

УДК 523.165

ДИАГНОСТИКА МАГНИТОСФЕРЫ ПО РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОНАМ ВНЕШНЕГО ПОЯСА И ПРОНИКНОВЕНИЮ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ (обзор)

© 2011 г. Л. В. Тверская

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва
e-mail: lvtverskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 28.06.2010 г.
После доработки 16.08.2010 г.

В статье представлен краткий обзор современного состояния исследований динамики релятивистских электронов внешнего радиационного пояса и границ проникновения солнечных протонов в магнитосферу во время магнитных бурь. Основное внимание уделено результатам изучения взаимосвязей этих структурных образований с другими магнитосферными плазменными структурами. Показано, что зависимость положения максимума пояса инжектированных во время магнитных бурь релятивистских электронов (L_{\max}) от амплитуды магнитной бури $|Dst|_{\max} = 2.75 \times 10^4 / L_{\max}^4$ может быть использована для предсказания экстремального широтного положения во время бури таких магнитосферных плазменных образований, как граница области захваченной радиации, ночная экваториальная граница аврорального овала, центр западной электроструи.

На примерах пока еще редких исследований динамики границ солнечных протонов в магнитосфере по данным одновременных измерений на нескольких полярных ИСЗ продемонстрирована возможность диагностики изменения топологии геомагнитного поля во время магнитных бурь.

1. ВВЕДЕНИЕ

Немногим более полувека назад человечество узнало, что Земля окружена потоками энергичных заряженных частиц: в 1958 г. были открыты внутренний (Ван Алленом) и внешний (С.Н. Верновым с сотрудниками) радиационные пояса Земли. Первые сведения о составе частиц и их энергии были получены на 3-ем советском искусственном спутнике Земли [Вернов и др., 1958]. Уже в первое десятилетие космической эры были достигнуты большие успехи в исследовании радиационных поясов. Итоги этих исследований были подведены на Международном симпозиуме по физике магнитосферы в 1968 г. в обзорных докладах Ван Аллена [Van Allen, 1969], Вернова [Verhov et al., 1969] и Тверского [Tverskoy, 1969]. Были выявлены основные источники и разработаны механизмы формирования радиационных поясов: распад нейтронов альbedo космических лучей; захват частиц из межпланетного пространства при смещениях магнитопаузы и в процессе диполизации, когда магнитные силовые линии вытягиваются из хвоста магнитосферы в область захваченной радиации, который может сопровождаться бетатронным ускорением частиц; радиальная диффузия под действием нестационарных электрических полей, в результате которой захваченные на

удаленных L -оболочках (L – параметр Мак-Илвейна) частицы смещаются в глубь магнитосферы; высыпания частиц, обусловленные их питч-угловым рассеянием при взаимодействии с волнами. Наибольшее развитие получила теория диффузии, обусловленной индукционными полями, возникающими при внезапных импульсах геомагнитного поля (“магнитная диффузия”). На ее основе была разработана количественная теория стационарного протонного пояса и предсказана структура поясов α -частиц и других тяжелых ионов. Этот механизм объясняет развитие диффузионных волн релятивистских электронов в промежутке между бурями. Основным резервуаром, из которого электроны переносятся в глубь радиационного пояса, является зона нерегулярных потоков электронов за границей области захваченной радиации. Систематическое изложение результатов исследований радиационных поясов за этот период представлено в монографиях [Тверской, 1968; 2004].

Однако многие процессы, развивающиеся в радиационных поясах во время магнитных бурь, остались невыясненными.

В 70-е–80-е гг. релятивистские электроны с энергиями ~ 1 МэВ и более в экспериментах на американских ИСЗ измерялись только на геосин-

хронных орбитах, т.е. на периферии внешнего радиационного пояса. Важными результатами этих экспериментов явилось обнаружение высокой корреляции потоков релятивистских электронов со скоростью солнечного ветра [Paulikas and Blake, 1979] и исследование вариаций спектра электронов во время геомагнитных возмущений [Baker et al., 1986]. В этот же период были продолжены исследования динамики релятивистских электронов (вплоть до энергий 15 МэВ) во время магнитных бурь во внутренней магнитосфере по данным измерений на советских ИСЗ “Молния-1”, “Метеор” и ИСЗ серии “Космос” [Горчаков и др., 1985; Tverskaya, 1996 и соответствующие ссылки]. Результаты этих исследований будут отражены в основной части данной работы.

В последние два десятилетия интерес к исследованию радиационных поясов резко возрос. Во многом это связано с осознанием их роли как наиболее важного фактора космической погоды, воздействующего на бортовые системы спутников. Особенно пристальное внимание уделяется вариациям потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса, называемых в мировой литературе “космическими киллерами”.

Электроны с энергиями в десятки – первые сотни кэВ ускоряются в нестационарных электрических полях суббурь [Бондарева и Тверская, 1973; Li et al., 1998]. В ранних работах предполагалось, что до более высоких энергий электроны могут быть ускорены бетатронно в процессе диполизации [Tverskoy, 1969] с дополнительным ускорением на фазе восстановления бури при распаде кольцевого тока [Vakulov et al., 1976]. В последние годы появилось много работ, развивающих идеи локального ускорения электронов во внутренних L -оболочках различными видами волн (главным образом, типа “хоров”) [Kropotkin, 1996; Демехов и др., 2006; Shpritz et al., 2008].

Теоретические исследования магнитосферно-ионосферного взаимодействия [Tverskoy, 1972; Тверской, 1982; 1997] дают основания считать, что область инжекции релятивистских электронов внешнего радиационного пояса во время магнитных бурь тесно взаимосвязана с такими магнитосферными плазменными структурами, как граница области захваченной радиации, ночная экваториальная граница аврорального овала, центр западной электроструи, максимум давления плазмы кольцевого тока. Поэтому по зависимости максимума пояса инжектированных во время бурь релятивистских электронов от амплитуды магнитной бури $|Dst|_{max}$ [Тверская, 1986] можно предсказать, до каких широт приблизятся к Земле во время бури многие “критические” с точки зрения космической погоды магнитосферные плазменные структуры. В обзоре представлены экспериментальные результаты, подтвержда-

ющие данную концепцию. Отметим, что Dst -вариация хорошо предсказывается современными методиками по параметрам межпланетной среды [Temerin and Li, 2002].

Еще одним важным фактором космической погоды являются протоны солнечных космических лучей, проникающие глубоко в магнитосферу во время магнитных бурь. Известно, например, что во время солнечных протонных событий в октябре 1989 г. из-за быстрого нарастания дозы радиации, измеряемой на станции “Мир”, космонавтов вынуждены были перевести в более защищенный отсек станции. Причиной такого возрастания дозы послужило заполнение значительной части орбиты станции энергичными солнечными протонами, которое произошло из-за смещения к Земле границы их проникновения во время сильной магнитной бури [Тверская и др., 1991].

Вариации границ солнечных протонов диагностируют изменение структуры геомагнитного поля во время магнитных бурь. Эти исследования ведутся много лет и в последние годы активизировались (см. обзоры [Morfill and Scholer, 1973; Кузнецов и Тверская, 2007]). Исследованиям в этом направлении посвящена вторая часть данного обзора.

2. ИНЖЕКЦИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВНУТРЕННИЕ ОБЛАСТИ МАГНИТОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Во время магнитных бурь наблюдаются значительные вариации потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе. Типичная картина такова: потоки падают на главной фазе бури, возрастания, превышающие добуревой уровень, происходят на фазе восстановления [McIlwain, 1966; Тверской, 1968; Williams et al., 1968]. При этом наблюдается запаздывание в появлении электронов более высоких энергий. В целом ряде случаев, однако, потоки электронов не возрастают. Как отмечено в работе [Friedel et al., 2002], только в 50% умеренных бурь происходит возрастание потоков релятивистских электронов на геосинхронной орбите.

2.1. “Ударная” и “буревая” инжекция релятивистских электронов на внутренние L -оболочки

По данным ИСЗ CRRES было обнаружено ранее неизвестное явление в радиационных поясах: в момент гигантского внезапного начала (SSC) магнитной бури 24.03.1991 г. в течение ~1 мин появился мощный пояс протонов с энергиями в десятки МэВ и электронов с энергиями >13 МэВ в области зазора между внутренним и внешним радиационными поясами [Blake et al., 1992]. Эф-

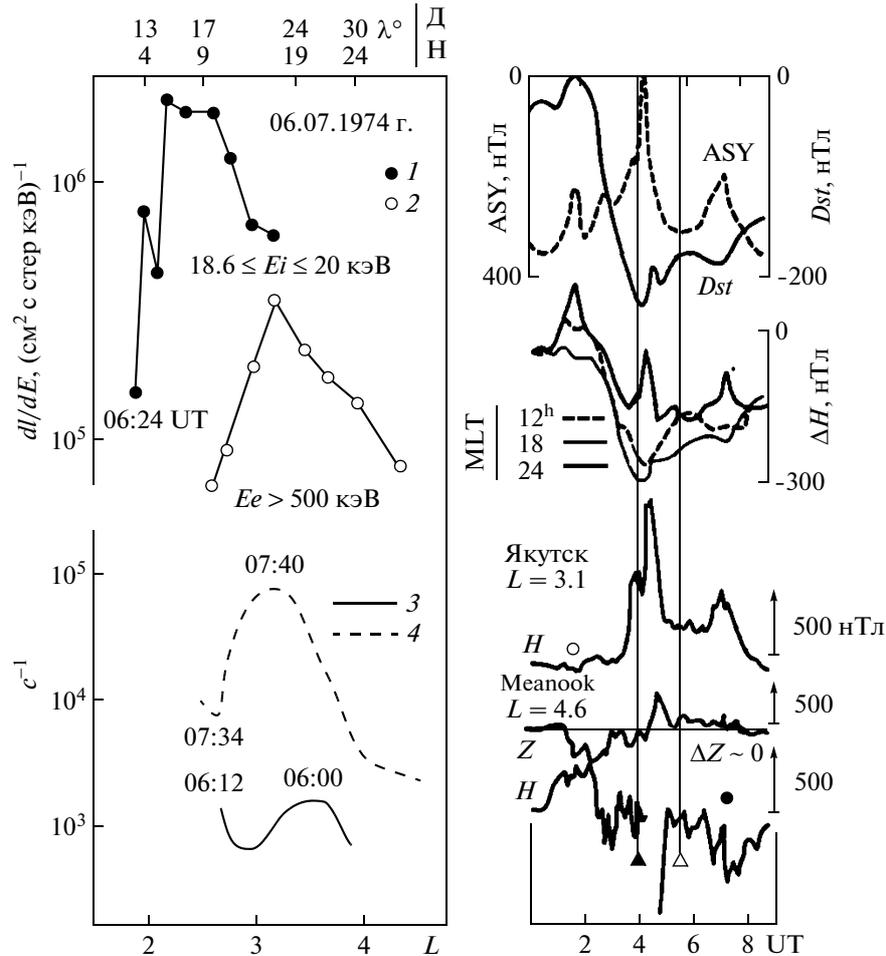


Рис. 1. Вариации интенсивности ионов кольцевого тока с энергией $Ei \sim 20 \text{ кэВ}$ и электронов с $Ee > 500 \text{ кэВ}$ во время бури 6 июля 1974 г. (левая часть): 1 – ионы, ночной пролет; 2 – ионы, дневной пролет; 3 – электроны, ночной пролет; 4 – электроны, дневной пролет. Геомагнитные данные (правая часть): ASY-индекс, Dst -вариация, вариации ΔH на низкоширотных станциях на разных местных временах, H -компонента ст. Якутск, H - и Z -компоненты ст. Meanook.

фekt этой ударной инжекции был объяснен Б.А. Тверским в рамках теории дрейфа частиц в электрическом и магнитном полях внезапного импульса в предположении существования в данном случае биполярного импульса: положительного длительностью $\sim 10 \text{ с}$ и отрицательного длительностью $\sim 1 \text{ мин}$. [Павлов и др., 1993]. Аналогичная идея была использована в детальном компьютерном расчете этого случая [Li et al., 1993]. Биполярные импульсы меньшей амплитуды могут вызвать появление новых поясов частиц на других, нежели в случае 24.03.1991 г., L -оболочках. Это обстоятельство должно учитываться при анализе вариаций поясов во время магнитных бурь. Гигантские импульсы описанного типа крайне редки, возможно, было 1–2 события за весь период космических исследований. Гораздо более часто осуществляется мощная “буревая” инжекция релятивистских электронов в область $L = 3–5$.

Первое свидетельство существования быстрой (на масштабе суббури) инжекции релятивистских электронов на внутренние L -оболочки было получено по данным ИСЗ “Молния-1” [Тверская, 1998] во время сильной магнитной бури 6 июля 1974 г. Данные представлены на рис. 1. ИСЗ “Молния-1” пересекает область $L \sim 3$ вблизи экваториальной плоскости на нисходящей и восходящей ветвях орбиты с разницей во времени $\sim 1 \text{ ч}$. Именно за это время сформировался “новый” пояс электронов с $Ee > 500 \text{ кэВ}$ в зазоре между внутренним и внешним поясами. Одновременно измерялись ионы кольцевого тока с $Ei \sim 20 \text{ кэВ}$. В левой части рисунка представлены профили потоков ионов с $Ei \sim 20 \text{ кэВ}$ и электронов с $Ee > 500 \text{ кэВ}$ для пролетов на нисходящей (местная полночь) и восходящей (местный полдень) ветвях орбиты. В правой части рис. 1 приведена Dst -вариация, индекс асимметрии ASY, вариации H -составляющей магнитного поля на низкоширотных

станциях для 3-х секторов местного времени, H -составляющая ст. Якутск ($L = 3.1$), H и Z составляющие ст. Meapook ($L = 4.6$). Моменты пролетов отмечены вертикальными линиями с треугольниками (темным и светлым, соответственно, для ночной и дневной сторон).

К сожалению, мировая сеть станций в данном случае не позволяет определить положение центров электроструй. Ясно, что западная струя сместилась южнее ст. Meapook ($L = 4.6$) в промежутке между пролетами. Станция Якутск ($L = 3.1$) находилась в послеполуденном секторе в районе восточной электроструи. Z -компонента (не приведена) показала приближение струи к станции, но струя не достигла зенита. Однако амплитуда струи была велика: 1500 нТл, что само по себе — достаточно редкое явление на $L = 3.1$. Как видно из представленных данных, инжекция электронов с $E_e > 500$ кэВ с максимумом интенсивности на $L = 3.2$ произошла во время мощного низкоширотного возмущения, а к моменту регистрации “нового” пояса электронов резко упала асимметрия Dst уже на фазе восстановления бури. Максимум предбуревого пояса находился на $L \sim 4.5$, а интенсивность была \sim на порядок ниже. Для более подробного рассмотрения случая отсылаем читателя к работе [Тверская, 1998 и соответствующие ссылки].

Случай быстрой инжекции электронов с энергиями 0.2–0.4, 0.4–0.8 и 1.6–3.2 МэВ был зарегистрирован по данным одновременных измерений на 3-х ИСЗ GPS во время бури 15 мая 1997 г. ($Dst_{max} = -115$ нТл) [Li et al., 1999]. Буря отличалась очень длительным минимумом Dst -вариации: ~ 8 ч. Анализ динамики западной электроструи для этого случая [Tverskaya, 2000] показал, что инжекция электронов с $E_e = 1.6$ –3.2 МэВ на $L = 4.2$ произошла в момент прохождения электроструи через зенит ст. Ситка ($L \sim 4$). Точное положение максимума “нового” пояса по данным GPS определить нельзя, так как минимальное значение L , достигаемое орбитой GPS, составляет 4.2. Данные ИСЗ “Polar” [Blake et al., 2001] показали, что максимум пояса (L_{max}) после этой бури зарегистрирован на $L = 3.9$.

Для обоих случаев быстрой буревой инжекции релятивистских электронов положение L_{max} хорошо соответствовало формуле, связывающей L_{max} с амплитудой магнитной бури $|Dst|_{max}$ [Тверская, 1986], которую мы рассмотрим ниже.

2.2. Динамика релятивистских электронов во время супербури

Особенности инжекции релятивистских электронов на внутренние L -оболочки мы рассмотрим на примере нескольких супербурь ($|Dst|_{max} > 300$ нТл). Как будет видно из последующего рас-

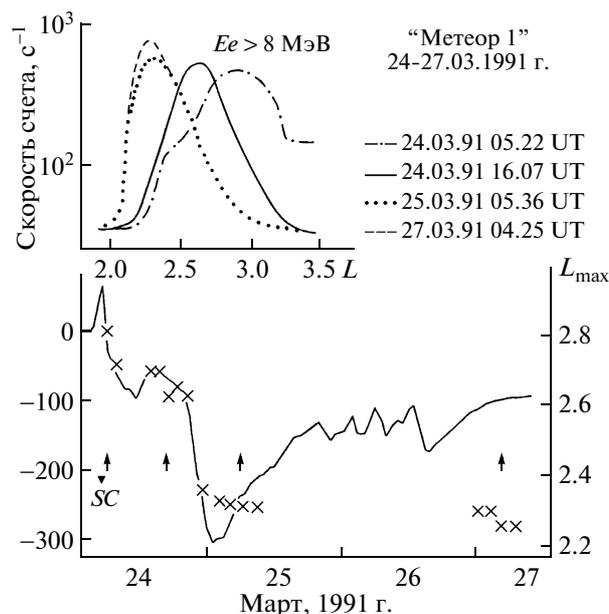


Рис. 2. Эволюция электронного пояса, инжектированного во время гигантского SSC в марте 1991 г. по данным ИСЗ “Метеор”. Нижняя часть рисунка: Dst и положение максимума интенсивности электронов с $E_e > 8$ МэВ (кресты). Верхняя часть — L -профили электронов с $E_e > 8$ МэВ в разные моменты UT (указаны стрелками на кривой Dst).

смотрения, бури имеют довольно много индивидуальных особенностей, требующих детального исследования процессов появления “новых” поясов.

2.2.1. Буря 24 марта 1991 г.

Эта магнитная буря ($|Dst|_{max} \sim 300$ нТл) продемонстрировала и ударную, и буревую инжекцию в зазор между поясами. В момент гигантского SSC за 1 мин, как отмечалось выше, сформировался “ударный” пояс высокорелятивистских электронов. Эволюцию этого пояса во время последовавшей сильной магнитной бури и инжекцию нового “буревой” пояса удалось проследить по данным полярного ИСЗ “Метеор” [Tverskaya et al., 2003a]. На рисунке 2 представлена динамика радиального профиля пояса электронов с $E_e > 8$ МэВ, появившегося во время гигантского SSC. Моменты пролета ИСЗ и положение максимума пояса L_{max} , показаны на графике Dst -вариации. Сформировавшийся на $L \sim 2.8$ пояс к концу главной фазы бури сместился на $L \sim 2.3$. Это свидетельствует о быстром переносе на главной фазе бури и не подтверждает сложившееся мнение о том, что на главной фазе бури происходит только падение интенсивности релятивистских электронов [Shpritz et al., 2008].

На рисунке 3 представлено пространственное распределение потоков электронов разных энергий в диапазоне 0.17–8 МэВ для 3-х временных периодов: 24.03.1991 г. (до SSC); 25.03.1991 г. (в

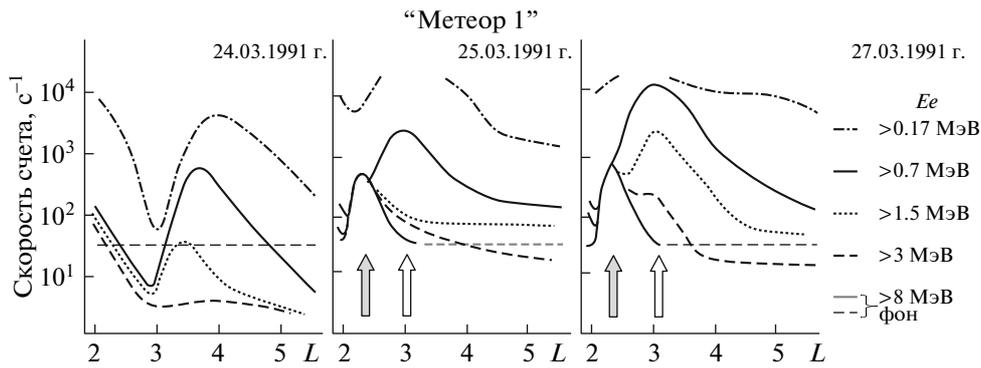


Рис. 3. L -профили для электронов разных энергий для пролетов ИСЗ “Метеор” в южном полушарии перед бурей (24.03.1991 г.), в начале фазы восстановления (25.03.1991 г.) и через два дня после максимума бури (27.03.1991 г.). Темной стрелкой указан максимум пояса, сформировавшегося во время гигантского SSC (“ударная” инжекция), светлой стрелкой – максимум пояса инжектированных во время последующей бури электронов (“буревая” инжекция).

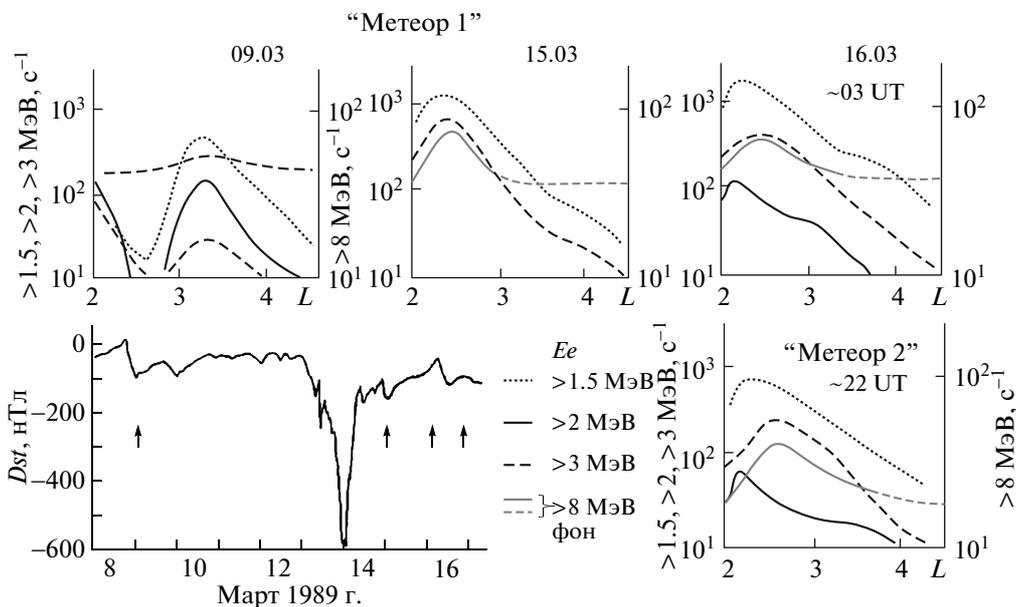


Рис. 4. L -профили для электронов разных энергий для пролетов ИСЗ “Метеор” 1, 2 в южном полушарии до и после магнитной бури 13 марта 1989 г. Моменты пролетов указаны стрелками на графике Dst -вариации.

начале фазы восстановления бури) и 27.03.1991 г. (через 2 дня после максимума бури). Перед бурей хорошо виден зазор между поясами на $L \sim 3$. На следующем пролете, 25.03.1991 г., имеется пик “ударного” пояса, и сформировался еще один новый пояс инжектированных во время бури электронов. Наблюдается запаздывание в появлении более высокоэнергичных электронов, максимумы которых формируются там же. Пик “буревоего” пояса хорошо совпал с зарегистрированным на ИСЗ CRRES [Ingraham et al., 1996].

2.2.2. Буря 13 марта 1989 г.

Эта буря является самой сильной за весь период космических исследований. Согласно работе [Allen et al., 1989], бури такой амплитуды наблю-

даются один раз в 120 лет. Буря привела к катастрофическим последствиям в наземных системах, практически парализовав энергоснабжение провинции Квебек в Канаде, включая Оттаву. Ущерб для экономики составил около 2 млрд. долларов.

Информация о релятивистских электронах во время этой бури имеется лишь по измерениям на ИСЗ “Метеор” 1, 2. Рисунок 4 иллюстрирует динамику электронов с $E_e = 0.17\text{--}8$ МэВ [Tverskaya et al., 2003a]. Моменты пролетов ИСЗ “Метеор” показаны стрелками на графике Dst -вариации. В верхней части рисунка представлены L -профили скорости счета каналов, регистрировавших электроны с $E_e > 1.5; 2; 3$ и 8 МэВ. Все профили для

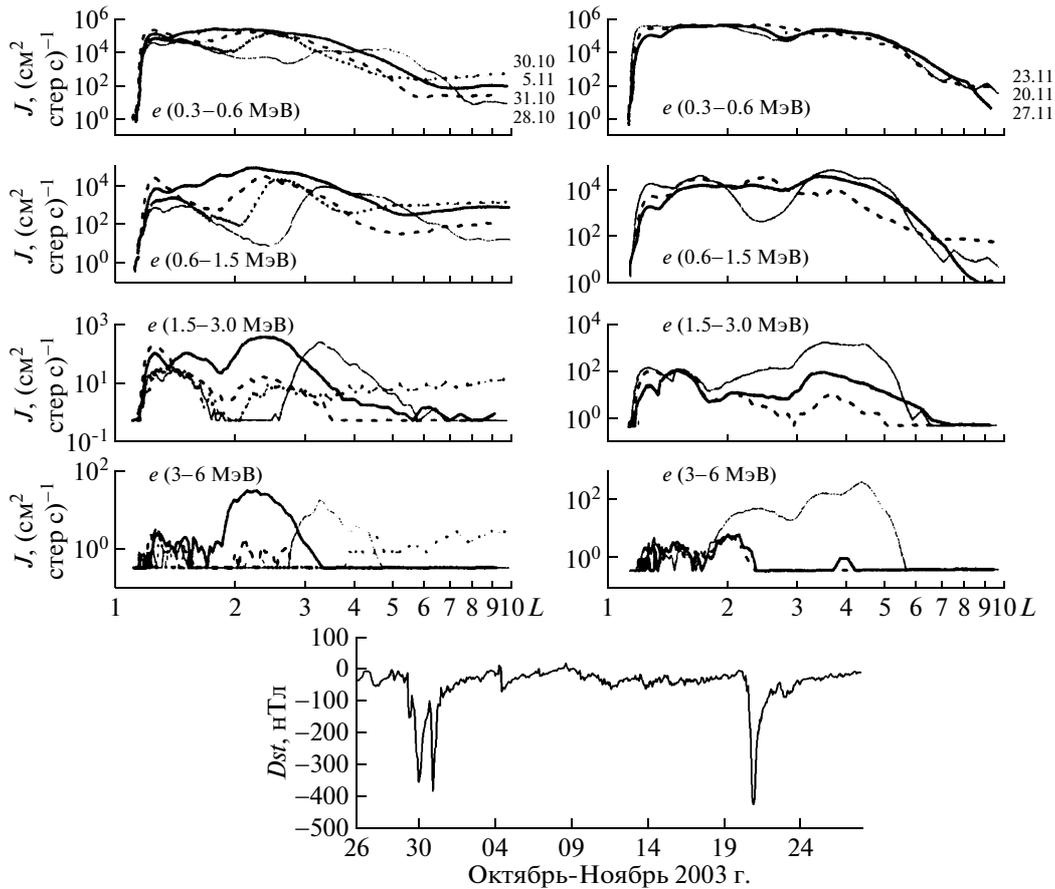


Рис. 5. L -профили электронов разных энергий по данным ИСЗ “КОРОНАС-Ф” до и после магнитных бурь 29–30.10.2003 г. и 20.11.2003 г. В нижней части рисунка – Dst -вариация.

ИСЗ “Метеор” 1 построены для близких значений напряженности магнитного поля B . Для ИСЗ “Метеор” 2 значения B были другие, поэтому прямое сравнение скоростей счета невозможно. 9 марта, за несколько дней до бури, максимум пояса находился на $L \sim 3.4$. Детектор, измерявший электроны с $Ee > 8$ МэВ, регистрировал фон. Пролет 15-го марта приходился уже на фазу восстановления бури. Потоки электронов всех энергий возросли. Пик “нового” пояса электронов находился на $L \sim 2.5$, а к 16 марта пик пояса электронов с $Ee > 1.5$ и 2 МэВ сдвинулся на $L \sim 2.2$, в то время как пик поясов электронов с $Ee > 3$ и 8 МэВ остался в прежнем положении, в месте первоначальной инжекции. Таким образом, быстрая диффузия наблюдалась лишь до энергий ~ 2 МэВ. Если бы не измерялись электроны больших энергий, а данные были бы только 16 марта, считалось бы, что максимум “нового” буревоего пояса находился на $L \sim 2.2$.

2.2.3. Бури в октябре-ноябре 2003 г.

Динамику электронов внешнего пояса во время супербури октября и ноября 2003 г. проиллю-

стрируем результатами измерений на ИСЗ “КОРОНАС-Ф” [Кузнецов и др., 2007].

На рисунке 5 приведены профили электронных поясов во время бурь 29–30 октября и 20 ноября 2003 г. для разных энергий ($Ee = 0.3–0.6$; $0.6–1.5$; $1.5–3$; $3–6$ МэВ). В период 29–30 октября развились 3 сильных магнитных бури: 29 октября ($Dst \sim 150$ нТл), и 30 октября – ($Dst \sim 350$ и ~ 380 нТл). При этом после первых 2-х бурь геомагнитное поле не успевало восстановиться (Dst -вариация оставалась < -100 нТл). Вариации пояса электронов для разных энергий из-за наложения бурь практически не давали возможности различить эффект каждой из 3-х бурь. После 2-ой бури, 30.10.2003 г., пояс оказался на $L \sim 2.6$ для всех энергий, после 3-ей – еще продвинулся до $L \sim 2.3$. В этом событии невозможно определить, где и когда первоначально в каждой буре инжектировались электроны, и какова роль быстрого переноса на главных фазах и фазах восстановления бурь. Таким образом, относить положение L_{\max} “нового” пояса электронов к последней, самой мощной буре, было бы ошибочно.

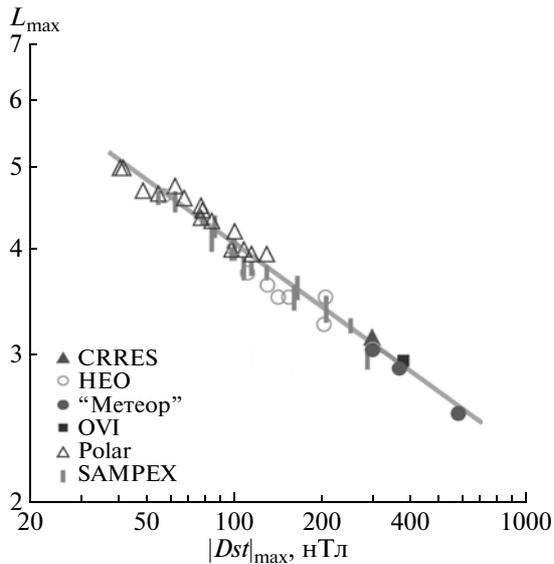


Рис. 6. Зависимость положения максимума пояса инжектированных во время магнитных бурь релятивистских электронов (L_{\max}) от амплитуды магнитной бури $|Dst|_{\max}$. Линия представляет формулу (1). Знаками обозначены данные различных ИСЗ.

Событие 20 ноября 2003 г. продемонстрировало, что во второй по мощности буре за весь период космических исследований ($Dst = -422$ нТл) не инжектировались электроны с энергиями >1.5 МэВ. Даже поток электронов в канале 0.6–1.5 МэВ не увеличился, только его максимум сместился на $L \sim 2.6$. Потоки же более энергичных электронов уменьшились более чем на 2 порядка в результате бури.

2.3. Зависимость положения максимума пояса инжектированных во время бурь релятивистских электронов L_{\max} от амплитуды магнитной бури $|Dst|_{\max}$

Впервые зависимость положения максимума “нового” пояса электронов, ускоренных во время магнитной бури, от амплитуды Dst -вариации бури была получена в работе [Williams et al., 1968]. Для 5-ти бурь в диапазоне амплитуд $|Dst|_{\max} = 30$ –140 нТл зависимость оказалась линейной. Исследование зависимости в широкой области Dst -амплитуд (к тому времени, до ~ 400 нТл) показало, что зависимость существенно нелинейна и имеет вид [Тверская, 1986]

$$|Dst|_{\max} = 2.75 \times 10^4 / L_{\max}^4 \quad (1)$$

Этот результат был получен по данным с разных ИСЗ, часто с плохим временным разрешением: максимум “нового” буревоего пояса определялся, как правило, через несколько дней после бури. В работе [Tverskaya et al., 2003b] для провер-

ки соотношения (1) были использованы данные одновременных измерений электронов с энергиями 1.5–4 МэВ на ИСЗ HEO, *Polar* и SAMPEX. Всего было выбрано 36 бурь с $|Dst|_{\max}$ до 300 нТл. Результаты показали хорошее согласие с формулой (1): расхождения составили не более, чем $\Delta L \sim 0.2$. Такие расхождения находятся в пределах точности определения Dst -вариации.

Отметим, что формула (1) была получена по данным об электронах с $Ee \sim 1$ –15 МэВ. Очень важно не использовать электроны меньших энергий, так как уже для энергий в сотни кэВ период дрейфа электронов на $L \sim 3$ сопоставим с длительностью суббури. Удачным обстоятельством для получения (1) было наличие для сильных бурь данных об электронах с $Ee > 15$ МэВ. [Горчаков и др., 1985]. К настоящему времени появились данные о релятивистских электронах (вплоть до энергий > 8 МэВ), измеренных на ИСЗ “Метеор” во время супербури 13.03.1989 г., 24.03.1991 г., 10.11.2004 г. [Tverskaya et al., 2003a; Тверская и др., 2006]. Данные представлены на рис. 6 [Тверская, 2010]. Видно, что зависимость (1) выполняется во всем диапазоне амплитуд известных магнитных бурь.

В работе [Tverskaya et al., 2003b] были сформулированы основные необходимые условия для анализа положения L_{\max} из выражения (1): буря должна быть изолированной, чтобы избежать множественных инъекций и быстрых переносов электронов в результате последующей бури, близкой по времени; должно быть существенное возрастание интенсивности электронов от предбуревоего уровня; необходимо исключить случаи “ударной” инъекции в момент SC ; должна учитываться возможность дополнительных инъекций на фазе восстановления бури, которая может дать большее возрастание, нежели инъекция от “основной” бури.

Использование данных о положении L_{\max} после бури, в которой отсутствовала инъекция, приведет к меньшим, чем в выражении (1) значениям L_{\max} . В этом случае будет зарегистрирован остаточный пояс, сформировавшийся вследствие высыпаний электронов и их выхода в межпланетное пространство по открывшимся дрейфовым траекториям при приближении магнитопаузы во время бури. Также получатся меньшие значения L_{\max} в случае наложения нескольких бурь, когда каждая последующая буря может “протолкнуть” пояс, сформировавшийся от предыдущей.

Из изложенного ясно, что данные для бурь в октябре–ноябре 2003 г. (см. выше) не следует использовать для сравнения с L_{\max} из выражения (1).

Почему же в результате некоторых бурь, даже очень сильных, не возрастают потоки релятивистских электронов? Возможно, решение вопроса лежит на пути учета влияния плотности солнечного ветра. Недавно было показано, что

потоки электронов с $Ee > 2$ МэВ на геосинхронной орбите и электронов с $Ee > 38$ кэВ в ближнем плазменном слое хвоста магнитосферы антикоррелируют с плотностью солнечного ветра [Lyatsky and Khazanov, 2008; Burin des Roziers et al., 2009]. Электроны ближнего плазменного слоя хвоста являются источником для инъекции релятивистских электронов на внутренние L -оболочки в процессе диполизации [Tverskoy, 1969]. Возможно, при высокой плотности солнечного ветра во время бури одновременно срабатывают два фактора, препятствующих возрастанию потоков электронов: удержание магнитопаузы в сильно поджатом состоянии, что способствует выходу электронов в межпланетное пространство [Тверской, 1968], и ослабление источника в плазменном слое.

3. ВЗАИМОСВЯЗЬ ОБЛАСТИ ФОРМИРОВАНИЯ БУРЕВОГО ПОЯСА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И ДРУГИХ МАГНИТОСФЕРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУР

Согласно теоретическим представлениям [Tverskoy, 1972; Тверской, 1982], многие магнитосферные плазменные структуры формируются в ночной магнитосфере в области перехода от плазмы низкого ($p \ll H^2/8\pi$) к плазме высокого ($p \gg H^2/8\pi$) давления: ночная граница области захваченной радиации, полярные электроструи, экваториальная граница дискретных форм сияний, высыпания авроральных электронов типа “перевернутого V ”. В области низкого давления силовые линии близки к дипольным, а при $p \gg H^2/8\pi$ вытягиваются на ночную сторону далеко в плазменный слой хвоста магнитосферы. Скорее всего, и максимум пояса инжектированных во время бурь релятивистских электронов, L_{\max} , также располагается в этой области.

3.1. Центр западной электроструи, ночная экваториальная граница дискретных форм сияний и высыпаний авроральных электронов.

В работе [Кузнецов и др., 1972] было впервые показано, что центр западной электроструи может смещаться до $L \sim 3$. Это произошло во время бури 25 мая 1967 г. с $|Dst|_{\max} \sim 400$ нТл. В то же самое время зарегистрировано мощное риометрическое поглощение на средних широтах (Горький, $L \sim 2.5$), фиолетовая корона полярных сияний наблюдалась на северном горизонте ст. Локайер ($L \sim 2.5$). ИСЗ OVI-9 зарегистрировал максимум пояса инжектированных релятивистских электронов на $L \sim 3$ [Parsignault, 1974]. Это было первым свидетельством близкого совпадения экстремального за бурю положения центра западной

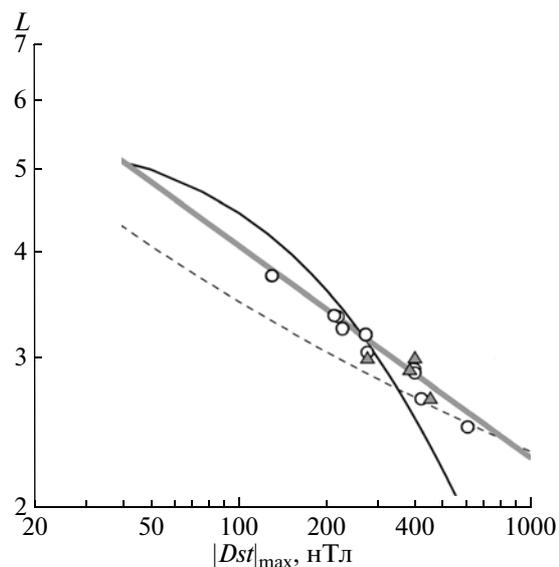


Рис. 7. Сравнение эмпирических зависимостей (1)–(3): жирная линия – (1), тонкая линия – (2), штриховая – (3). Кружки – экстремальное положение центра западной электроструи, треугольники – ночная экваториальная граница высыпаний авроральных электронов.

электроструи, ночной границы аврорального овала и L_{\max} из соотношения (1) [Тверская, 1986].

В работе [Хорошева, 1987] показано, что экстремальное низкоширотное положение центра западной электроструи с точностью до $\Delta L \sim 0.2$ совпадает с L_{\max} , определенным в работе [Тверская, 1986].

В мировой литературе известны эмпирические зависимости, связывающие положение различных магнитосферных структур с амплитудой Dst -вариации: центра западной электроструи [Feldshstein, 1992]

$$\Phi = 65.2 + 0.035 Dst \quad (2)$$

и ночной экваториальной границы аврорального овала [Старков, 1993]

$$\Phi = 74.9 - 8.6 \lg |Dst|. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) Φ -инвариантная широта ($L = \cos^{-2}\Phi$).

На рисунке 7 сравниваются зависимости (1)–(3). Приведены также данные из литературы об экстремальном положении западной электроструи и экваториальной границы высыпаний авроральных электронов, зарегистрированной на ИСЗ “Метеор” в супербурях 2003–2004 гг. [Хорошева, 1987; Тверская, 1998; Панасюк и др., 2004; Marjin et al., 2006; Тверская и др., 2009]. Как видно из рисунка, для сильных бурь зависимости (1) и (3) хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными. Зависимость (2), построенная для $Dst > -250$ нТл, значительно откло-

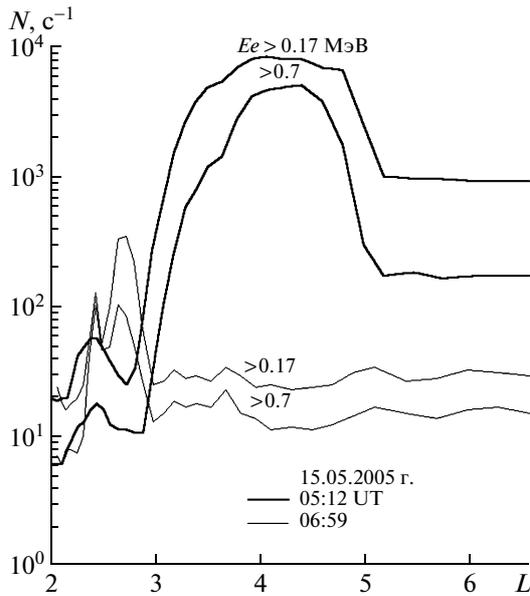


Рис. 8. Профили радиационного пояса для электронов с $E_e > 0.17$ и 0.7 МэВ 15 мая 2005 г. Время пролетов ИСЗ “Метеор-3М” указано для моментов пересечения границ области захваченной радиации: жирные линии – 05:12 UT, тонкие – 06:59 UT.

няется от (1) и (3) при сильных бурях. Для супербури 2 сентября 1859 г. с гипотетической $Dst \sim 1760$ нТл [Tsurutani et al., 2003] кривая зависимости (2) приблизилась бы к поверхности Земли. По формулам (1) и (3) при такой амплитуде бури максимум пояса инжектированных электронов и ночная граница аврорального овала находились бы на $L = 2$ и 2.1 , соответственно.

3.2. Коллапс области захваченной радиации на главной фазе магнитной бури 15 мая 2005 г.

Отличительной особенностью супербури 15 мая 2005 г. было очень быстрое развитие главной фазы: нарастание амплитуды Dst -вариации произошло со скоростью более 100 нТл/ч. По данным измерений ИСЗ “Метеор” удалось зарегистрировать момент приближения ночной границы области захваченной радиации к Земле до $L \sim 3$ и практически полного исчезновения внешнего радиационного пояса электронов [Тверская и др., 2007].

На рисунке 8 представлены профили радиационных поясов электронов с $E_e > 0.17$ и 0.7 МэВ для двух последовательных пролетов ИСЗ “Метеор” 15 мая 2005 г. в ночные часы местного времени в северном полушарии. Первый пролет происходил в конце начальной фазы бури. На $L > 5$ счет детекторов определяется вкладом солнечных протонов. Можно с уверенностью сказать, что граница области захваченной радиации находилась на $L \geq 5$. В 06:59 UT граница сместилась на $L \sim 3$, и внешний пояс практически исчез. На том

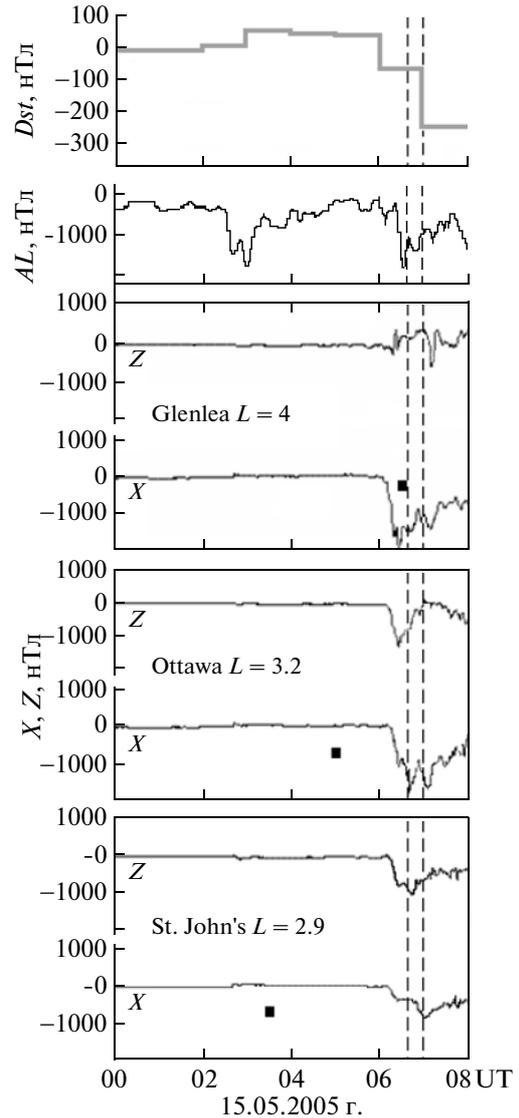


Рис. 9. Геомагнитные данные в интервале 00–08 UT 15 мая 2005 г. Сверху – вниз: Dst -вариация, AL -индекс, X - и Z -составляющие магнитного поля на обсерваториях Glenlea, Ottawa и St. John's.

же пролете в $\sim 06:39$ UT на утренней стороне граница фиксировалась на $L = 4$.

Рисунок 9 иллюстрирует особенности развития геомагнитных возмущений. Представлен ход Dst -вариации, AL -индекса, X и Z – составляющие магнитного поля для обсерваторий Glenlea, Ottawa и St. John's. Время пролета ИСЗ обозначено вертикальными штриховыми линиями. Пролет происходил на главной фазе бури, значение Dst составило -77 нТл, а уже в следующем часовом интервале -250 нТл. Значение X -составляющей ст. Glenlea в максимуме превысило значение AL -индекса, а на ст. Ottawa сравнялось с ним. Центр западной электроструи сместился к 07:00 UT к зениту ст. Ottawa ($\Delta Z \sim 0$), но все время оставался се-

вернее ст. St.John's ($\Delta Z < 0$). Таким образом, центр струи находится на $2.9 < L < 3.2$, и это было его экстремальное положение за бурю. Характер спектра высыпавшихся авроральных электронов в момент пересечения границ области захваченной радиации резко (на расстоянии $\sim 1^\circ$ широты) изменился от типичного для структур типа “перевернутого V”, к виду спектра диффузных высыпаний с максимумом в области энергий ~ 100 эВ [Тверская и др., 2009]. Таким образом, мы наблюдаем близкое совпадение (в пределах $\sim 0.1 L$) положений границы области захваченной радиации, центра западной электроструи и ночной границы высыпаний авроральных электронов типа “перевернутого V”. При этом их положение соответствует закономерности (1).

3.3. Кольцевой ток

Временные и пространственные масштабы формирования плазменного облака, создающего кольцевой ток магнитной бури (~ 10 мин – 1 ч; $2 - 5 \times 10^4$ км), таковы, что для экспериментального изучения процессов нужно иметь одновременно несколько спутников. До настоящего времени таких экспериментов не проводилось.

В работе [Тверской, 1997] эмпирическое соотношение (1) было использовано для построения радиального профиля давления плазмы кольцевого тока на стадии его симметризации в максимуме магнитной бури. Если в ослабленное во время главной фазы бури магнитное поле каким-либо образом инжектируются энергичные электроны, по мере восстановления и усиления поля энергия их будет расти. Для релятивистских электронов характерен крутой спектр, поэтому даже слабое усиление поля может вызвать значительное увеличение потоков. Поэтому область L_{\max} из соотношения (1) может соответствовать области максимального ослабления поля при $|Dst|_{\max}$ и, таким образом, характеризовать максимальное давление плазмы кольцевого тока.

Формула (1) приобретает ясный физический смысл. Как было отмечено в работе [Тверская, 1986], численный коэффициент 2.5×10^4 нТл близок к величине поля у экватора Земли ($H_0 = 3.1 \times 10^4$ нТл). Разница находится в пределах точности вычисления Dst . Таким образом, амплитуда Dst -вариации бури $|Dst|_{\max}$ определяется полем у экватора Земли и 4-ой степенью расстояния в плоскости экватора до L -оболочки, на которой происходит максимальное ослабление поля во время бури. Отметим, что минутный H_{SYM} -индекс обычно превышает амплитуду Dst -вариации бури на $\sim 10\%$, так что для $|H_{SYM}|_{\max}$ в формуле (1) численный коэффициент составит $\sim 3 \times 10^4$ нТл.

На рисунке 10 [Tverskaya et al., 2005] тонкими линиями показаны профили давления плазмы

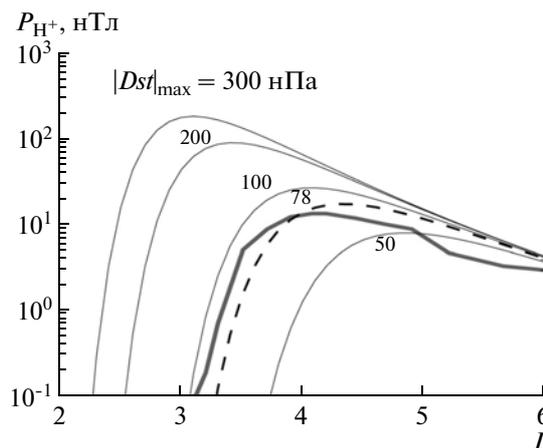


Рис. 10. Профили давления ионов кольцевого тока, рассчитанные по результатам работы [Тверской, 1997] для бурь с разными амплитудами $|Dst|_{\max}$ (указаны у каждой кривой). Штриховая линия – для бури 10.01.1997 г. ($|Dst|_{\max} = 78$ нТл). Жирная линия представляет “мгновенный” профиль давления ионов H^+ , измеренных на ИСЗ *Polar* в максимуме бури.

кольцевого тока в максимуме бурь с $|Dst|_{\max} = 50; 100; 200; 300$ нТл, рассчитанные по формулам из работы [Тверской, 1997]. Жирной линией – единственный до сих пор в мировой литературе “мгновенный” профиль давления плазмы кольцевого тока, измеренный в течение 15 мин. ИСЗ *Polar* в максимуме бури 10 января 1997 г. ($|Dst|_{\max} = 78$ нТл). Штриховая линия – теоретический профиль для этой бури. Наблюдается хорошее согласие с теоретическим предсказанием. Но пока это – единственный сопоставимый с теорией результат.

Автор в свое время пытался провести анализ положения максимумов плотности энергии кольцевого тока для сравнения с L_{\max} из (1) [Tverskaya, 1996]. Качественное согласие наблюдалось, так как плоские ($\Delta L \sim 0.5 - 1$) максимумы примыкали к линии, представляющей зависимость (1). Однако пролеты ИСЗ AMPTE через область кольцевого тока длились несколько часов, иногда попадая даже на разные фазы магнитной бури, не говоря уже о суббурях. При такой точности эксперимента какое-либо количественное сопоставление с зависимостью (1) было бы явно спекулятивным.

3.4. Плазмопауза

В работе [O'Brien and Moldwin, 2003] по данным измерений на ИСЗ CRRES была построена эмпирическая модель плазмопаузы L_{pp} в функции от минимума Dst , наблюдаемого в течение предшествующих 24-х часов

$$L_{pp} \sim 6.3 - 1.57 \lg|Dst|. \quad (4)$$

Авторы работы [O'Brien et al., 2003] обратили внимание, что зависимости (1) и (4) подобны:

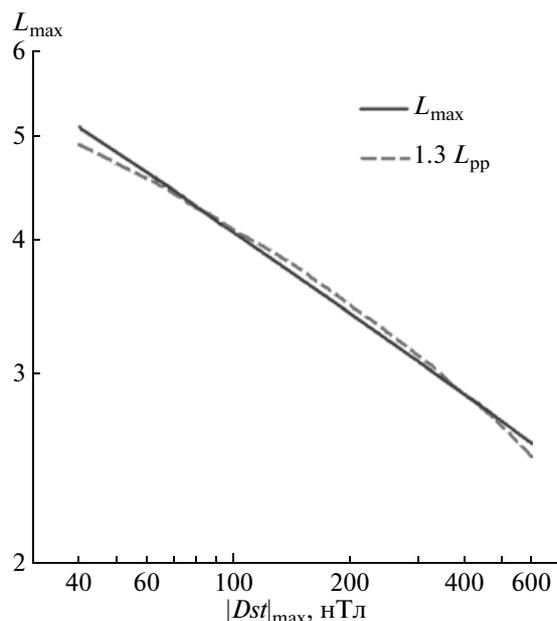


Рис. 11. Сравнение зависимостей (1) и (4).

кривая $1.3 L_{pp}$ практически совпадает с L_{max} в диапазоне Dst от -40 до -600 нТл. Эту особенность иллюстрирует рис. 11. Здесь представлены зависимости L_{max} и $1.3 L_{pp}$ от амплитуды $|Dst|_{max}$. Основываясь на таком совпадении и пространственном распределении областей генерации различных волн, авторы предположили, что в области $1.3 L_{pp} = L_{max}$ может происходить локальное ускорение релятивистских электронов волнами без смещения по L .

4. ДИНАМИКА ГРАНИЦ ПРОНИКНОВЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ В МАГНИТОСФЕРЕ

В околоземном космическом пространстве структура и потоки солнечных космических лучей (СКЛ) определяются топологией геомагнитного поля. Поскольку изменение топологии геомагнитного поля приводит к изменениям геомагнитных порогов обрезания СКЛ, а само магнитосферное поле является результатом взаимодействия сложной системы токов, то исследование динамики границ проникновения СКЛ в магнитосферу дает ценную информацию о динамике различных структурных образований в магнитосфере.

Исследования в этом направлении ведутся много лет. Получены эмпирические зависимости положения границ проникновения протонов СКЛ от геомагнитных индексов Dst , AE , Kp и параметров солнечного ветра. Мы отсылаем читателя к фундаментальным обзорам этих результатов [Moffitt and Sholer, 1973; Кузнецов и Тверская, 2007].

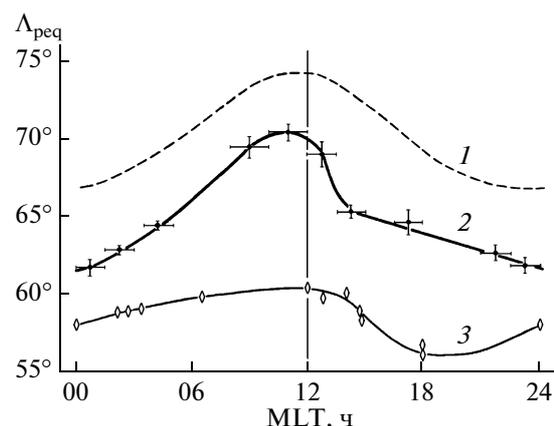


Рис. 12. Распределение экваториальных (Λ_{req}) границ проникновения протонов СКЛ с энергией больше 1 МэВ по местному времени в условиях различных магнитных возмущений: 1 – спокойные условия; 2 – умеренная магнитная буря; 3 – сильная магнитная буря.

Ниже мы представим результаты пока еще сравнительно редких работ по исследованию динамики границ проникновения солнечных протонов с энергиями ~ 1 МэВ во время геомагнитных возмущений по данным одновременных измерений на нескольких ИСЗ. При нескольких одновременно работающих полярных ИСЗ значительно расширяются возможности изучения пространственно-временных вариаций границ СКЛ в магнитосфере Земли: в этом случае удается получить “мгновенную” планетарную картину распределения границ по местному времени.

4.1. Граница проникновения в магнитосферу солнечных протонов с энергией ~ 1 МэВ при различных уровнях геомагнитной активности

На рисунке 12 представлены данные о распределении границ по местному времени (MLT) для разных уровней магнитной возмущенности [Иванова и др., 1985]. Граница проникновения протонов с $E_p > 1$ МэВ определялась по моменту спада их интенсивности от уровня на полярном плато. Кривая 1 соответствует значениям границ проникновения в спокойных условиях и построена по данным ИСЗ “Космос-900” и “Интеркосмос-17” для события 21–25.11.1977 г. Распределение границ по MLT в условиях умеренной геомагнитной активности представлено кривой 2. Эти данные получены на ИСЗ “Космос-842” и “Космос-900” в событии 19–22.09.1977 г. и соответствуют усредненным значениям в интервалах $\Delta MLT \sim 1.5-2$ ч при амплитуде Dst -вариации в интервале 50–70 нТл. Кривая 3 дает положение границ на главной фазе магнитной бури 3–5.04.1979 г. ($Dst \sim -200$ нТл) по одновременным данным ИСЗ “Космос-900” и “Космос-1067”. Эти значения

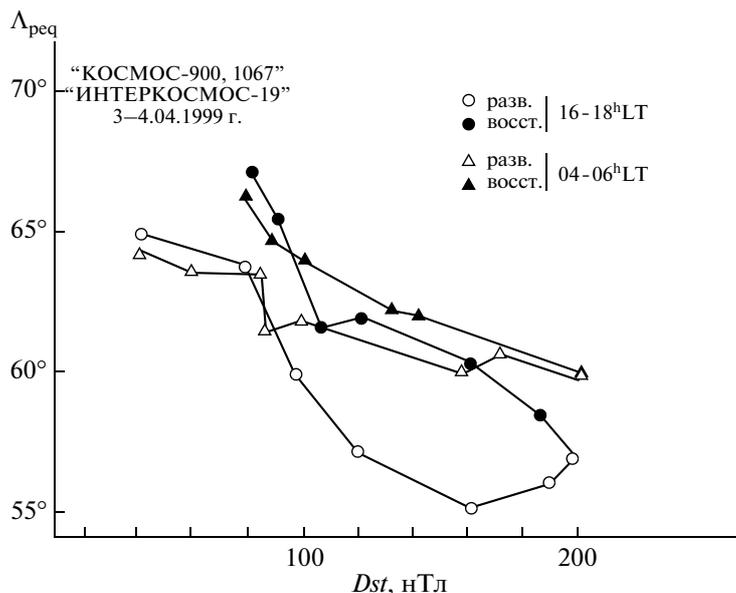


Рис. 13. Положение границ экваториальных (Λ_{req}) проникновения протонов СКЛ с энергией больше 1 МэВ на разных фазах сильной магнитной бури 3–4.04.1999 г. Светлые кружки и треугольники – главная фаза, темные – фаза восстановления.

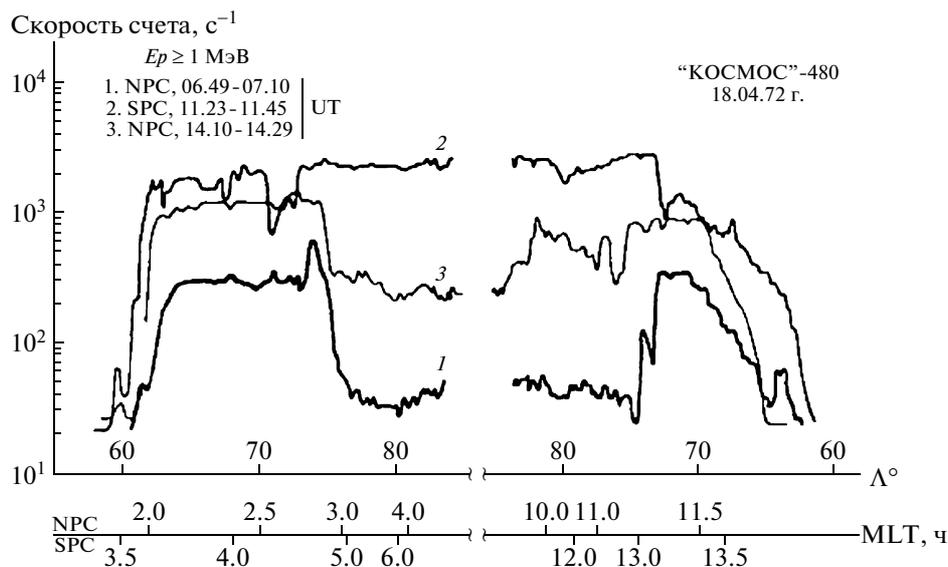


Рис. 14. Северо-южная асимметрия протонов СКЛ с энергией больше 1 МэВ в полярных шапках во время вспышки 18.04.1972 г. Представлены данные пролетов ИСЗ “Космос-480” через северную (NPC) и южную (SPC) полярные шапки.

получены при индивидуальных пересечениях границы ИСЗ “Космос-900” и “Космос-1067” за 3-часовой период вблизи максимума бури. Видно, что в условиях умеренной бури граница проникновения протонов СКЛ ближе всего подходит к Земле в предполуночные часы, во время сильной бури максимальное приближение границы наблюдается в раннем вечернем секторе. Эта картина отражает изменение топологии геомагнит-

ного поля при асимметричной инжекции бурового кольцевого тока.

4.2. Гистерезис в положении границ протонов СКЛ в магнитосфере между главной фазой и фазой восстановления магнитной бури

Присоединение данных ИСЗ “Интеркосмос-19” позволило более подробно отразить динами-

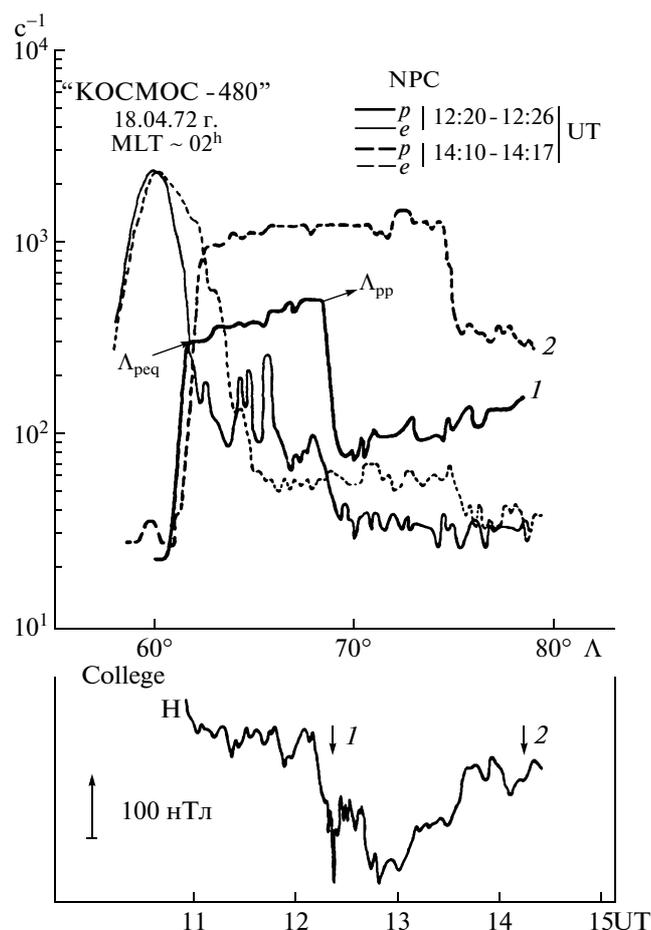


Рис. 15. Профили скоростей счета протонов с $E_p > 1$ МэВ и электронов с $E_e > 50$ кэВ для 2-х пролетов ИСЗ “Космос-480” в ночные часы в северном полушарии 18.04.1972 г. Λ_{req} – экваториальная граница, Λ_{pp} – полярная граница проникновения протонов. Внизу – H -составляющая магнитного поля ст. College.

ку изменения структуры геомагнитного поля во время бури 3–4.04.1979 г. [Сосновец и Тверская, 1986]. Было показано, что минимальная широта границы проникновения протонов (максимальное понижение поля) с $E_e > 1$ МэВ достигается в вечернем секторе за несколько часов до максимума бури. При этом разница в положении границ во вечернем и утреннем секторе достигает $\sim 5^\circ$.

На рисунке 13 представлен временной ход границ во время бури 3–5.04.1979 г. в узких секторах MLT (16 – 18^h и 04 – 06^h) в координатах инвариантная широта – амплитуда Dst -вариации. Точки соединены во временной последовательности. Светлые кружки и треугольники, соответственно, – вечерние и утренние точки на фазе развития бури, темные – на фазе восстановления. Наблюдается отчетливый гистерезис в положении границ: на фазе восстановления на одних и тех же местных временах кривая идет на несколько градусов

выше. Разница для вечернего сектора при одном и том же значении Dst на разных фазах бури достигает 5° . Эта разница обусловлена развитием асимметричного кольцевого тока на главной фазе бури с преимущественной инжекцией частиц в вечернем секторе.

Описанный эффект гистерезиса можно увидеть и в данных по более высокоэнергичным протонам СКЛ [Панасюк и др., 2004; Leske et al., 2001].

4.3. Северо-южная асимметрия потоков протонов СКЛ в полярных областях и динамика авроральной зоны

Впервые асимметрия потоков протонов СКЛ в диапазоне 1 – 20 МэВ в полярных шапках наблюдалась во время солнечно-протонного события в ноябре 1967 г. [Evans and Stone, 1969]. В течение ~ 20 ч регистрировались однородное заполнение южной полярной шапки (SPC) и структурированные профили с большими потоками на широте авроральной зоны и низкими потоками в северной шапке (NPC). В дальнейшем такие события регистрировались неоднократно. Неравномерное заполнение полярных шапок солнечными протонами наблюдается в условиях анизотропии их потоков в межпланетной среде, при этом заполнение южной или северной полярных шапок определяется направлением межпланетного магнитного поля [Morfill and Sholer, 1973; Кузнецов и Тверская, 2007].

Примеры широтных профилей потоков солнечных протонов с энергиями >1 МэВ, зарегистрированных на ИСЗ “Космос-842” в событии 18.04.1972 г., приведены на рис. 14 [Дарчиева и др., 1973]. Хорошо видны авроральные области возрастания протонов в обеих полушариях и северо-южная асимметрия потоков на полярных платформах в разных шапках.

Во время геомагнитных возмущений размеры полярных шапок и аврорального овала изменяются как по положению, так и по протяженности, соответственно изменяется и положение границ на широтных профилях протонов СКЛ. Тем самым по положению экваториальных и полярных границ проникновения протонов СКЛ можно судить о динамике этих областей магнитосферы.

Пример вариаций авроральной области проникновения протонов СКЛ во время небольшой суббури на фазе восстановления слабой магнитной бури приведен на рис. 15 [Иванова и др., 1976]. Здесь представлены два последовательных пролета ИСЗ “Космос-480” в северном полушарии. Приведены профили скоростей счета протонов с $E_p > 1$ МэВ и электронов с $E_e > 50$ кэВ и H -составляющая магнитного поля станции авроральной зоны College. Λ_{req} – экваториальная граница проникновения протонов, Λ_{pp} – полярная граница. На первом пролете, который происхо-

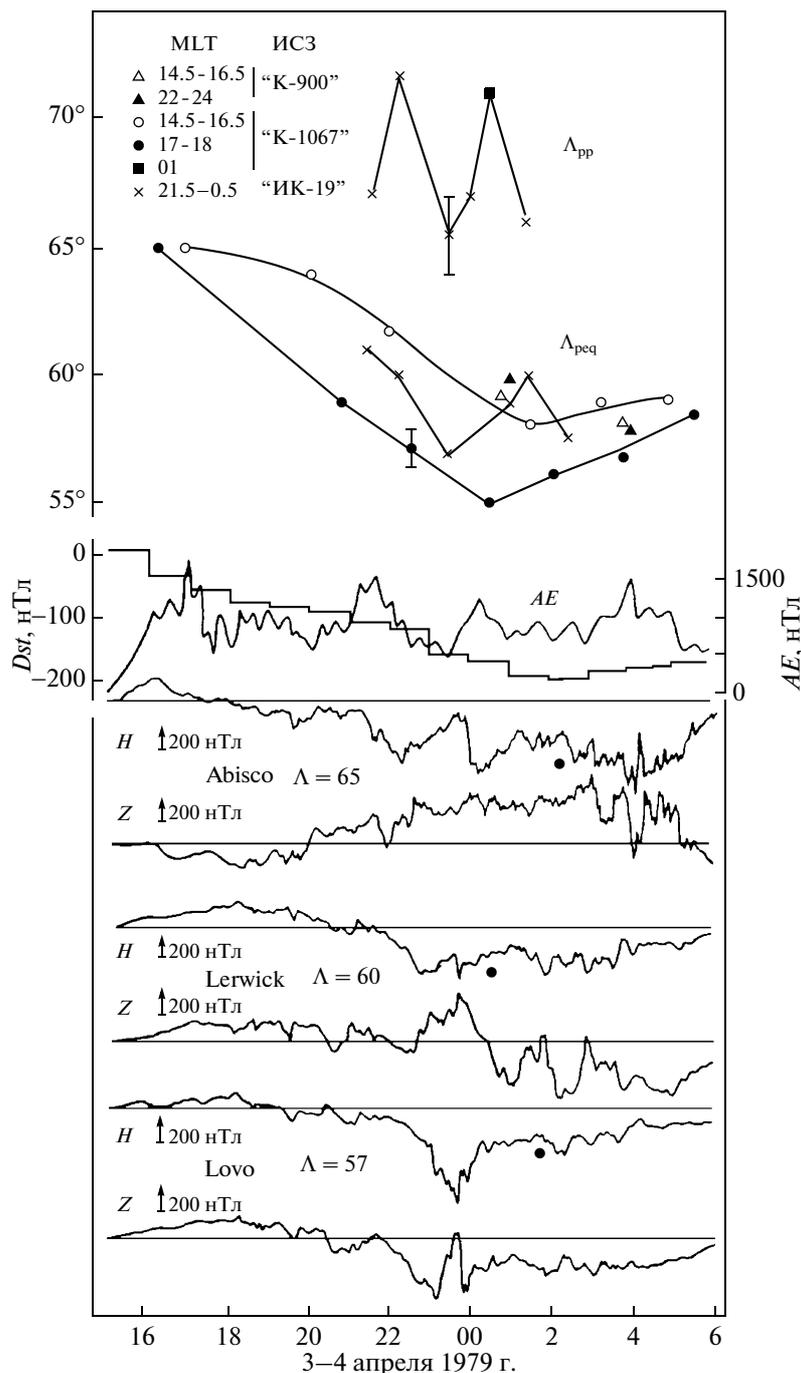


Рис. 16. Вариации широтного положения экваториальных (Λ_{req}) и полярных (Λ_{pp}) границ проникновения солнечных протонов с $E_p \sim 1$ МэВ в магнитосферу в послеполуденно-ночном секторе по данным трех ИСЗ 3–4.04.79 г. Приведены Dst -вариация, AE -индекс, H - и Z -составляющие станций Abisco, Lerwick, Lovo.

дил на фазе развития суббури, хорошо видно, что авроральная область проникновения протонов совпадает с зоной нерегулярных потоков электронов за границей области захваченной радиации. Λ_{req} на 1–2° проникает внутрь области захваченной радиации, Λ_{pp} регистрируется на ~69°. На следующем пролете, на фазе восстановления суббури, Λ_{pp} переместилась на ~76°. Одновременно

расширилась и область, в которой регистрировались нерегулярные потоки электронов.

В работе [Дарчиева и др., 1990] было проведено пока что единственное в мировой литературе исследование динамики границ солнечных протонов в магнитосфере по одновременным данным 3-х полярных ИСЗ. Результаты иллюстрирует рис. 16. Здесь представлен временной ход границ

Λ_{req} и Λ_{pp} для послеполуночно-ночного сектора магнитосферы во время сильной бури 3–4 апреля 1979 г. ($Dst \sim -200$ нТл). Данные сопоставлены с индексами геомагнитной активности Dst и AE , а также с динамикой западной полярной электроструи. Как уже было отмечено выше, преимущественное понижение широты Λ_{req} наблюдается на главной фазе бури в вечернем секторе. Хорошо видно несоответствие амплитуды AE -индекса динамике западной электроструи. В 22:30 UT AE -индекс показал спад суббулевой активности. В действительности, в это время электроструя сместилась на более низкие широты. После 22:00 UT амплитуда возмущения на станции авроральной зоны Abisko убывала, а на среднеширотных станциях Lerwick ($\Lambda \sim 60^\circ$) и Lovo ($\Lambda \sim 57^\circ$) нарастала. Электроструя, спускаясь к низким широтам, в 23:00 прошла зенит ст. Lerwick ($\Delta Z \sim 0$), а в 23:30 достигла зенита ст. Lovo. В это время ИСЗ “Интеркосмос-19” пересек Λ_{req} на широте 57° ($L \sim 3.3$) на ночной стороне. Отметим, что это значение L соответствует зависимости (1). В это же время полярная граница Λ_{pp} приблизилась до $\sim 65^\circ$. Λ_{pp} отодвигалась к полюсу на фазе восстановления каждой суббури.

Несовершенство индексов авроральной активности AU , AL , AE отмечалось неоднократно. Эти индексы не могут служить адекватной характеристикой полярных электроструй уже для умеренных магнитных бурь, тем более, для сильных магнитных бурь [Хорошева, 1987]. Поэтому использование их при моделировании динамики магнитосферных токовых систем в процессе развития магнитной бури является весьма проблематичным.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследованиях динамики релятивистских электронов внешнего пояса достигнут значительный прогресс. Выявлены основные источники частиц, разработана теория диффузии под действием нестационарных электрических полей, предложены механизмы ускорения и потерь, выяснена природа “ударной” инжекции во время биполярных внезапных импульсов. Однако, остается много нерешенных задач. Неясно, каково соотношение между различными источниками быстрых потерь релятивистских электронов во время главной фазы магнитной бури: быстрым переносом, уменьшением размеров области замкнутых дрейфовых оболочек, высыпанием при взаимодействии с разными типами волн. Остается открытым вопрос о механизме ускорения релятивистских электронов во время бурь. Пока невозможно предсказать, во время каких бурь происходит инжекция электронов во внутренние области магнитосферы. Существующие эксперименты не позволяют сделать однозначного выбо-

ра в пользу ускорения электронов каким-либо типом волн. Необходимы эксперименты по одновременному измерению частиц и полей во внутренней магнитосфере, плазменном слое хвоста и в межпланетной среде.

Перспективной с точки зрения космической погоды является закономерность (1), которая позволяет предсказать в зависимости от амплитуды магнитной бури минимальные широты, до которых приближаются к Земле различные магнитосферные плазменные структуры. Таким образом, один из самых опасных факторов космической погоды одновременно является неким удобным диагностическим “пробным зарядом” в магнитосферной плазме.

Граница проникновения протонов СКЛ в магнитосферу отслеживает изменения топологии геомагнитного поля во время магнитных возмущений. Измерения протонов с энергиями ~ 1 МэВ не требуют сложной прецизионной аппаратуры и регулярно ведутся на нескольких полярных ИСЗ. Как было показано выше, экваториальные и полярные границы протонов СКЛ при наличии одновременных измерений на разных местных временах позволяют диагностировать планетарное распределение вариаций геомагнитного поля и таких плазменных структур, как кольцевой ток и авроральный овал.

Важность исследований динамики границ протонов СКЛ в магнитосфере для предсказания космической погоды несомненна: они определяют время пребывания ИСЗ в областях с их высокими потоками, воздействующими на бортовые системы и космонавтов.

Автор пользуется случаем выразить самую сердечную признательность Н.Н. Павлову за ценные обсуждения и Л.А. Кузнецовой и Т.Н. Лукиной за помощь в подготовке иллюстраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондарева Т.Б., Тверская Л.В. О дрейфе частиц радиационных поясов во время суббурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 13. № 4. С. 723–728. 1973.
- Вернов С.Н., Вакулов П.В., Горчаков Е.В. и др. Изучение мягкой компоненты космических лучей за пределами атмосферы // В сб. “Искусственные спутники Земли”. Т. 1. Вып. 2. С. 61–69. 1958.
- Горчаков Е.В., Иозенас В.А., Терновская М.В. и др. Инжекция жестких электронов во внешний радиационный пояс во время магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25. № 5. С. 738–742. 1985.
- Дарчиева Л.А., Иванова Т.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. О структурных и динамических особенностях проникновения солнечных космических лучей в полярные шапки // Изв. АН СССР. Сер. физ. Т. 37. № 6. С. 1313–1317. 1973.
- Дарчиева Л.А., Иванова Т.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Динамика экваториальных и полярных гра-

- ниц проникновения солнечных протонов с энергией ~ 1 МэВ в магнитосферу во время сильной магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 30. № 5. С. 856–857. 1990.
- Демехов А.Г., Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М., Нанн Д. Ускорение электронов в магнитосфере свистовыми волнами переменной частоты // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 6. С. 711–716. 2006.
 - Иванова Т.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Эффект северо-южной асимметрии солнечных космических лучей и динамика плазменного слоя и дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 16. № 1. С. 159–163. 1976.
 - Иванова Т.А., Кузнецов С.Н., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Динамика низкоширотной границы проникновения в магнитосферу солнечных протонов малых энергий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25. № 1. С. 7–12. 1985.
 - Кузнецов С.Н., Тверская Л.В., Хорошева О.В. Быстрая инжекция энергичных частиц в зазор между внутренним и внешним радиационными поясами // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 12. № 6. С. 1113–1114. 1972.
 - Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н., Юшков Б.Ю. и др. Динамика радиационных поясов Земли во время сильных магнитных бурь по данным ИСЗ КОРОНАС-Ф // Астрон. вестн. Т. 41. № 4. С. 350–359. 2007.
 - Кузнецов С.Н., Тверская Л.В. Проникновение космических лучей в магнитосферу // Модель Космоса. М.: КДУ, С. 579–591. 2007.
 - Павлов Н.Н., Тверская Л.В., Тверской Б.А., Чучков Е.А. Вариации энергичных частиц радиационных поясов во время сильной магнитной бури 24–26 марта 1991 года // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 6. С. 41–45. 1993.
 - Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л. и др. Магнитные бури в октябре 2003 г. // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 509–554. 2004.
 - Сосновец Э.Н., Тверская Л.В. Динамика кольцевого тока по данным прямых измерений и по данным о солнечных космических лучах в магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. № 1. С. 107–114. 1986
 - Старков Г.В. Планетарная морфология полярных сияний // Магнитосферно-ионосферная физика. СПб.: Наука, С. 85–90. 1993.
 - Тверская Л.В. О границе инжекции электронов в магнитосферу Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. № 5. С. 864–865. 1986.
 - Тверская Л.В. Диагностика магнитосферных процессов по данным о релятивистских электронах радиационных поясов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 5. С. 22–32. 1998.
 - Тверская Л.В. Динамика радиационных поясов Земли // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. № 4. С. 12–17. 2010.
 - Тверская Л.В., Тельцов М.В., Шумищуров В.И. Измерение дозы радиации на станции МИР во время солнечных протонных событий в сентябре-октябре 1989 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 31. № 6. С. 928–930. 1991.
 - Тверская Л.В., Веденькин Н.Н., Гинзбург Е.А. и др. Динамика релятивистских электронов радиационных поясов в ноябре 2004 г. – январе 2005 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 2. С. 154–158. 2006.
 - Тверская Л.В., Гинзбург Е.А., Иванова Т.А., Павлов Н.Н., Свидский П.М. Особенности динамики внешнего радиационного пояса во время сильной магнитной бури 15 мая 2005 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 6. С. 737–744. 2007.
 - Тверская Л.В., Марьин Б.В., Тельцов М.В., Иванова Т.А. Высыпания авроральных электронов во время коллапса области захваченной радиации на главной фазе магнитной бури 15 мая 2005 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 6. С. 786–790. 2009.
 - Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 224 с. 1968.
 - Тверской Б.А. О продольных токах в магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 2. № 5. С. 991–995. 1982.
 - Тверской Б.А. Механизм формирования структуры кольцевого тока магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 5. С. 555–559. 1997.
 - Тверской Б.А. Основы теоретической космофизики. Избранные труды. М.: УРСС, 336 с. 2004.
 - Хорошева О.В. Магнитосферные возмущения и связанная с ними динамика ионосферных электроструй, полярных сияний и плазмплаузы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 27. № 5. С. 864–811. 1987.
 - Allen J., Sauer H., Frank L., Reiff P. Effects of the March 1989 Solar Activity // Trans. AGU. V. 70. № 46. P. 1479–1488. 1989.
 - Baker D.N., Blake J.B., Klebesadel A.J., Higbie P.R. Highly relativistic electrons in the Earth's outer magnetosphere. 1. Life-times and temporal history 1974–1984 // J. Geophys. Res. V. 91. № A3. P. 4285–4294. 1986.
 - Blake J.B., Gussenhoven M.S., Mullen E.G., Fillius R.W. Identification of an unexpected space radiation hazard // IEEE Trans. Nucl. Sci. V. 39. P. 1761–1765. 1992.
 - Blake J.B., Selesnik R.S., Baker D.N., Kanekal S. Studies of relativistic electron injection events in 1997 and 1998 // J. Geophys. Res. V. 106. № A10. P. 19157–19168. 2001.
 - Burin des Roziers E., Li X., Baker D.N. et al. Energetic plasma sheet electrons and their relationship with the solar wind: A Cluster and Geotail study // J. Geophys. Res. V. 114. AO2220. doi: 10.1029/2008JA013696. 2009.
 - Evans L.C., Stone E.C. Access of solar protons into polar cap. A persistent north-south asymmetry // J. Geophys. Res. V. 74. № A4. P. 5127–5131. 1969.
 - Feldstein Y.I. Modeling of magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium // Space Sci. Rev. V. 59. № 1. P. 83–105. 1992.
 - Friedel R.H., Reeves W.G.P., Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere – A review // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. P. 265–283. 2002.
 - Ingraham J.C., Cayton T.E., Belian R.D. et al. Multisatellite characterization of the large energetic electron fluxes increase at $L = 4-7$, in the five-day period following the March 24, 1991 solar energetic particle event // Proc. Workshop on the “Earth’s Trapped Particle Environment”, ed. G.D. Reeves. AIP Conf. Proc. 383. P. 103–108. 1996.

- *Kropotkin A.P.* Relativistic electron transport processes associated with magnetospheric substorms // *Radiat. Meas.* V. 26. P. 343–346. 1996.
- *Leske R.A., Mewaldt R.A., Stone E.C., von Rosenvinge T.T.* Observations of geomagnetic cutoff variations during solar energetic particle events and implication for the radiation environment at the Space Station // *J. Geophys. Res.* V. 106. № A12. P. 30.011–30.022. 2001.
- *Li X., Roth I., Temerin I.M., Wygant J.R., Hudson M.K., Blake J.B.* Simulation of the prompt energization and transport of radiation belt particles during the March 24, 1991 SSC // *Geophys. Res. Lett.* V. 20. P. 2423–2426. 1993.
- *Li X., Baker D.N., Temerin M., Reeves G.D., Belian R.D.* Simulation of Dispersion less Injections and Drift Echoes of Energetic Electrons Associated with Substorms // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. P. 3759–3762. 1998.
- *Li X., Baker D.N., Temerin M. et al.* Rapid Enhancements of Relativistic Electrons Deep in the Magnetosphere during the May 15, 1997 Magnetic Storm // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A3. P. 4467–4476. 1999.
- *Lyatsky W., Khazanov G.V.* Effect of solar wind density on relativistic electrons at geosynchronous orbit // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. L03109, doi: 10.1029/2007GL032524. 2008.
- *Marjin B.V., Tverskaya L.V., Teltsov M.V., Ivanova T.A., Feigin V.M.* Extreme Low-Latitude Auroral Oval Position in 2003–2004 Years as Inferred from Meteor-3M Auroral Electron Precipitation Data // 2 International Symposium SEE-2005. Nor-Ambert. Armenia. P. 124–126. 2006.
- *McIlwain C.E.* Processes acting upon the outer zone electrons. Report of Solar-Terr. Physics Symposium. UCSD-SP-66-5. Belgrade. 18 p. 1966.
- *Morfill G., Scholer M.* Study of the magnetosphere using energetic solar particles // *Space Sci. Rev.* V. 15. P. 267–353. 1973.
- *O'Brien T.P., Moldwin M.B.* Empirical plasmapause models from magnetic indices // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. P. 1152–1155. doi: 10.1029/2002GL0160007. 2003.
- *O'Brien T.P., Lorentzen K.R., Mann I.R. et al.* Energization of relativistic electrons in presence of ULF power and MeV microbursts: Evidence for dual *ULF* and *VLF* acceleration // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A8. P. 1329–1338. doi: 10.1029/2002JA009784. 2003.
- *Paulikas G.A., Blake J.B.* Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit, in *Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes* // *Geophys. Monogr. Ser.* V. 21. P. 180–186. 1979.
- *Shprits Yu.Y., Subbotin D.A., Meredith N.P., Elkington S.R.* // *J. Atmos. Solar.-Terr. Phys.* V. 70. P. 1694–1712. 2008.
- *Temerin M., Li X.* A new model for the prediction of *Dst* on the basis of the solar wind // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A12. P. 1472–1481. doi: 10.1029/2001JA007532. 2002.
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Lakhina G.S., Alex S.* The extreme magnetic storm of 1–2 September, 1859 // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A7. P. 1268–1272. doi: 10.1029/2002JA009504. 2003.
- *Tverskaya L.V.* Dynamics of energetic electrons in the radiation belts // *Geophysical Monograph* 97. AGU. P. 183–186. 1996.
- *Tverskaya L.V.* The Main phase substorms and related phenomena in charged particle population // *Proc. of 5 Intern. Conf. on Substorms.* St. Petersburg. SP-443. P. 459–462. 2000.
- *Tverskaya L.V., Ginzburg E.A., Pavlov N.N., Svidsky P.M.* Injection of relativistic electrons during the giant *SSC* and greatest magnetic storm of the space era // *Adv. Space Res.* V. 31. № 4. P. 1033–1038. 2003a.
- *Tverskaya L.V., Pavlov N.N., Blake J.B., Selesnick R.S., Fennell J.F.* Predicting the L-position of the storm-injected relativistic electron belt // *Adv. Space Res.* V. 31. № 4. P. 1039–1044. 2003b.
- *Tverskaya L.V., Ivanova T.A., Pavlov N.N. et al.* Storm-time formation of a relativistic electron belt and some relevant phenomena in other magnetospheric plasma domains // *Adv. Space Res.* V. 36. P. 2392–2400. 2005.
- *Tverskoy B.A.* Main Mechanisms in the Formation of the Earth's Radiation Belts // *Rev. Geophys.* V. 7. № 1, 2. P. 219–231. 1969.
- *Tverskoy B.A.* Electric fields in the magnetosphere and the origin of trapped radiation // *Solar Terrestrial Physics* / 1970. ed. E.R. Dyer. D. Dordrecht–Holland: Reidel Publishing Co., Part III. P. 297–317. 1972.
- *Vakulov P.V., Kovrygina L.M., Mineev Ju.V. et al.* Variations in intensity and spectrum of energetic electrons in earth radiation belts during strong magnetic disturbances // *Space Res.* V. 16. P. 529–534. 1976.
- *Van Allen J.A.* Charged Particles in the Magnetosphere // *Rev. Geophys.* V. 7. № 1, 2. P. 233–256. 1969.
- *Vernov S.N., Gorchakov E.V., Kuznetsov S.N. et al.* Particle Fluxes in the Outer Geomagnetic Field // *Rev. Geophys.* V. 7. № 1, 2. P. 257–280. 1969.
- *Williams D.J., Arens L.J., Lanzerotti L.I.* Observation of Trapped Electrons at Low and High Altitudes // *J. Geophys. Res.* V. 73. № 17. P. 5673–5696. 1968.