштейна

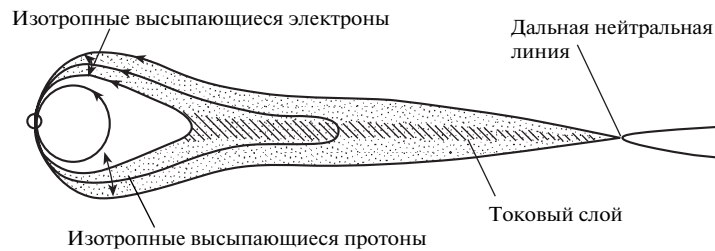


Рис. 10. Структура границ квазизахвата из работы [Yahnin et al., 1997].

[1967]. Но и низковысотный спутник, и полярные сияния дают информацию только о проекции магнитосферных доменов на ионосферу. На вопрос, куда эта граничная силовая линия уходит в плоскости магнитного экватора, однозначного ответа нет. По нашему мнению, аргументированному в работе [Лазутин, 2004], она не уходит далеко в хвост и имеет квазидипольную конфигурацию. Альтернативное (довольно распространенное) мнение отражает рис. 10, взятый из работы [Yahnin et al., 1997], где приполюсная граница квазизахвата энергичных частиц проектируется далеко в хвост магнитосферы. Наши измерения показывают, что такая конфигурация границ маловероятна. Нетрудно показать, что протоны СКЛ в такой ловушке не удерживаются. По прямым измерениям вертикальная компонента магнитного поля в хвосте магнитосферы имеет значение ~ 2 нТл; из выражения (3) получим величину ларморовского радиуса для протонов с энергией 1 МэВ порядка $20 R_e$, тогда как радиус кривизны силовой линии в районе экватора порядка $2-4 R_e$. Вполне очевидно, что квазизахвата здесь не будет. Другими словами, для протонов, движущихся из зеркальной точки в хвост магнитосферы вдоль такой силовой линии, действие силы Лоренца будет невелико, и частица продолжит движение в прежнем направлении. Собственно, из-за слабого отклонения в вертикальном направлении и не происходит перемешивания разных по интенсивности потоков северной и южной долей хвоста магнитосферы при описанном выше эффекте северо-южной асимметрии СКЛ. Внешняя граница квазизахвата должна располагаться на более дипольной и близкой к Земле силовой линии ($\sim 10 R_e$ в спокойное время), где B_z не меньше 20 нТл и ларморовский радиус, соответственно, не больше нескольких земных радиусов.

Второй важный вывод из описанных измерений — область суббуревой активности (а, следовательно, и активные формы полярных сияний, ускорение и сброс авроральных частиц и т.д.) находится внутри зоны квазизахвата, а не в вытянутых в хвост структурах, подобных показанным на рис. 10. Для понимания механизма магнитосферных суббурь правильный выбор геометрии магни-

тосферных доменов имеет первостепенное значение.

Это исследование было начато мной (Л.Л.) в тесном сотрудничестве с Сергеем Николаевичем Кузнецовым. До его трагической гибели мы успели доложить первые результаты [Kuznetsov, and Lazutin, 2007]. Затем на два года работа остановилась, но все же я считал необходимым завершить ее в память об ушедшем друге.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козелов Б.В., Козелова Т.В. Динамика областей неадиабатического движения частиц во внутренней магнитосфере во время суббурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 43. № 4. С. 448–497. 2003.
- Корнилова Т.А., Пудовкин М.И., Старков Г.В. Тонкая структура сияний вблизи полярной границы авроральной выпуклости в фазу брейкапа // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 30. № 2. С. 250–257. 1990.
- Кузнецов С.Н., Юшков Б.Ю. О границе адиабатического движения заряженной частицы в поле магнитного диполя // Физика плазмы. Т. 28. № 4. С. 375–383. 2002.
- Лазутин Л.Л., Кузнецов С.Н., Подорольский А.Н. Динамика радиационного пояса, образованного солнечными протонами во время магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 47. № 2. С. 187–197. 2007.
- Лазутин Л.Л. Авроральная магнитосфера // Модель космоса. М.: Изд-во КДУ. Под ред. М.И. Панасюка и Л.С. Новикова Т. 1. С. 547–578. 2007.
- Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л. и др. Магнитные бури в октябре 2003 года. Коллаборация “Солнечные экстремальные события 2003 года (СЭС – 2003)” // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 489–534. 2004.
- Переяслова Н.К. Солнечные протоны в магнитосфере Земли // Энергичные частицы в магнитосфере Земли. Апатиты: АН СССР. С. 30025. 1982.
- Сергеев В.А., Цыганенко Н.А. Космич. исслед. Т. 20. № 5. С. 866–870. 1982.
- Старков Г.В. Математическое описание границ аврорального свечения // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 34. № 3. С. 80–86. 1994.
- Старков Г.В., Фельдштейн Я.И. Изменение границ овальной зоны сияний // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 7. С. 62–71. 1967.

- Фельдштейн Я.И., Гальперин Ю.И. Структура авроральных вторжений в ночном секторе магнитосферы, ч. 1 // Космич. исслед. Т. 34. № 3. С. 227–247. 1996.
- Anderson B.J., Decker R.B., Paschalidis N.P. Onset of nonadiabatic particle motion in the near-Earth magnetotail // J. Geophys. Res. V. 102(A8). P/ 17 553–17 569. 1997.
- Kuznetsov S., Lazutin L., Rosenberg T., Borovkov L., Gotselyuk Yu., Weatherwax A. Energetic electron and ion precipitation and polar aurora during magnetospheric substorm of March 10, 1004 // Proc. 5th Inter. Conf. on Substorms, St. Petersburg, Russia, 16–20 May, 2000, (ESA SP-443, July 2000). P. 511–515. 2001.
- Kuznetsov S.V., Lazutin L.L. Solar proton anisotropy and dropout effects in the polar cap and auroral zone during period of the extended substorm activity // Phys. of Auroral Phenomena. Proc. XXX Annual Seminar, Apatity. P. 42–44. 2007.
- Kuznetsov S.N., Lazutin L.L., Panasyuk M.I., Starostin L.I., Gotseliuk Yu.V., Hasebe N., Sukurai K., Hareyama M. Solar particle dynamics during magnetic storms of July 23–27 // Adv. Space Res. V. 43. № 4. P. 553–558. 2009.
- Lazutin L.L., Kuznetsov S.N., Podorolsky A.N. Solar proton belts in the inner magnetosphere during magnetic storms // Proc. 2d Intern. Symp. Solar Extreme Events: Fundamental Science and Applied Aspects, Nor-Amberd, Armenia, 26–30 September. 2005. Eds. A. Chilingarian and G. Karapetyan, CRD, Alikhanyan Physics Institute, Erevan. P. 63–67. 2006.
- Yahnin A.G., Sergeev V.A., Gvozdevsky B.B., Vennerstrøm S. Magnetospheric source region of discrete auroras inferred from their relationship with isotropy boundaries of energetic particles // Ann. Geophysicae. V. 15. P. 943–958. 1997.
- Young S.L., Denton R.E., Anderson B.J., Hudson M.K. Magnetic field line curvature induced pitch angle diffusion in the inner magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 113. doi: 10.1029/2006JA12133. 2008.