

УДК 524.1+550 385

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПРОТОНОВ СКЛ В МАГНИТОСФЕРЕ

© 2011 г. Л. Л. Лазутин¹, Е. А. Муравьева¹, К. Кудела², М. Сливка²

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московского Государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия

²Institute of Experimental Physics, Slovak Acad. Sci., Watsonova 47, 04001 Kosice, Slovakia, e-mail: III@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 07.10.2009 г.

После доработки 30.04.2010 г.

Измерения протонов СКЛ в магнитосфере могут использоваться для верификации моделей магнитного поля Земли. Во время сильной магнитной бури 29–30.10.2003 г. на низковысотном спутнике КОРОНАС-Ф были измерены широтные профили высыпающихся солнечных космических лучей с энергией 1–90 МэВ. Поток высыпающихся протонов может поддерживаться равным межпланетному только за счет сильной питч-угловой диффузии возникающей при близости радиуса кривизны силовых линий и ларморовского радиуса вращения частицы. Наблюдаемые границы области сильной диффузии можно сравнить с ожидаемыми по модели магнитного поля магнитосферы Земли. Рассчитанные по модели TS05 и параболической модели значения параметра адиабатичности для нескольких моментов пролетов спутника КОРОНАС-Ф не всегда соответствуют результатам измерений. Приводятся соображения о возможных изменениях в модельных конфигурациях магнитного поля, способных устранить расхождения с экспериментом и объяснить глубокое проникновение солнечных протонов мэВных энергий во внутреннюю магнитосферу Земли.

1. ВВЕДЕНИЕ

Конфигурация и динамика магнитосферы Земли во время магнитных бурь, особенно во время сильных магнитных бурь, являются предметом серьезного внимания, поскольку эти знания необходимы для понимания процессов в магнитосфере, численного моделирования этих процессов и для прикладных задач космической погоды. От простых моделей прошлых лет, управляемых одним параметром, разработчики моделей магнитосферы пришли к сложным многопараметрическим конструкциям, учитывающим не только текущее состояние солнечного ветра, но и его развертку во времени в данной конкретной буре. Магнитное поле в этих моделях представляется суперпозицией внутреннего магнитного поля Земли и полей внешних источников – токов, текущих в магнитосфере. Многие модели достаточно точно предсказывают временной ход кольцевого тока и измерения магнитного поля на спутниках [Tsyganenko and Sitnov 2005; Alexeev et al., 2003; Алексеев и Калегаяев, 2008].

Однако несмотря на несомненный прогресс, сам факт непрерывного усложнения моделей свидетельствует о неудовлетворенности разработчиков и потребителей. В сущности, хорошего согласия предсказаний с наблюдаемым на Земле эффектом кольцевого тока можно добиться различным сочетанием токовых систем, составляющих модель, поэтому одного согласия пред-

сказанной моделью и измеренной *Dst*-вариацией не достаточно для того, чтобы быть уверенным в точности модели. Требуются дополнительные независимые тесты, и одним из пробников являются солнечные космические лучи, динамика и структура их проникновения в магнитосферу Земли.

Солнечные космические лучи (СКЛ) проникают в спокойное время в глубь магнитосферы Земли до авроральных широт, и вплоть до $L = 2.5$ во время сильных магнитных бурь. Траектории движения частиц больших энергий (>100 МэВ) по штермеровским орбитам в магнитном поле рассчитываются численно, и точность таких расчетов, их соответствие экспериментальным данным, лишь в слабой степени зависит от точности применяемых моделей магнитного поля Земли. В области низких энергий (1–100 МэВ), о которых и будет идти речь в данной работе, влияние внешних источников магнитного поля на проникновение протонов резко возрастает. Более того, меняется и сам характер проникновения: протоны больших энергий приходят прямо, свободно, и при анизотропном распределении СКЛ в межпланетном пространстве образуют выделенные ограниченные зоны прихода. Протоны мэВных энергий лишь в полярную шапку проникают свободно вдоль магнитных силовых линий. В авроральной зоне, на замкнутых силовых линиях, их движение подобно частицам радиационных поясов, и границы проникновения смыкаются, вы-

страиваясь вдоль дрейфовых траекторий. Отличия в характере движения протонов в хвосте и в авроральной зоне особенно четко видны при анизотропном приходе частиц от Солнца. По измерениям на спутнике КОРОНАС-Ф такой случай северо-южной асимметрии был рассмотрен в работе [Лазутин и Кузнецов, 2010]. Поток протонов, уменьшенный на порядок в северной полярной шапке по сравнению с южной, резко возрастает и вырывается при переходе в зону квазизахвата, что свидетельствует о движении частиц вдоль силовой линии между зеркальными точками. В отличие от динамики протонов на замкнутых дрейфовых орбитах радиационного пояса, здесь адиабатические инварианты не сохраняются, и нет однозначности в характере проникновения протонов СКЛ. Известны случаи накопления солнечных протонов, частичный захват, в результате чего при переходе от полярной шапки в авроральную зону регистрируемый поток частиц возрастает, в других случаях такого возрастания не происходит. Обсуждение этих эффектов содержится в обзоре Переясловой, [1982]. Кроме того, границы проникновения СКЛ на ночной и дневной стороне в общем случае не одинаковы, это связано с недипольной конфигурацией реальной магнитосферы и с особенностью питч-угловой диффузии частиц [Ильин и др., 1984; Кузнецов и Юшков, 2002].

Таким образом, пространственное распределение солнечных протонов многообразно, и это многообразие есть результат реакции СКЛ на изменение конфигурации магнитосферы. Поэтому измерения структуры проникновения протонов СКЛ могут служить средством исследования магнитосферы. Однако успехи в этом направлении пока довольно скромны. Наиболее развитым полем столкновения СКЛ и моделей магнитосферы является расчет глубины проникновения СКЛ во внутреннюю магнитосферу, моделирование жесткости обрезания путем траекторных расчетов. Для спокойной магнитной обстановки результаты моделирования дают приемлемое согласие, тогда как для повышенной активности, особенно для сильных магнитных бурь, расчетная глубина проникновения не соответствует эксперименту, какие бы модели магнитосферы не применялись: протоны всегда проникают на более низкие широты. Так, в траекторных расчетах, выполненных в работах [Kress et al., 2005], протоны с энергией 15 МэВ должны проникать лишь до $L = 3.7$, тогда как по наблюдениям на спутнике НЕО граница проникновения (ГП) располагалась на $L = 2.5$, и авторы вынуждены были предположить дополнительно существование радиальной диффузии, которая продвигает протоны ближе к Земле. Наши измерения во время той же бури на спутнике КОРОНАС-Ф показали, что граница проникновения 24.11.2001 г. держится на расстоянии $L < 3$ в течение 8 ч. от начала главной фазы до начала фа-

зы восстановления, в максимуме бури доходя до $L = 2.3$ [Lazutin et al., 2009]. Расхождение эксперимента с результатами расчета свидетельствуют о том, что либо методика расчета ошибочна, либо неточны используемые при расчете модели магнитосферы.

В настоящей работе представлены первые результаты сравнения предсказания современных моделей магнитосферы с измерениями солнечных протонов на полярном спутнике КОРОНАС-Ф во время серии экстремальных магнитных бурь в октябре 2003 г. Необходимо отметить, что такие экстремально сильные бури наблюдаются редко, и поэтому модели магнитосферы основывались на измерениях во время не столь сильных возмущений. В этой связи приведенные ниже результаты не следует рассматривать как критику моделей в целом, но лишь как оценку возможности экстраполяции на структуру магнитосферы во время сильных магнитных бурь.

2. МОДЕЛИ МАГНИТОСФЕРЫ И ШИРОТНЫЕ ПРОФИЛИ ПРОТОНОВ СКЛ

2.1. Магнитная обстановка в октябре 2003 г.

Подробный анализ развития октябрьских событий представлен в ряде работ, из которых отметим комплексный разбор возмущений от Солнца до Земли в работе [Панасюк и др., 2004]. Магнитная буря 29–31 октября 2003 года была одной из самых сильных бурь прошедшего цикла солнечной активности. Собственно, это была не одна буря, а цепочка из трех бурь с нарастающей мощностью (рис. 1). Одновременно на орбите Земли регистрировался повышенный поток солнечных космических лучей. По этой ли причине, или по другой, но в измерениях солнечного ветра на спутнике ACE наблюдались длительные провалы, что привело к определенным трудностям в наших расчетах конфигурации магнитосферы по модели Цыганенко TS05, которая требует в качестве входных параметров пятиминутные значения V_z -компоненты межпланетного магнитного поля, скорости и плотности солнечного ветра. Преодолеть эти трудности помогла работа [Dmitriev et al., 2005], посвященная восстановлению параметров солнечного ветра во время этой бури по измерениям на других спутниках и по косвенным признакам.

2.2. Солнечные космические лучи в магнитосфере

Измерения протонов СКЛ проводились на низковысотном (500 км) спутнике КОРОНАС-Ф с круговой полярной орбитой. Спектрометр имел четыре энергетических интервала протонов, 1–5, 16–26, 26–50 и 50–90 МэВ. За один оборот вокруг

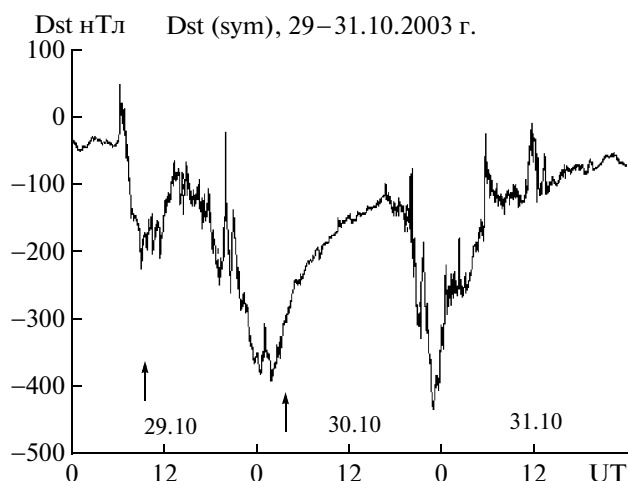


Рис. 1. Вариации индекса Dst sym 29.31.10.2003 г. Моменты пролетов КОРОНАС-Ф, анализируемые в работе, указаны стрелками.

Земли за 90 мин широтные профили проникающих в магнитосферу частиц измерялись четыре раза. Результаты измерений, исследование проникновения и захвата солнечных космических лучей на дрейфовые оболочки подробно описаны в работах [Lazutin et al., 2006; Лазутин и др., 2007], что позволяет нам перейти к обозначенной выше теме.

На рис. 2 приведены широтные профили протонов в трех энергетических каналах в максимуме второй магнитной бури из трех в октябрьской цепочке бурь. При всем разнообразии радиальных профилей солнечных протонов в магнитосфере можно выделить этот, как один из наиболее распространенных профилей — с постоянной интенсивностью как в полярной шапке, так и в зоне квазизахвата. На самой границе проникновения кривые для разных энергий могут “разъезжаться”, но могут и совпадать, особенно во время сильных магнитных бурь, такое совпадение есть на рис. 2.

Граница проникновения протонов, определенная как точка спада интенсивности вдвое, находится на широте $53 \pm 2^\circ$ ($L = 2.5$). В работе [Панасюк и др., 2004] для этой же бури определялась граница проникновения солнечных электронов с энергией 0.3 МэВ и во время пролета, представленного на рис. 2, она находилась на минимальной для всей бури магнитной широте 58° . В работе [Сергеев и др., 1987] отмечалось, что электроны СКЛ проникают в магнитосферу Земли на $2-3^\circ$ ниже широты полярной шапки; таким образом в рассматриваемое время область квазизахвата располагалась от $\sim 60^\circ$ до 53° или между $L = 4.0$ и 2.7 .

На рис. 2 темпы счета в разных каналах нормированы до совпадения потоков в полярной шапке, что позволяет заметить, что ГП во всех каналах совпадает. Более того, наблюдается совпаде-

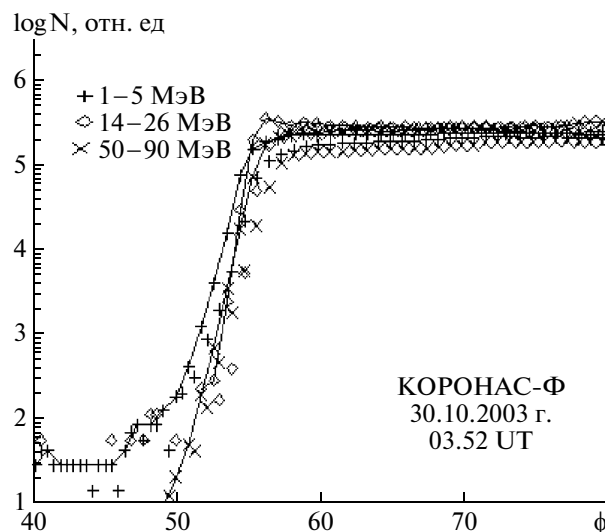


Рис. 2. Широтный профиль протонов СКЛ 30.10.2003 г. По оси абсцисс — геомагнитная широта, по оси ординат — интенсивность протонов, выровненная по измерениям в полярной шапке. Сплошные линии со значками — ночной пролет, отдельные значки — дневной.

ние границ проникновения в ночном и дневном секторах.

Такая структура профиля может быть понятна, исходя из следующих предположений:

1. Совпадение потока частиц в зоне квазизахвата с потоком вне магнитосферы означает, что накопления протонов в ловушке не происходит, сколько частиц входит во внутреннюю магнитосферу, столько же ее покидает через один дрейфовый оборот.

2. Большая часть орбит спутника на высоте 500 км проходит ниже “отрогов” радиационного пояса, за исключением пролетов над Бразильской магнитной аномалией. Следовательно, протонный спектрометр на всех остальных пролетах регистрирует только высыпавшиеся частицы. Для поддержания потока высыпавшихся частиц на максимальном уровне должен иметь место режим сильной питч-угловой диффузии.

3. Хотя в возмущенной магнитосфере наблюдается большое разнообразие типов магнитных пульсаций и ОНЧ излучений (например, [Клейменова, 2007]), протонный пояс в отличие от электронного довольно устойчив и постоянно существующая сильная диффузия протонов может обеспечиваться лишь на кривизне силовых линий при следующих обстоятельствах.

Когда кривизна силовой линии (в плоскости магнитного экватора) становится сравнима с ларморовским радиусом частиц, при пролете через такую критическую область питч-угол частицы меняется. Нарушается первый адиабатический инвариант. Параметр адиабатичности ϵ определя-

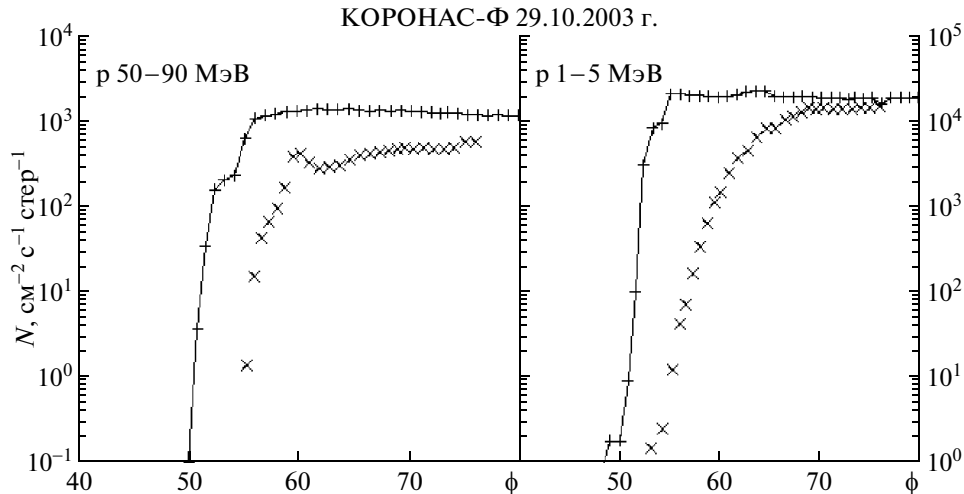


Рис. 3. Широтные профили протонов 50–90 МэВ (слева) и 1–5 МэВ (справа) ночного (сплошные линии) и дневного пролетов — отдельные значки 29.10.2003 г.

ется как отношение ларморовского радиуса и радиуса кривизны силовой линии:

$$\varepsilon = \rho c / (q B_0 R_c) = \rho / R_c, \quad (1)$$

где ρ — ларморовский радиус протона, p — импульс, q — заряд, B_0 и R_c — напряженность и радиус кривизны силовой линии магнитного поля в точке наблюдения. В ряде работ основанных как на траекторных расчетах, так и на измерениях частиц на спутниках, предполагалось существование резкой границы между областями с нарушением и сохранением адиабатичности [Сергеев и Цыганенко, 1982; Kuznetsov et al., 1988; Кузнецов и Юшков, 2002; Schulz, 1991; Imhof et al., 1997]. В работе [Young et al., 2008] было показано, что даже для спокойной магнитосферы смена режимов диффузии происходит постепенно, хотя и достаточно быстро, при критическом значении $\varepsilon = 0.2$ и выше. Граница режима сильной питч-угловой диффузии в разных работах предполагалась при ε от $1/10$, до $1/3$. В работе [Anderson et al., 1997] утверждается, что меньшая из этих величин относится к частицам с малыми питч-углами, тогда как диффузия вблизи питч-углов 90° требует ε порядка 1. В нашей работе значение $\varepsilon = 0.2$ мы будем считать пороговым, меньше которого сильной диффузии не происходит. Отметим, забегая вперед, что и уменьшение критического значения до $\varepsilon = 0.1$ не меняет выводов данной работы.

Второй из рассмотренных нами случаев относится ко времени максимума первой бури 29 октября, которая была вдвое более слабой, чем вторая (рис. 1). На рис. 3 представлены широтные профили проникновения солнечных протонов, измеренные в двух энергетических каналах спутника в последовательных пролетах 29.10.2003 г. в 9 часов UT на ночной и дневной стороне. В отличие от первого случая здесь границы проникнове-

ния протонов на дневной и ночной стороне расходятся, причем на дневной стороне граница пологая, и спад интенсивности начинается на более высоких широтах, что отражает тот факт, что переход к дипольным конфигурациям силовых линий на дневной стороне начинается раньше. Как видно из (1), сильная питч-угловая диффузия при увеличении радиуса кривизны силовой линии, например, при переходе от вытянутых к дипольным силовым линиям раньше прекращается для менее энергичных частиц. Поэтому разница дневного и ночного пролетов больше в канале 1 МэВ.

Таким образом, можно проверить достоверность той или иной модели магнитосферы, сравнивая рассчитанную по модели границу режима сильной диффузии с измеренной в то же самое время границей проникновения протонов СКЛ. Если режим сильной питч-угловой диффузии при уменьшении L заканчивается на той же силовой линии, у основания которой спутник регистрирует границу проникновения солнечных протонов, значит, модель работает правильно. Для спокойной или слабо возмущенной магнитосферы такие сравнения проводились [Кузнецов и Юшков, 2002], и было показано, что диффузия по кривизне силовых линий хорошо объясняет положение границы изотропного распределения частиц, различие в зависимости от энергии и типа частиц, сдвиг границы в зависимости от местного времени.

С появлением моделей магнитосферы, описывающих искажение ее конфигурации во время сильных магнитных бурь, появилась возможность и для них сравнить измеренные экспериментально и расчетные положения областей сильной питч-угловой диффузии протонов СКЛ.

Таблица 1. Входные параметры модели TS05

Год	День	UT	V_x	V_y	V_z	РнПа	Dst	B_x	B_z	W1	W2	W3	W4	W5	W6
2003	302	09.27	-668.5	-57.3	4.68	1.8	-151	-13.9	11.1	0.18	0.06	0.47	0.13	0.041	0.064
2003	303	03.20	-1042.2	-65.57	40.11	7.43	-273	3.4	11.1	4.38	1.42	21.1	8.2	3.77	9.9

Примечание: V_x, V_y, V_z – компоненты скорости солнечного ветра, РнПа – давление солнечного ветра в нПа, B_x, B_z – компоненты вектора магнитного поля солнечного ветра в нТл, W1–W6 – входные параметры модели TS05.

2.3. Модель магнитосферы TS05

Используя измерения параметров солнечного ветра на спутнике ACE, а также результаты реконструкции недостающих параметров из работы [Dmitriev et al., 2005], были вычислены входные параметры W1–W6 по формулам модели TS05 [Tsyganenko, Sitnov, 2005]. В табл. 1 для пролетов спутника, выбранных для анализа, приведены параметры солнечного ветра – скорость (км/с), давление, Dst, B_x, B_z – компоненты ММП, (а) и рассчитанные параметры W1–W6 для ночных участков траектории на $L = 3$ (б).

Затем были рассчитаны конфигурации силовых линий и напряженность магнитного поля вдоль силовых линий. В качестве входных параметров указывались географические долгота и широта спутника, взятые из базы данных спутни-

ка. Выбранные моменты соответствуют значениям $L = 2.5, 3.0, 3.25, 3.5, 4.0, 5.0,$ и 6.0 , вычисленных для невозмущенной магнитосферы по стандартной методике.

На рис. 4 показана конфигурация магнитных силовых линий в геомагнитных координатах, по модели TS05 на переходе от главной фазы к фазе восстановления второй магнитной бури 30 октября 2003 года. Зная напряженность магнитного поля, ларморовский радиус можно вычислить по формуле

$$\rho(\text{км}) = K \sqrt{\frac{(E \text{кэВ})}{(B \text{нТл})}}, \quad (2)$$

для протонов $K = 4.57 \times 10^3$ для ρ в км или $K = 0.684$, если перейти от км к радиусам Земли.

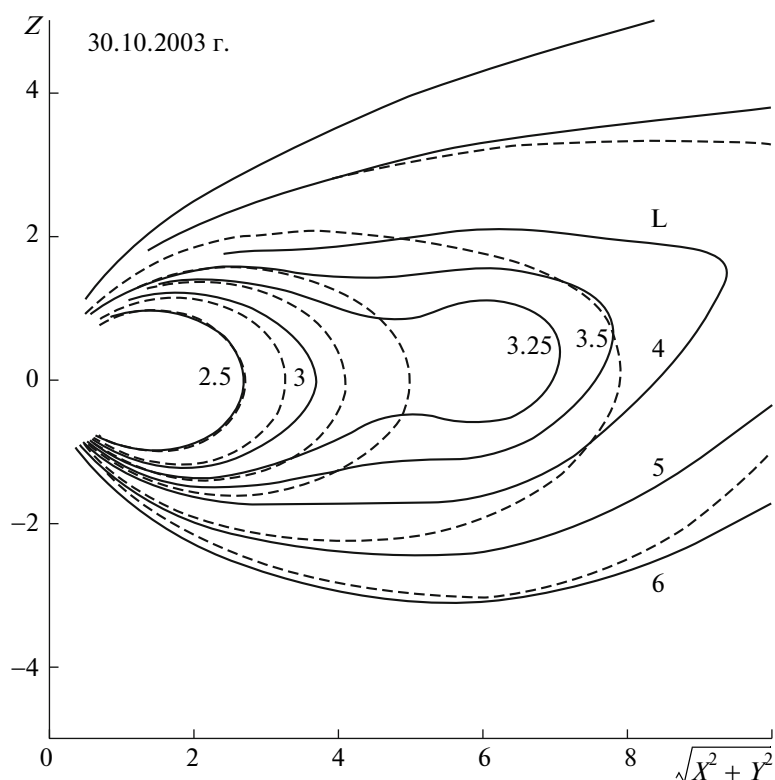


Рис. 4. Расчет конфигурации магнитных силовых линий. По оси ординат – R_z – расстояние от плоскости магнитного экватора в земных радиусах в геомагнитных координатах, по оси абсцисс – расстояние от центра Земли в плоскости X – Y . L от 2.5 до 6 (см. табл. 2). Сплошные линии относятся к пролету спутника на ночной стороне (MLT = 20.10), штриховые – к примыкающему пролету на дневной стороне (MLT = 08.15), линия $L = 3.25$ пропущена.

Таблица 2. Результаты расчета параметра адиабатичности

L	Req l	B нТл	R1	R14	R50	R/l	ϵ p1	ϵ p14	ϵ p50
ночной сектор									
2.5	2.69	1300	0.017	0.065	0.123	0.75	0.02	0.09	0.16
3.0	3.68	410.6	0.055	0.21	0.39	0.5	0.11	0.4	0.8
3.25	7.79	44.3 (200)	0.11	0.4	0.77	0.75	0.15	0.5	1.
3.5	9.34	63.77 (150)	0.15	0.72	1.03	0.5	0.33	1.4	2.1
4.0	13.3	48.87 (110)	0.2	0.72	1.4	0.3	0.67	>1	>1
5.0	17.2	36.19	0.63	2.34	4.43	–	–	–	–
6.0	–	48.78	0.46	1.74	3.28	–	–	–	–
дневной сектор									
2.5	2.70	1458.	0.015	0.058	0.11	0.75	0.02	0.08	0.15
3.0	3.28	750.0	0.030	0.11	0.21	1.0	0.03	0.11	0.21
3.5	4.10	349.1	0.065	0.24	0.46	1.0	0.06	0.24	0.46
4.0	4.98	188.1	0.12	0.45	0.85	1.25	0.1	0.36	0.7
5.0	7.90	58.73	0.38	1.44	2.73	1.25	0.3	1.15	2.2
6.0	11.45	33.12	0.68	2.56	4.84	1.5	0.45	>1	>1

Примечание: Req l – расстояние до экватора силовой линии – B нТл – напряженность магнитного поля на экваторе силовой линии, R1, R14, R50 – ларморовский радиус протонов с указанной энергией в МэВ, R/l – радиус кривизны силовой линии на экваторе.

В табл. 2 приводятся результаты расчета – максимальное расстояние до вершины силовой линии, минимальная напряженность магнитного поля на силовой линии, радиус кривизны, ларморовский радиус из трех энергий протонов и соответствующие величины параметра адиабатичности. Величины ларморовского радиуса и параметров адиабатичности рассчитывались исходя из значения B на экваторе.

Силовые линии на $L = 3.25–3.5$ на ночной стороне имеют ту же форму, что и в работах авторов модели TS05 в максимуме магнитной бури 6–10 апреля 2000 г. [Tsyganenko and Sitnov, 2005]. Вогнутая форма этих силовых линий указывает на существование нулевой точки на расстоянии 5–6 земных радиусов. По-видимому это обстоятельство приводит к тому, что напряженность магнитного поля не уменьшается последовательно при движении вдоль силовой линии от основания к экватору, а имеет более причудливую форму, показанную на рис. 5. Чтобы объяснить этот эффект, надо углубляться в детали построения модели TS05, что выходит за рамки настоящей работы. О возможном влиянии появления нулевых точек внутри области и квазизахвата будет сказано в разделе 3.

По измерениям на спутнике (рис. 2) граница проникновения доходит в этот момент до 53° для всех энергий как на дневной, так и на ночной стороне. Результаты расчета представлены на рис. 6, где сплошными линиями и штрихом обозначены ночной и дневной пролеты, и граница сильной диффузии показана сплошной горизонтальной

линией. На рисунке видно, что режим сильной питч-угловой диффузии в ночном секторе выполняется для протонов с энергией 14 и 50 МэВ до магнитной широты 53° , а для частиц 1 МэВ чуть выше по широте (55°), что также с небольшой натяжкой можно признать соответствующим эксперименту. Но по расчету для дневного пролета протоны 14 МэВ должны перестать высыпаться на магнитной широте 57° , а протоны с энергией 1 МэВ на 62° , что значительно расходится с экспериментом (53°).

Структура силовых линий для пролетов 29.10.2003 г., рассчитанная по модели TS05, показана на рис. 7. В ночном пролете MLT равнялось 20.15, в дневном – 08.25. Переходная от дипольных к вытянутым силовая линия здесь отодвигается на $L = 3.5$, т.к. эта буря была меньшей магнитуды. И здесь форма силовых линий указывает на наличие нулевой точки. Результаты расчета зависимости параметра адиабатичности от энергии протона и широты для этого случая представлены на рис. 8. Сравнение с рис. 3 показывает, что для ночного пролета лишь для протонов 50 МэВ наблюдается соответствие расчета с экспериментом. Для протонов с энергией 1 МэВ сильная диффузия должна прекращаться на широте 63° , а плато в экспериментальном профиле интенсивности частиц продолжается вплоть до 55° . На дневной стороне, напротив, лишь для протонов 50 МэВ есть небольшое расхождение эксперимента с расчетом (56° и 59°), а начавшееся на широте 70° падение интенсивности протонов 1 МэВ,

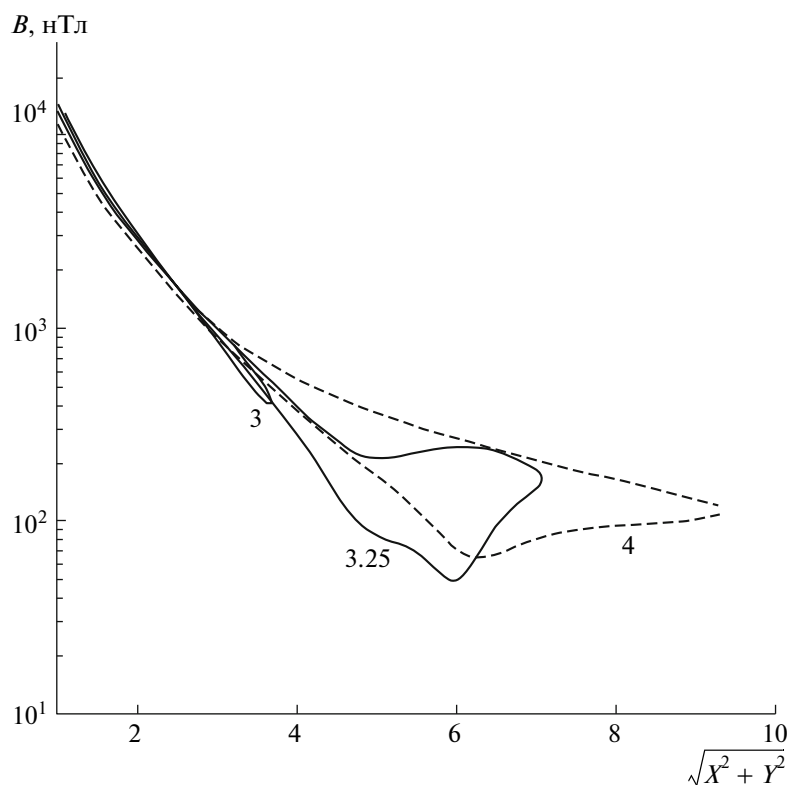


Рис. 5. Напряженность магнитного поля вдоль силовых линий $L = 3, 3.25, 4$ по модели TS05, 30.10.2003 г.

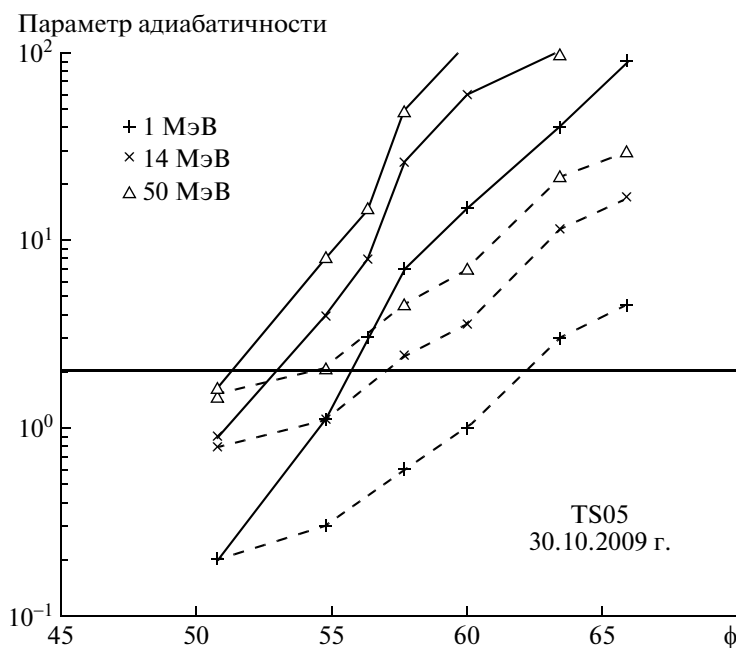


Рис. 6. Зависимость параметра адиабатичности от исправленной геомагнитной широты для трех энергий протонов в максимуме магнитной бури 30.10.2003 г. Сплошные линии – ночной сектор, штриховые – дневной.

обозначающее окончание режима сильной диффузии, соответствует результатам расчета.

Таким образом, для энергий 50 МэВ модель TS05 вполне пригодна для объяснения наблюдае-

мых широтных профилей. Глубина проникновения протонов с энергией 1 МэВ не соответствует расчетным параметрам адиабатичности, лишь за исключением дневного профиля более слабой бу-

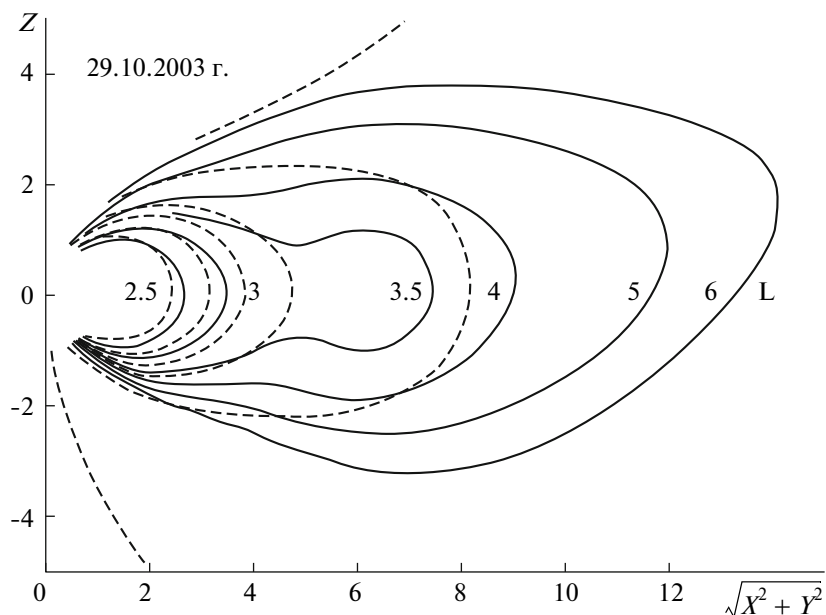


Рис. 7. Структура силовых линий для пролетов 29.10.2003 г., модель TS05.

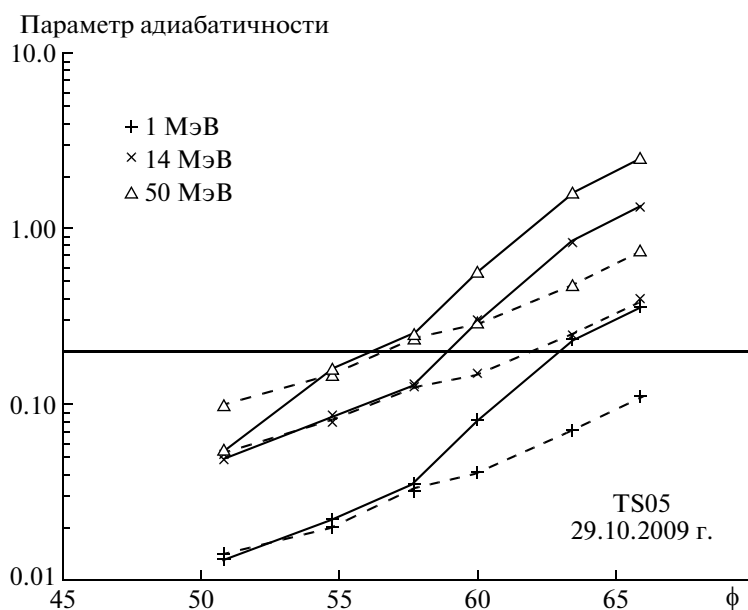


Рис. 8. То же, что на рис. 6 для магнитной бури 29.10.2003 г.

ри. Основная особенность наблюдаемых спутником широтных профилей в этих пролетах — отсутствие зависимости границы проникновения от энергии частиц и от местного времени — в нескольких позициях противоречит результатам расчета.

2.4. Параболическая модель магнитосферы

Для тех же пролетов спутника КОРОНАС-Ф 29 и 30 октября 2003 года конфигурация силовых линий магнитного поля была просчитана по параболической модели магнитосферы [Алексеев и

Калегаев, 2008] одним из ее автором В.В. Калегаевым. Поскольку анализ соответствия модели и эксперимента приводит к тем же выводам, что и для TS05, ограничимся одним примером.

На рис. 9 приведена расчетная геометрия силовых линий для тех же моментов ночного и дневного пролетов спутника 29.10.2003 г., приведенной выше на рис. 3. Сравнение двух конфигураций, TS05 и параболической, показывает, что в последней нет сплюснутых переходных силовых линий как в TS05, значит нет и нулевых точек, квазидипольная конфигурация сменяется резко

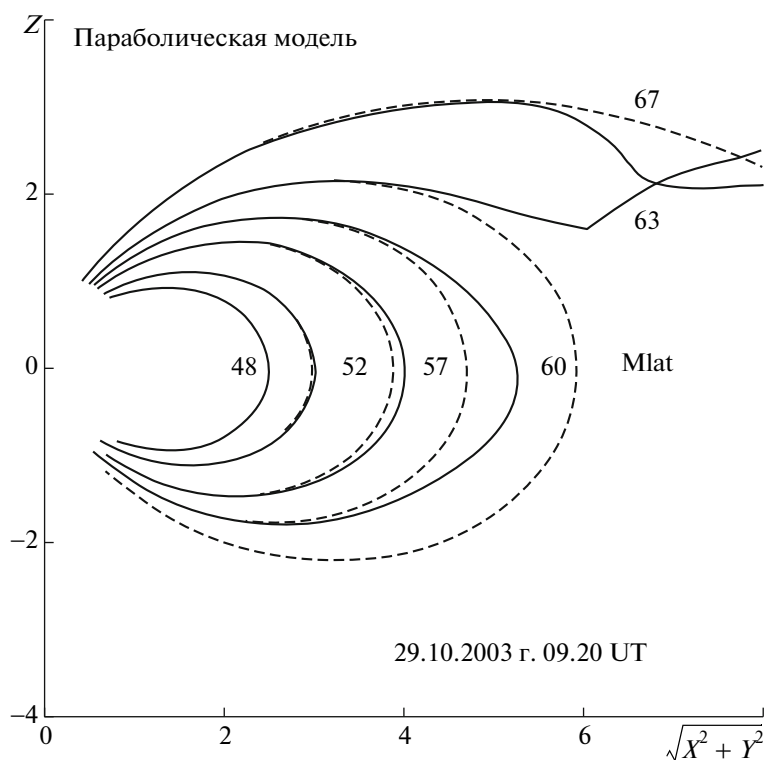


Рис. 9. Конфигурация силовых линий магнитного поля 29.10.2003 г., рассчитанная по параболической модели, ночной и дневной (штриховая) сектора.

вытянутыми в хвост силовыми линиями. Минимальная напряженность магнитного поля находится в плоскости экватора.

При конфигурации магнитного поля, полученной из параболической модели, разное критическое значение параметра адиабатичности для разных энергий протонов (и, соответственно, измеренной спутником границы проникновения) будет неизбежен, что подтверждает рис. 10. Результат здесь такой – протоны 50 МэВ “добираются” до 54–57°, что не противоречит измерениям, тогда как протоны с энергией 1 МэВ могут проникать только до инвариантной широты 67° ($L = 7$), что совершенно расходится с экспериментом.

В соответствии с рис. 3, ГП для протонов от 1 до 50 МэВ должна находиться на 53°–55° магнитной широты. Применяя критерий адиабатичности 0.2, получаем, что протоны с энергией 50 МэВ проникают до 54°, а с энергией 1 МэВ лишь до 60°. Таким образом, соответствие предсказаний модели и эксперимента наблюдается только для старшего энергетического канала, а регистрируемое совпадение ГП для всех энергий из модели не следует. Для дневной стороны соответствие хорошее для энергий 50 МэВ, для 1 МэВ режим сильной диффузии должен закончиться по измерениям на 70°, а по модели он продолжается до 65°.

Таким образом, и параболическая модель лишь частично подходит для объяснения наблю-

даемых широтных профилей солнечных протонов и нуждается в корректировке.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Исследование процессов во внутренней магнитосфере во время магнитных бурь невозможно без достоверных моделей магнитосферы. Для удовлетворения потребности исследователей созданы специальные модели, описывающие изменение конфигурации магнитного поля на разных фазах магнитной бури путем учета изменения вклада внешних источников в конфигурацию магнитного поля – нескольких токовых систем меняющихся во времени. Насколько точно соответствует структура модельной магнитосферы реальной структуре? Настоящая работа представляет собой попытку оценить степень этого соответствия.

Из измерений широтных профилей солнечных протонов мы видим, как глубоко проникают протоны СКЛ в магнитосферу и как зависит глубина проникновения от энергии частиц. Как происходит это проникновение мы точно не знаем, однако знаем, что проникнув в магнитосферу в некоторой области, протоны затем переносятся магнитным дрейфом по всем долготам области квазизахвата. Кроме того, мы знаем, что этот дрейф должен сопровождаться питч-угловой диффузией, иначе конус потерь опустел бы быстро

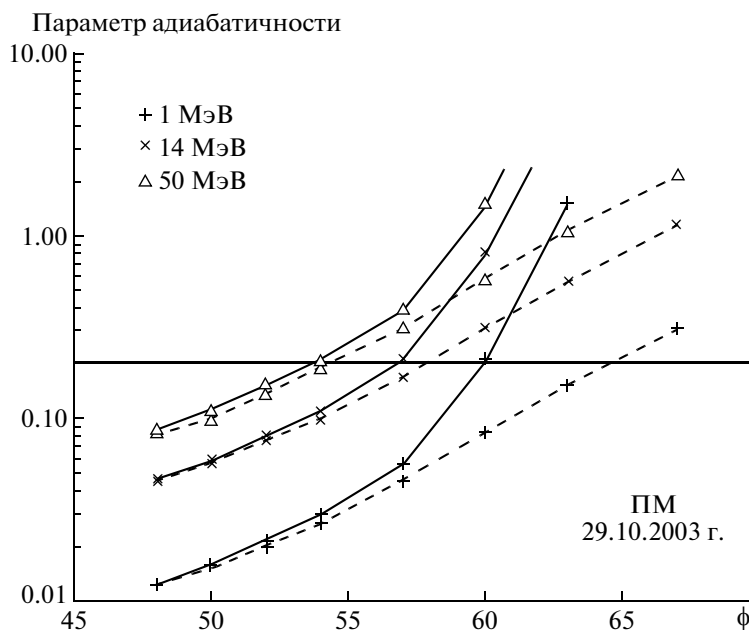


Рис. 10. Зависимость параметра адиабатичности от исправленной геомагнитной широты для параболической модели, 29.10.2003 г. Обозначения те же, что на рис. 8.

и КОРОНАС-Ф не увидел бы проникших в магнитосферу протонов. Они оставались бы захваченными только вблизи плоскости магнитного экватора. Диффузия должна быть сильной, так как регистрируемый спутником поток протонов не отличается от потока в полярной шапке и, соответственно, в межпланетном пространстве. И обеспечить режим сильной диффузии может только питч-угловая диффузия из-за большой кривизны силовых линий, описанная выше. Здесь и “сидит” узел стыковки или нестыковки модели магнитного поля с измерениями широтного профиля протонов.

На одном из двух рассмотренных эпизодов измерений спутника, 29.10.2003 г., дневной профиль протонов в канале 1–5 МэВ сильно отличается от ночного. Объясняется это тем, что на ночной стороне силовые линии вытянуты и режим сильной питч-угловой диффузии “работает” до 55° магнитной широты, тогда как дрейфуя на дневную сторону, протоны попадают на силовые линии с более дипольной конфигурацией и диффузия ослабевает. Начинается этот процесс, как видно из правой панели рис. 3, уже на 70°. В канале протонов 50–90 МэВ такое затухание потока на дневной стороне начинается на меньших широтах (57°), для них силовые линии более высоких широт “недостаточно дипольные” и продолжают обеспечивать режим сильной диффузии там, где протоны меньших энергий уже диффузии не подвержены. Как мы видели выше, и TS05 и параболическая модель выдерживают сравнение с экспериментально измеренной ГП для дневного пролета 29 октября, и плохо выдерживают для

ночного пролета. В пролете 30.10.2003 г., конфигурация силовых линий и в ночное и в дневное время должна была обеспечивать сильную диффузию протонов от 1 до 100 МэВ во всем диапазоне широт от границы полярной шапки до границы проникновения протонов. И здесь сопоставление измерений профиля проникновения солнечных протонов в магнитосферу Земли с предсказаниями и модели TS05, и параболической модели для того же момента времени показало несоответствие модели и измерений.

Первое расхождение заключается в том, что солнечные протоны, измеренные в низкоэнергичных каналах, проникают глубже, чем позволяет модель. Второе расхождение — модель не обеспечивает совпадение границ проникновения протонов в широком диапазоне энергий, регистрируемое спутником в максимуме главной фазы бури.

Еще раз подчеркнем, что проведенные сравнения относятся к магнитной буре экстремальной мощности, явлению редкому, тогда как модели магнитосферы основывались на измерениях во время более слабых магнитных возмущений. Поэтому результаты работы ставят под сомнение не модели в целом, но допустимость экстраполяции моделирования на сильные магнитные бури.

Преодоление расхождений очевидно требует изменения конфигурации силовых линий в моделях магнитосферы, так как измеренные профили мы изменить не в силах. На рис. 11 показана возможная конфигурация, которая может обеспечить совпадение границ проникновения. Обеспечить такую конфигурацию можно, правильно вы-

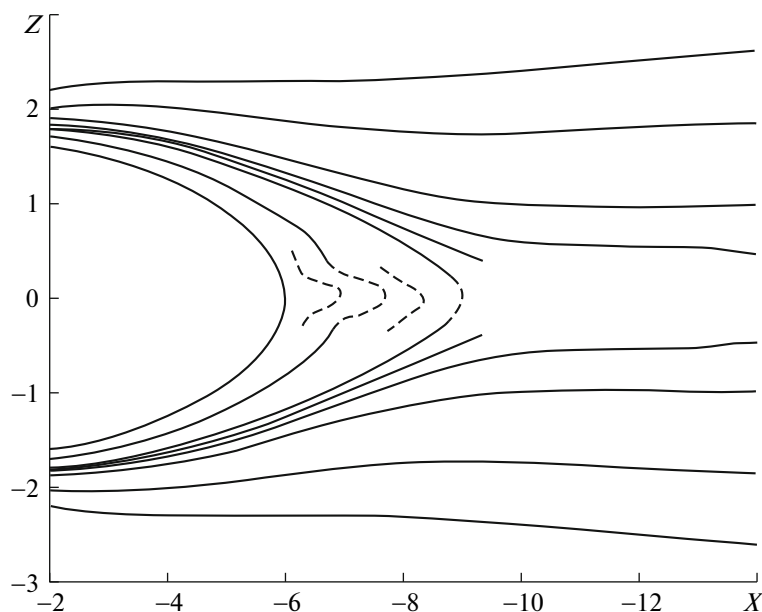


Рис. 11. Предполагается конфигурация силовых линий.

брав форму сечения кольцевого тока в виде узкого слоя в плоскости магнитного экватора. Формирование кольцевого тока происходит в результате радиального дрейфа протонов в область более сильного магнитного поля. Бетатронное ускорение, обусловленное сохранением магнитного момента, увеличивает поперечную энергию частиц, в результате образуется максимум потока частиц и, соответственно, кольцевого тока вблизи плоскости экватора. Такое усиление, равно как и ослабление магнитного поля в этой области, отмечалось экспериментально. Сечение кольцевого тока в виде узкой полосы в плоскости экватора может создать конфигурацию магнитного поля, показанную на рис. 11. Предполагаемая структура магнитного поля должна приводить не только к питч-угловой диффузии, но и к радиальной диффузии и тем самым “забрасывать” низкоэнергичные протоны на более глубокие дрейфовые оболочки, недоступные для протонов СКЛ при другой конфигурации поля. Это приведет и к выравниванию границ проникновения протонов в широком диапазоне энергий, в соответствии с наблюдениями.

Необходимо отметить, что подобные конфигурации с тонким токовым слоем рассматривались и раньше, особенно часто для области плазменного слоя хвоста магнитосферы. В ряде работ, например, [Сергеев и др., 1987; Yahnin et al., 1997], такие структуры находят и в области замкнутых силовых линий, однако эти “замкнутые” силовые линии с $B_z < 2$ нТл вытянуты в хвост до 60 Re.

Наша схема предполагает, что конфигурация с вытянутыми силовыми линиями образуется плоским диском (или полудиском) кольцевого

тока во внутренней магнитосфере и отделена от хвоста магнитосферы. В работе [Панасюк и др., 2004], посвященной анализу магнитных бурь в октябре 2003 года, было показано, что граница полярной шапки не смещалась глубже $58\text{--}60^\circ$ исправленной геомагнитной широты.

Таким образом, для того, чтобы предсказания моделей совпадали с экспериментом, необходимо, по нашему мнению, изменить профиль кольцевого тока во внутренней магнитосфере, сделать его более плоским и тонким, что сильно уменьшит радиус кривизны силовых линий в плоскости экватора.

Конфигурация силовых линий, подобная приведенной на рис. 11, может привести к пересоединению силовых линий и образованию нулевой точки. На самом деле из полученных по TS05 структур магнитного поля показанных на рис. 5 и 7 действительно следует существование пары нулевых точек X и O – типа. В окрестностях нулевых точек адиабатичность должна нарушаться для рассматриваемого диапазона энергий протонов, и в результате обеспечиваться необходимая степень радиальной диффузии.

Таким образом, появляется еще одна возможная конфигурация магнитного поля в минимуме Dst сильной бури, способная объяснить и согласовать рассмотренные выше экспериментальные данные. До настоящего времени предполагалось, что пересоединение силовых линий может иметь место лишь в хвосте магнитосферы. Возможность образования нейтральных точек внутри области квазизахвата открывает новые перспективы не только в понимании процессов во время магнитных бурь, но и магнитосферных суббурь. Остает-

ся лишь ответить на вопрос, поддерживается ли экспериментальными данными такая структура или это лишь формальный результат экстраполяции модели магнитного поля на экстремально сильное возмущение.

Скорее всего создать универсальную модель возмущенной магнитосферы, правильно отражающую ее конфигурацию во всех ситуациях, практически невозможно. Дальнейшее усложнение процедуры построения модели вряд ли поможет. Представляется интересным вернуться к прежним более простым моделям, но позволяющим пользователю управлять формой, размером и положением одного—двух ключевых токовых систем.

Существует большая база данных по измерениям энергичных частиц в магнитосфере, электронов и протонов, анализ которой позволяет увидеть ряд эффектов, вызываемых изменением конфигурации магнитосферы во время магнитных бурь, например, асимметрию утро—вечер на главной фазе бури, падение и восстановление интенсивности, обусловленное адиабатическими процессами, ускорение протонов и релятивистских электронов на фазе восстановления магнитной бури. Эти измерения ждут использования в качестве тестера строения магнитосферы, как только появятся адекватные модели. Мы рассмотрели лишь два примера простых профилей проникновения протонов в магнитосферу из большого разнообразия профилей. Представляется перспективным продолжить эту работу с переходом от качественных к количественным построениям модифицированных моделей.

Авторы благодарны В.В. Калегаеву (НИИЯФ МГУ) за представленные расчеты параболической модели и обсуждение результатов работы. КК благодарен VEGA grant agency (project 2/7063/27), за поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Алексеев И.И., Калегаев В.В.* Магнитное поле и основные токовые системы магнитосферы // “Плазменная гелиогеофизика”. Ред. Зеленый Л.М., Веселовский И.С.М.: ИКИ РАН. Т. 1. С. 414–426. 2008.
- *Ильин В.Д., Кузнецов С.Н., Панасюк М.И., Сосновец Э.Н.* Неадиабатические эффекты и граница захвата протонов радиационных поясов Земли // Изв. АН СССР. Т. 48. Сер. физ. № 11. С. 2200–2203. 1984.
- *Клейменова Н.Г.* Геомагнитные пульсации // Модель Космоса. Ред. Панасюк М.И. Т. 1. Гл. 3.9. М.: КДУ. С. 611–626. 2007.
- *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.
- *Кузнецов С.Н., Юшков Б.Ю.* О границе адиабатического движения заряженной частицы в поле магнитного диполя // Физика плазмы. Т. 28. № 4. 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.
- *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. 3–25. 1982.
- *Сергеев В.А., Кузнецов С.Н., Гоцелюк Ю.В.* Динамика структуры высокоширотной магнитосферы по данным о солнечных электронах // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 27. № 3. С. 440–447. 1987.
- *Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Kalegaev V.V.* Modeling of the electromagnetic field in the interplanetary space and in the Earth’s magnetosphere // Space Science Rev. V. 107. Iss. 1–2. P. 7–26. 2003.
- *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.
- *Dmitriev A.V., Chao J.-K., Suvorova A.V., Ackerson K., Ishisaka K., Kasaba Y., Kojima H., Matsumoto H.* Indirect estimation of the solar wind conditions in 29–31 October 2003 // J. Geophys. Res. V. 110. A09S02. doi: 10.1029/2004JA010806. 2005.
- *Imhof W.I., Chenette D.L., Gaines E.E., Winningham J.D.* Characteristics of electrons at the trapping boundary of the radiation belt // J. Geophys. Res. V. 102(A1). P. 95–104. 1997.
- *Kress B.T., Hudson M.K., Slocum P.* Impulsive solar energetic ion trapping in the magnetosphere during geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 32. L06108 doi: 10.1029/2005GL022373. 2005.
- *Kuznetsov S.N., Kudela K., Fisher S.* Constrains on the magnetospheric high energy oxygen ions supplied by ionosphere // Adv. Space Res. V. 8. № 8. P. 115–118. 1988.
- *Lazutin L.L., Kuznetsov S.N., Podorolsky A.N.* Solar proton belts in the inner magnetosphere during magnetic storms // Proc. 2d Intern. Symp. Solar Exterme Events: Fundamental Science and Applied Aspects. Nor-Amberd. Armenia. 26–30 September 2005. Ed. by A. Chilingarian and G. Karapetyan. CRD. Alikhanyan Physics Institute. Erevan. P. 63–67. 2006.
- *Lazutin L.L., Kuznetsov S.N., Panasyuk M.I.* Solar cosmic rays as a source of the temporary inner radiation belts // Adv. Space Res. V. 44. P. 371–375. 2009.
- *Schulz M.* The magnetosphere // Geomagnetism V. 4. ed. J.A. Jacobs. Academic, San Diego, Calif. Chap. 2. P. 87–293. 1991.
- *Tsyganenko N.A., Sitnov M.I.* Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 110. A03208, doi: 10.1029/2004ja010798. 2005.
- *Yahnin A.G., Sergeev V.A., Gvozdevsky B.B., Vennerström S.* Magnetospheric source region of discrete auroras inferred from their relationship with isotropy boundaries of energetic particles // Ann. Geophys. 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. a03210. doi: 10.1029/2006JA012133. 2008.