

УДК 523.4-854

## РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО И ПРОТОННОГО РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ ПОСЛЕ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ

© 2012 г. Л. Л. Лазутин, Ю. И. Логачев, Е. А. Муравьева, В. Л. Петров

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ

lll@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 25.01.2010 г.

Во время сильных магнитных бурь в июле и ноябре 2004 г. потоки захваченных частиц, протонов и электронов мэвных энергий в радиационных поясах Земли выросли на порядки и затем уменьшались, оставаясь в течении нескольких месяцев на повышенном уровне. Эти возрастания позволили исследовать процессы релаксации радиационных поясов. Измерения энергичных частиц на низко-высотных спутниках *КОРОНАС-Ф* и *SERVIS-1* показали, что предсказания теории о скоростях питч-угловой диффузии выполняются не всегда, давая завышенные или заниженные оценки времени жизни энергичных частиц.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

С момента открытия радиационных поясов Земли долговременные вариации потоков частиц в поясах исследовались как в теоретических, так и в экспериментальных работах и в общих чертах механизмы вариаций понятны. На внешних дрейфовых оболочках значительные изменения потоков энергичных электронов и протонов вызываются суббурями и умеренными магнитными бурями, на внутренних оболочках — сильными магнитными бурями. Возбужденные потоки частиц поясов постепенно уменьшается за счет питч-угловой диффузии в конус потерь, выноса на магнитопаузу и на внутренних оболочках — потерь на ионизацию. Теория питч-угловой диффузии была развита в семидесятых-восьмидесятых годах прошлого века [1, 2]. Эксперименты с искусственной инжекцией заряженных частиц позволили изучить процесс диффузии на внутренних оболочках и подтвердить основные моменты теории. На внешних оболочках богатый экспериментальный материал дают измерения на геостационарных спутниках. Здесь вместе с потерями наблюдается и рост интенсивности частиц за счет ускорения на волнах, радиальной диффузии крупномасштабных и локальных переменных электрических полях.

На внутренних оболочках процессы пополнения и потерь частиц уравновешены и хотя теоретически соотношения этих процессов понятны, подтвердить экспериментально результаты моделирования, разделить эти процессы, трудно. Во время сильных магнитных бурь структура радиационных поясов сильно меняется. На главной фазе преобладают потери частиц, на фазе восстановления — ускорение как протонов, так и электронов, исчезает зазор между электронными поя-

сами, появляются дополнительные максимумы, интенсивность повышается на несколько порядков. Возврат к нормальной структуре происходит медленно, месяцами, и носит сложный характер, где несколько механизмов питч-угловой диффузии конкурируют с процессами ускорения ( см. обзоры [3, 4] и ссылки в них). Теоретически эти процессы исследовались достаточно подробно, но экспериментальных работ, подтверждающих предсказания теории немного.

Серия сильных магнитных бурь в октябре–ноябре 2003, июле и ноябре 2004 года позволили детально изучить процессы происходящие в поясах во время сильных бурь по измерениям на низко-высотных спутниках *КОРОНАС-Ф* (*КФ*) и *SERVIS-1* (*SI*) [5–8]. В настоящей работе исследована зависимость скоростей релаксации частиц после бурь в зависимости от энергии, дрейфовой оболочки (*L*) и времени, прошедшего после бури. Полученные результаты сравниваются с предсказаниями модельных расчетов.

### 2. ИЗМЕРЕНИЯ

Оба спутника имели полярную орбиту с высотой 500 и 1000 км соответственно. На каждом имелись спектрометры заряженных частиц, позволявшие измерять в нескольких каналах поток электронов с энергией от 0.3 до 7 МэВ и протонов от 1 до 50 МэВ. На указанных высотах на большинстве орбит измерялись потоки высыпавшихся частиц и только при пролетах над Бразильской магнитной аномалией (БМА) захватывались отроги радиационных поясов. Для исследования динамики потоков частиц на избранных дрейфовых оболочках программа отбирала максимальное значение интенсивности за каждые сут-

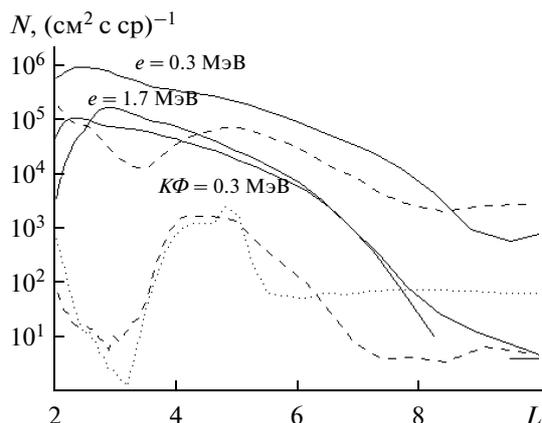


Рис. 1

ки; это значение достигалось в одном из пролетов над БМА. Подробное описание аппаратуры дано в [9, 10].

**2.1 Релаксация потоков электронов.** На рис. 1 показаны радиальные (по  $L$ -оболочкам) профили электронов до (пунктирные линии) и после (сплошные линии) сильной магнитной бури 22–28.VII.2004 в двух энергетических каналах  $SI$  и одном  $K\Phi$ . До магнитной бури регистрируется стандартный профиль с максимумом внешнего пояса на  $L = 4–6$  и провалом между поясами в районе  $L = 3$ . После бури интенсивность электронов растет на всех  $L$ -оболочках до авроральной зоны включительно, провал исчезает, заполняется электронами, причем рост интенсивности электронов в канале 1.7 МэВ на  $L = 3$  превышает четыре порядка.

Поток электронов, регистрируемый  $K\Phi$ , на порядок ниже, чем на  $SI$ , что соответствует распределению потока частиц вдоль силовой линии. При исследовании долговременных вариаций спад потоков частиц на  $K\Phi$  идет быстрее по причине трансформации питч-углового распределения в сторону роста питч-угловой анизотропии, и создается ложное впечатление исчезновения избыточного потока захваченных частиц. Поэтому чаще в данной работе используются данные  $SI$ , причем и здесь надо иметь в виду, что процесс потерь частиц за счет диффузии в плоскости экватора может идти медленнее, чем вблизи конуса потерь на высоте спутника. Следовательно, приводимые ниже оценки времени жизни частиц могут быть несколько занижены.

На рис. 2 показана трансформация радиальных профилей электронов во время магнитной бури 7–11.XI.2004 (спутник  $SI$ ), состоявшей из двух бурь. В этом случае представлены данные одного канала электронов с энергией 1.7 МэВ, но показаны изменения профиля не только в начале и в конце, но и во время бури. В начальном, до бу-

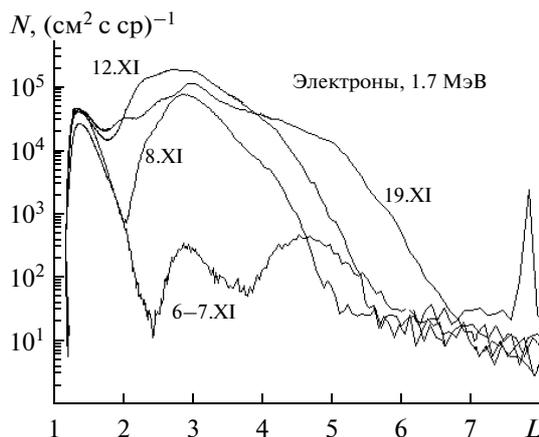


Рис. 2

ри, профиле кроме обычного максимума на  $L = 4.5$  виден максимум на  $L = 2.8$ , где еще сохранился повышенный поток частиц после июльской магнитной бури. Второй профиль приходится на фазу восстановления первой бури, и третий профиль – на фазу восстановления после нового скачка кольцевого тока 11.XI. Здесь мы видим рост интенсивности электронов в широком диапазоне дрейфовых оболочек. Фаза восстановления затянулась до 20.XI, и на этой стадии мы наблюдаем продолжение роста интенсивности электронов на внешних оболочках, тогда как на внутренних ( $L \sim 2–4$ ) начинается падение интенсивности, которое продолжается и после бури.

Таковы исходные потоки электронов, возросшие во время двух магнитных бурь, после которых начинается релаксация к нормальному состоянию радиационных поясов.

На рис. 3а, б приведен временной ход интенсивности электронов в четырех энергетических каналах на  $L = 2.5$  и 3 в пролетах над БМА ( $SI$ ). Приведен максимальный счет за каждые сутки с июля 2004 по февраль 2005 года включительно. В процессе возвращения радиационного пояса к спокойному уровню как правило можно выделить два этапа: начальный, сразу после заполнения пояса во время июльской и ноябрьской бурь, быстрый спад, за которым следует продолжительная релаксация с большими временами жизни. В некоторых случаях начальный, более быстрый, спад лучше описывается экспонентой  $N(t) = N_0 \exp(-t/E_0)$ , но в большинстве случаев характер спада описывается в степенном виде  $N(t) = N_0 e^{-\gamma t}$ , где  $1/\gamma$  – характерное время (время жизни), на котором интенсивность падает в  $e$  раз.

На рис. 4 аналогичный график приведен для дрейфовой оболочки  $L = 4$ . Здесь на медленный спад интенсивности накладываются быстрые кратковременные вариации, как в сторону паде-

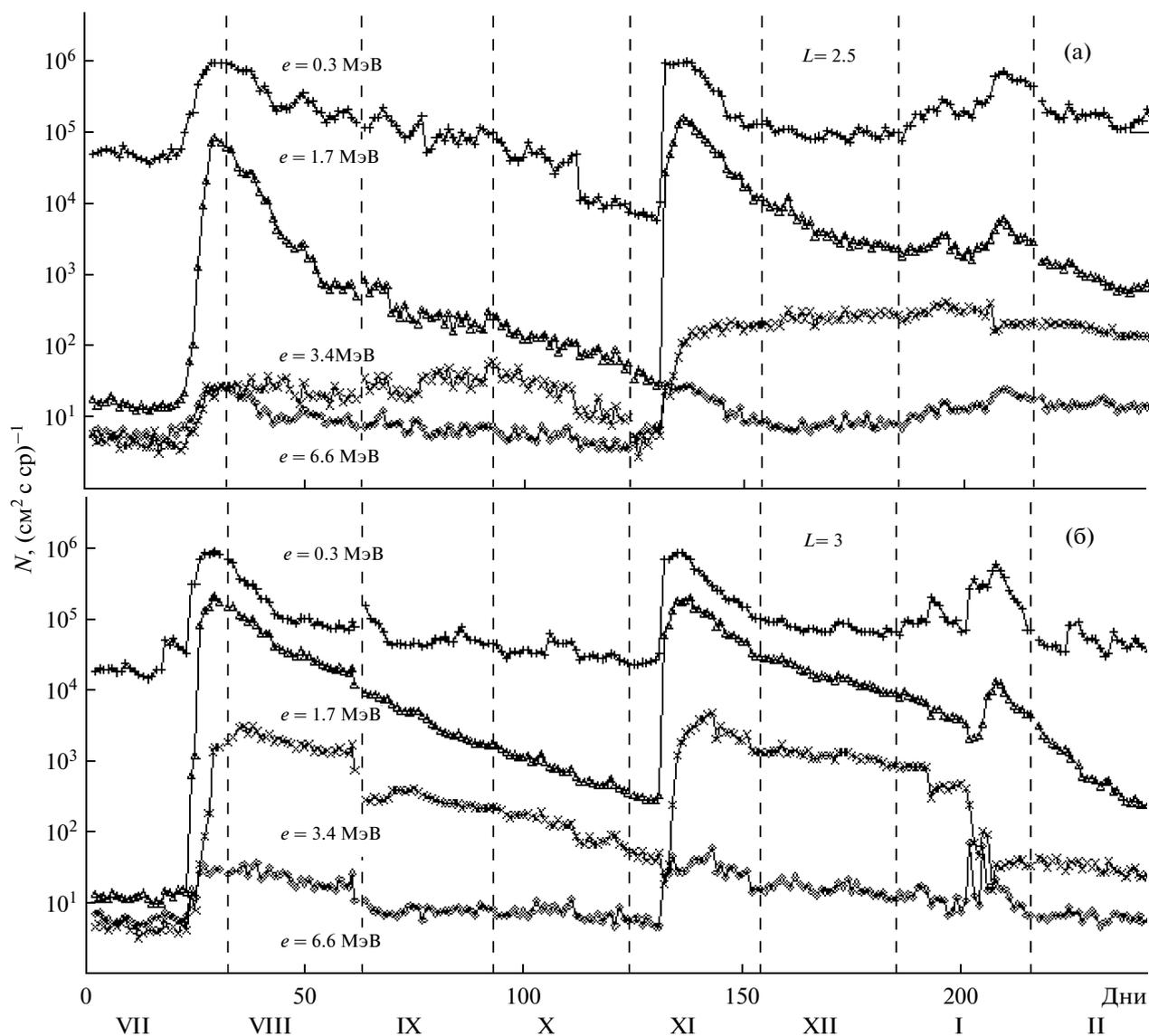


Рис. 3

ния, так и возрастания интенсивности с характерными временами в несколько суток.

Кратковременные вариации растут с расстоянием от Земли и с уменьшением энергии электронов, что определенно указывает на их связь с авроральной активностью. Это же следует из сравнения с показанным в нижнем блоке рис. 4 временным ходом  $K_p$ -индекса магнитной активности. Этот тип вариаций достаточно хорошо описан в литературе, особенно по измерениям частиц на геостационарных спутниках, и мы не будем на них останавливаться.

Деление релаксации на два этапа отмечается в каналах 0.3 и 1.7 МэВ на  $L = 2-3.5$ , а в более энергичных каналах и на  $L = 4$  это деление менее четкое.

Определенные отклонения от регулярного спада интенсивности происходили в январе 2005 г., когда наблюдалось три магнитных бури. В канале 3.4 МэВ на  $L = 2.5$  и после первой, и после второй бури возросший поток сохраняется долго, тогда как на  $L = 3$  виден устойчивый спад, который, однако, не достигает спокойного уровня за все 6 месяцев измерений. В канале 6.6 МэВ повышенный темп счета наблюдается в течении 1–2 месяцев после бури. Отметим также, что кратковременные возрастания в январе 2005 на  $L = 3$  и 4 обязаны проникновению в магнитосферу солнечных электронов.

Еще один быстрый тип вариаций наблюдается во время умеренных магнитных бурь, в исследуемом интервале он наблюдался 30–31.VII.2004 г. и 17–21.I.2005 г. Рост интенсивности в двух каналах

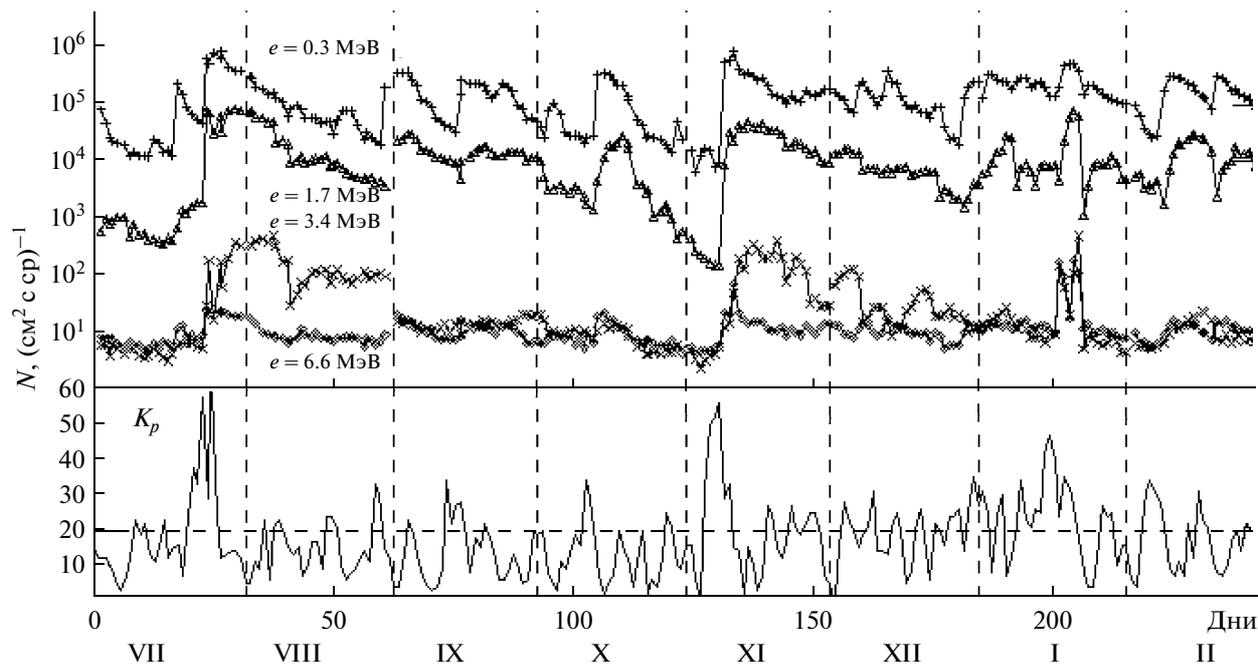


Рис. 4

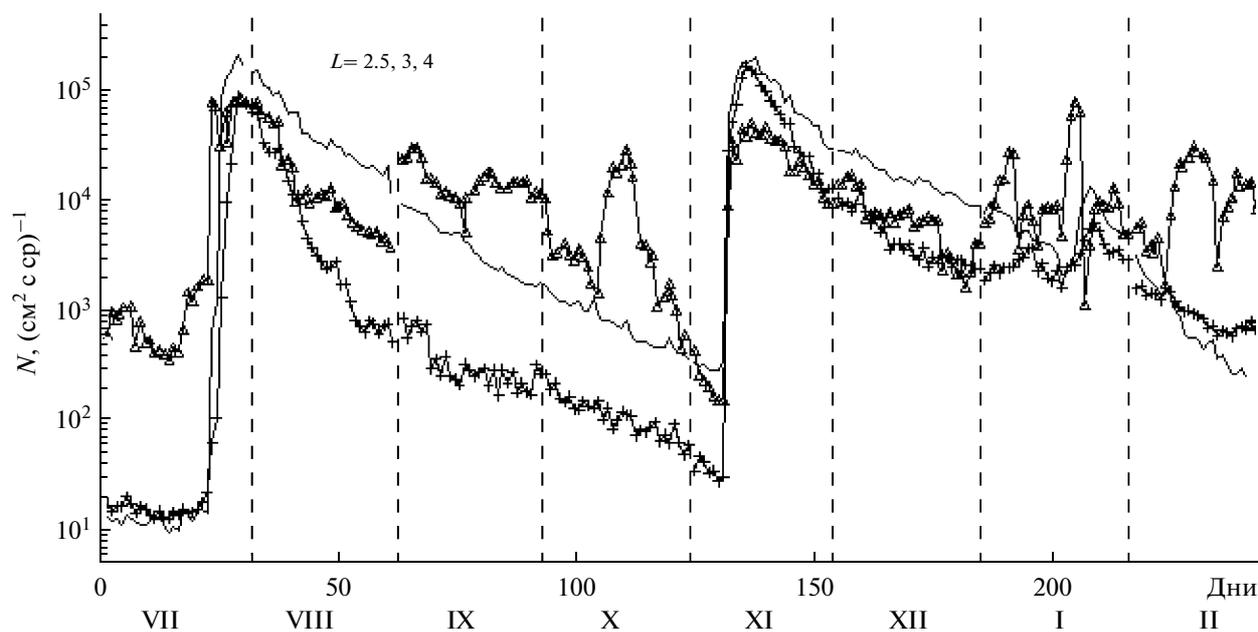


Рис. 5

0.3–1.7 МэВ, вызванный усилением волновой активности, сопровождается заметным спадом интенсивности в канале 3.4 МэВ.

Этот эффект вызывается ионно-циклотронными волнами, генерированными протонами радиационного пояса (EMIC-waves). Динамика ча-

стиц во время августовской бури подробно исследовались в работе [11].

На рис. 5 временной ход в канале 1.7 МэВ (спутник *SI*) дан для всех трех *L*-оболочек, что позволяет отметить одинаковую скорость спада во время второго этапа релаксации, которая про-

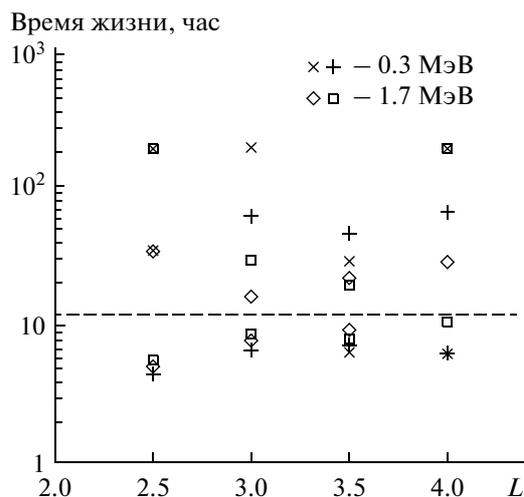


Рис. 6

смачивается и на фоне кратковременных вариаций. Повидимому питч-угловая диффузия, определяющая медленный спад интенсивности, происходит на близких по частоте ОНЧ-излучениях, распределенных по широкому диапазону  $L$ -оболочек. Такими свойствами обладают плазмосферные шипения.

Таким образом, релаксация электронов после бури разделяется на два этапа, с быстрыми и медленными потерями захваченных частиц, зависит от положения дрейфовой оболочки и энергии электронов.

На рис. 6 приведены значения времени жизни для потока электронов в каналах 0.3 и 1.7 МэВ в зависимости от  $L$  отдельно для интервалов после июльского и ноябрьского заполнения и пере-

стройки и отдельно для начального и второго этапов релаксации.

Видно, что начальный быстрый спад (ниже пунктирной линии) имеет  $\gamma$  в пределах 5–10 суток независимо от энергии и положения дрейфовой орбиты, тогда как на втором этапе разброс значений гораздо больше. Можно отметить, что спад интенсивности в канале 1.7 МэВ идет быстрее, чем в канале 0.3 МэВ и что наиболее быстрый спад в обоих каналах наблюдается на  $L = 3.5$ , в области провала между поясами.

**2.2 Релаксация потока протонов.** Возрастания потока протонов с энергией 1–20 МэВ в протонном поясе связаны с захватом солнечных протонов на ранней стадии фазы восстановления бури и дополнительным ускорением на поздней ее стадии. На рис. 7 приведены радиальные профили протонов до (22.VII, пунктир) и после (30.VII, сплошная) магнитных бурь в июле 2004 г., измеренные на  $S1$  и  $K\Phi$ .

Видно, что во время двух сильных бурь протоны СКЛ проникают до  $L = 3$ , захватываются и ускоряются. Профиль 25.VII.04, измеренный на  $S1$ , показывает результат захвата протонов СКЛ после первой бури. От этого профиля начинается процесс ускорения частиц, приводящий к профилю 30.VII. Максимум спокойного профиля находится на  $L = 3$ , на  $K\Phi$  интенсивность на порядок ниже, чем на  $S1$ . Возросший на два порядка поток после бури на  $S1$  сдвинут на  $L = 2.8$  в результате радиальной диффузии. На  $K\Phi$  этого сдвига нет, видимо здесь не отражается реальный профиль радиационного пояса, только лишь ситуация вблизи конуса потерь.

На рис. 8 приведены три профиля протонов в канале 1.7 МэВ спутника  $S1$  – до начала ноябрьской бури, в середине фазы восстановления и еще

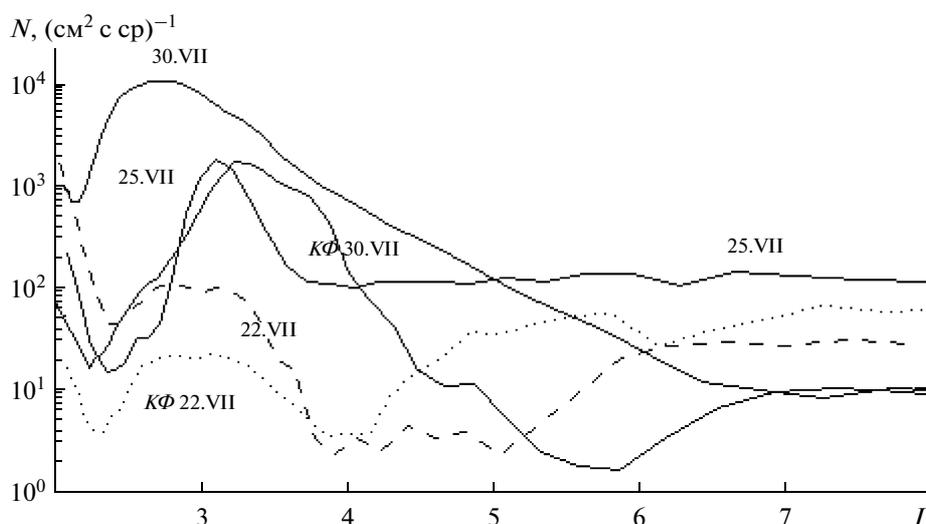


Рис. 7

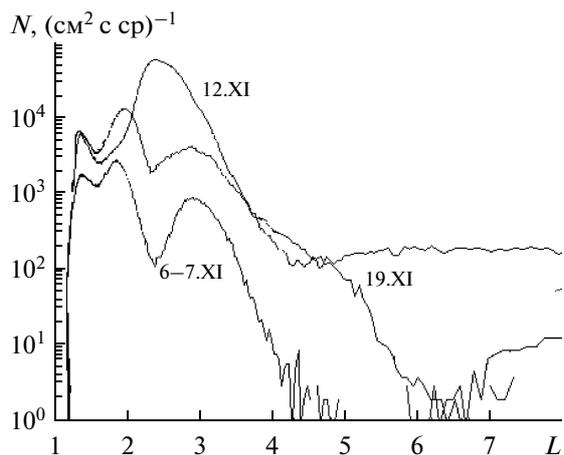


Рис. 8

через несколько дней на хвосте затянувшейся фазы восстановления. В максимуме на  $L = 3$  до начала бури сохраняется повышенная интенсивность по сравнению со спокойным уровнем 33.VII.2004 (рис. 7). 12 ноября этот максимум сдвигается на  $L = 2.5$ , интенсивность растет на два порядка, а затем начинается быстрый сброс частиц в конус потерь, приводящий к появлению двух максимумов на  $L = 2$  и  $3$ .

На рис. 9а приведены вариации потока протонов с энергией 1.2 МэВ с июля 2004 по февраль 2005 включительно на  $L = 2.5, 3$  и  $4$ . Релаксация потока протонов по измерениям на низковысотных спутниках проходит по тому же сценарию, что и описанная выше релаксация потока электронов. Также как и у электронов, выделяется два этапа потерь частиц — быстрый сразу после магнитной бури и медленный — следом за ним. Собственно спад наблюдается только на внешних оболочках, на  $L = 3$  он совсем слабый, а на  $L = 2.5$  наблюдается рост интенсивности очевидно за счет радиальной диффузии.

Пунктиром на рис. 9а приведены результаты измерений потока протонов 1 МэВ вне магнитосферы, по измерениям на спутнике ACE. Сравнивая эти измерения с измерениями на  $L = 4$  видим, что протоны СКЛ проникают сюда не только во время двух сильных бурь, но также и во время умеренных магнитных бурь 5–6.XII.2004 и 17–21.I.2005, и даже при суббуревой активности 14.IX.2004. Но при этом они не захватываются в радиационный пояс. Январская 2005 г. буря впрочем увеличивает поток протонов на  $L = 2.5$ . Короткопериодные возрастания на внешних дрейфовых оболочках, не связанные с возрастанием потока вне магнитосферы, наблюдаются во время умеренных и даже слабых бурь (30.VIII.2004 — 120 нТл, 13.X.2004 — 50 нТл, 7.I.2005 — 100 нТл, 16–18.II.2005 — 100 нТл).

На рис. 9б дается временной ход релаксации протонов в канале 12.5 МэВ SI. Скорость потерь протонов этих энергий больше, и после первого этапа за июльской бурей повышенный поток практически остается только на  $L = 3$ . После ноябрьской бури релаксация более затянутая. В канале с энергией 24.6 МэВ изменения незначительны и мы эти данные не приводим.

Как говорилось выше, измерения на спутнике КФ труднее использовать для анализа медленных вариаций захваченных частиц. Во-первых, измерения на малой высоте, вблизи конуса потерь, хуже отражают вариации потока частиц в протонном поясе. Во вторых, угол зрения сцинтилляционного детектора по отношению к направлению магнитной силовой линии медленно меняется с периодом 3 месяца. В результате в те дни, когда детектор смотрит вдоль силовой линии, поток частиц уменьшается. На рис. 10, где приведены вариации потока протонов на КФ, два таких периода приходится на сентябрь и декабрь 2004 года. Сравнение с SI (рис. 9а) показывает, что различия велики на быстром этапе — на КФ и максимум затянут и интенсивность в максимуме меньше. На медленном этапе релаксации различий нет, существенные потери наблюдаются на внешних дрейфовых оболочках ( $L = 4$ ), тогда как на внутренних поток протонов меняется медленней.

Сводная диаграмма по временам жизни протонов приведена на рис. 11 для тех же двух бурь, что и для электронов, и для двух энергетических каналов протонов — 1.2 МэВ и 12.5 МэВ. Для начального, быстрого режима потерь, разница по энергиям незначительна. Обращает на себя внимание факт быстрого спада (ниже пунктирной линии) интенсивности на  $L = 2.5$ .

На втором этапе спад идет медленнее, чем у электронов, более того, на  $L = 2$  наблюдается рост интенсивности, вызванный, очевидно, радиальной диффузией из соседних внешних оболочек. Значения  $\gamma$  на отметках 100 и выше довольно условны и могут означать и неизменность потока частиц во времени и рост его. Отметим, что с ростом энергии скорость медленных потерь растет и также растет она значительно с удалением дрейфовых оболочек от Земли.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Механизмам потерь электронов и протонов радиационных поясов посвящено значительное число расчетных теоретических работ, особенно много работ по релятивистским электронам, интерес к которым подогревается реальной опасностью “электронов-киллеров” для космической аппаратуры. Наиболее полный обзор по питч-угловой диффузии электронов на различных типах ОНЧ-излучений с оценкой времен жизни пред-

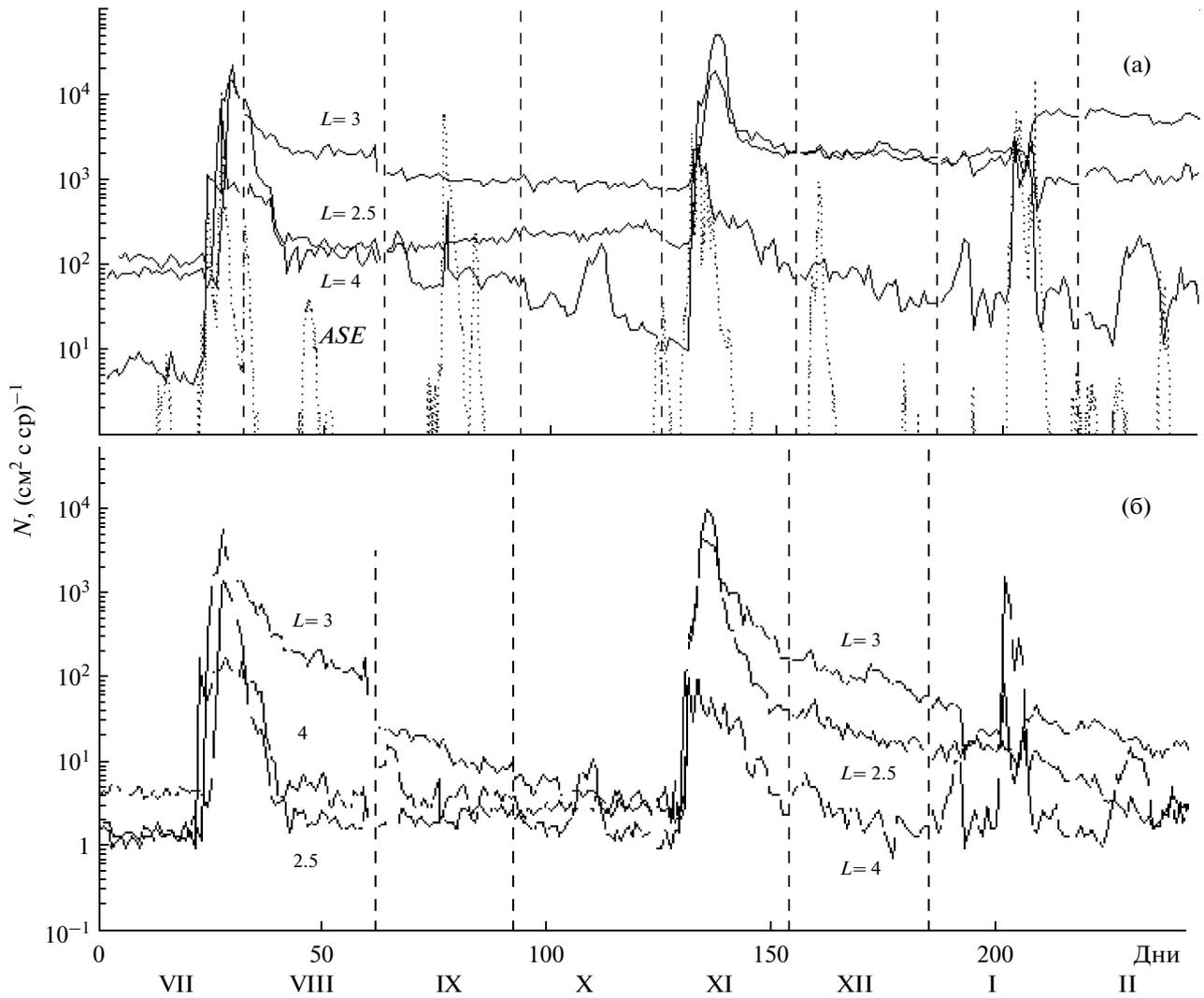


Рис. 9

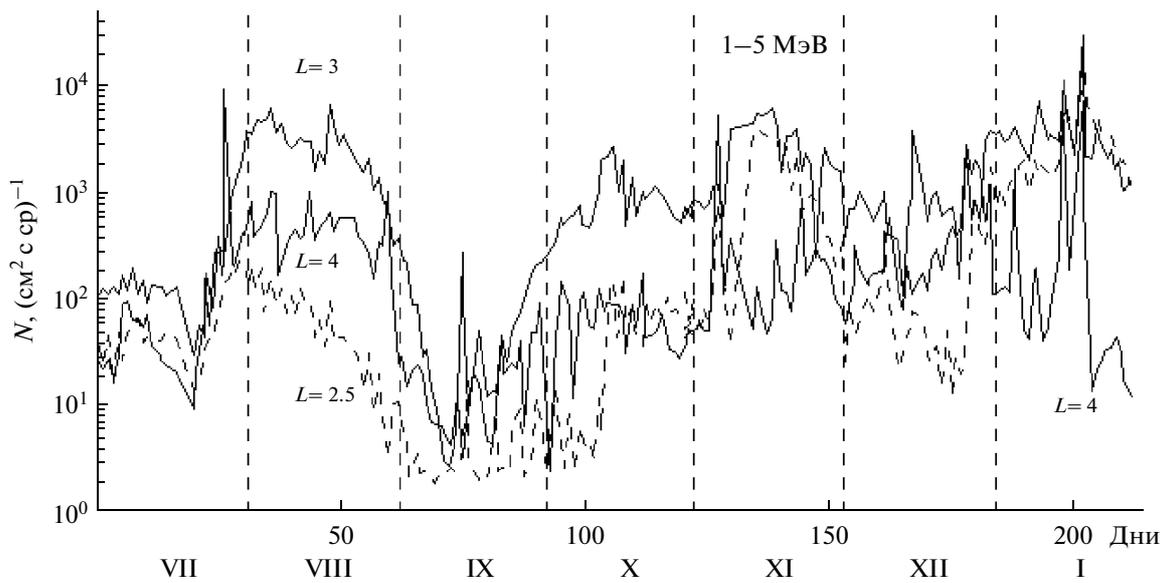


Рис. 10

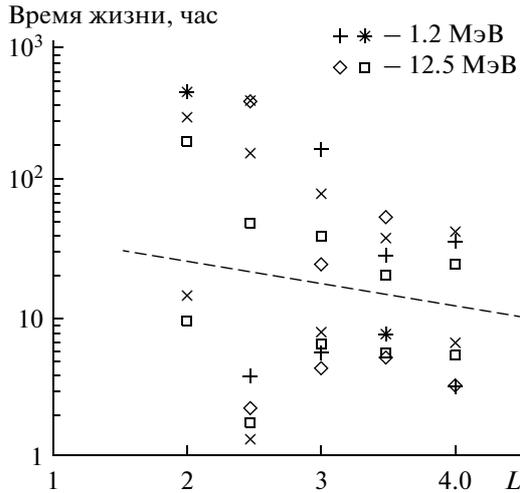


Рис. 11

ставлен в работе [4]. Расчет времен жизни энергичных протонов после инъекции во время магнитных бурь приводится в работе [12]. С расчетными предсказаниями потерь энергичных частиц в этих работах мы и будем сравнивать наши результаты.

Процессы, приводящие к уменьшению потока захваченных частиц в магнитосфере, хорошо изучены. Если не считать потерь на магнитопаузе в области квазизахвата, и на ионизацию на  $L < 2.5$ , основную роль играет питч-угловая диффузия частиц, приводящая к попаданию в конус потерь и гибели в атмосфере Земли. Диффузия вызывается резонансным взаимодействием частиц с электромагнитными волнами при совпадении частоты волны с гирочастотой частицы в системе координат движущейся частицы

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = n\Omega_{ep}/\gamma, \quad n = 0, \pm 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

где  $\omega$  и  $\Omega_{ep}$  частота волны и гирочастота частицы, электрона или протона,  $k_{\parallel}$  и  $v_{\parallel}$  — компоненты волнового вектора и скорости частицы вдоль силовой линии магнитного  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  поля, а диффузионное уравнение Фоккера—Планка для питч-угловой диффузии в предположении постоянства энергии и дрейфовой оболочки можно записать как

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{T(y)y} \frac{\partial}{\partial y} T(y)y \langle D_{yy} \rangle_{ba} \frac{\partial f}{\partial y} - \frac{f}{\tau}, \quad (2)$$

где  $y$  — синус питч-угла и  $T$  — четверть периода скачка.

Время жизни частиц в ловушке, определяемое как время спада интенсивности в  $e$  раз, можно связать с коэффициентом диффузии как  $\tau = 1/D$ .

**Потоки электронов** в энергетическом диапазоне 0.3–3 МэВ с июля по ноябрь 2004 года остают-

ся на возмущенном, повышенном уровне после июльской бури как на внутренних ( $L = 2-3.5$ ) так и на внешних оболочках. Повышенный уровень сохраняется и после возрастания интенсивности во время ноябрьской 2004 бури по меньшей мере до марта 2005 г. В канале 6.6 МэВ нормальный уровень восстанавливается за 1–2 месяца. В магнитосфере Земли регистрируется большое количество различных типов волн, из которых несколько выделяются в качестве существенных для воздействия на потоки захваченных электронов и широко обсуждаются в экспериментальных работах и модельных расчетах.

Во внутренней магнитосфере ( $L \approx 2.5$ ) электроны могут гибнуть при взаимодействии со свистящими атмосфериками, создаваемыми молниями, и антропогенными ОНЧ излучениями [13] и при столкновении с остаточной атмосферой. Время жизни электронов не меньше месяца, причем различия между магнито-возмущенными и спокойными условиями нет, так как действие указанных источников не зависит от магнитной активности.

Приведенные выше измерения показывают, что в тех случаях, когда воздействие сильных магнитных бурь добирается до  $L < 3$ , здесь появляются большие потоки энергичных электронов и скорости потерь свежееускоренных релятивистских электронов значительно превышают таковые при спокойных и умеренно возмущенных условиях. Время жизни падает до 4–6 суток в каналах 0.3 МэВ и до 10 суток в канале 1.7 МэВ. Этот режим продолжается 10–20 дней после того, как фаза восстановления магнитной бури закончилась. Различие в скорости начального и последующего спада потока электронов наблюдается также и на  $L = 3$ , но не столь четко выражено. Имея в виду значительное возрастание потока энергичных электронов на  $L = 2-3$  во время сильных магнитных бурь, резонно объяснить ускоренный сброс электронов генерацией циклотронных волн. Указанные времена жизни совпадают с оценками для потерь на авроральных вистлерах в работе [4] — 2 дня для  $E = 0.5$  МэВ и 15 для  $E = 2$  МэВ. Не следует, однако, интерпретировать это совпадение в том смысле, что авроральная область или даже хвост магнитосферы находятся в это время на  $L < 2.5$ . Даже если и находились, что маловероятно, в конце главной фазы бури, то через несколько дней сюда вернулись все характерные атрибуты внутренней магнитосферы, за исключением того, что поток энергичных частиц остался очень высоким.

Наши измерения на  $L = 2.5$  показывают, что во время второго этапа с более медленной скоростью потерь, время жизни электронов 0.3–1.7 МэВ не меньше 30 суток, что соответствует оценкам потерь на ионизацию и питч-уговому рассеянию на

волнах антропогенного и атмосферного происхождения.

Вместе с тем, в отдельные дни спад интенсивности замедляется и даже переходит в рост. Можно заметить, что в это время регистрируется повышенная суббуревая активность или умеренные магнитные бури (например, 30.VIII.2004 и 21.I.2005). Логично объяснить эти возрастания импульсной радиальной инжекцией частиц. Яркий случай такой инжекции внезапным импульсом SC в начале магнитной бури 24.III.1991 был зарегистрирован на спутнике *CRRES* [14].

Интересно, что такие же возрастания наблюдаются и на  $L = 4$  с большей амплитудой, что естественно для авроральной зоны, а вот на  $L = 3$  амплитуда меньше, чем на более глубокой дрейфовой оболочке. Если обратить внимание на радиальный профиль электронов с двумя максимумами на  $L = 3$  и 4.7, приведенный на рис. 2 до начала ноябрьской бури, видим, что на  $L = 2.5$  и 4 градиент потока частиц в поясе положительный, а на  $L = 3$  – переход к отрицательному. В первых двух положениях рост интенсивности электронов при импульсной инжекции складывается из двух эффектов – прихода из области с большей интенсивностью и ускорения за счет сохранения первого адиабатического инварианта. На  $L = 3$  приходит обедненный поток частиц и работает на возрастание только увеличение энергии.

Что касается вариаций на  $L = 2.5$  в каналах электронов высоких энергий, например, в канале  $L = 3.4$  МэВ, интенсивность после возрастных практически не меняется за исключением одного участка в октябре 2004 г. В канале 6.6 МэВ падение интенсивности на первом этапе заметно, на втором динамика противоречива: есть медленный спад после июльской бури и нет спада после ноябрьской, возможно сказывается повышенная магнитная активность в декабре 2004–январе 2005 гг.

На дрейфовых оболочках  $L = 3-4$  первый, быстрый этап сброса выражен намного слабее, чем на  $L = 2.5$ . Только на  $L = 3$  в канале 0.3 МэВ он хорошо прослеживается. Второй этап с более медленным спадом проходит в условиях слабой или умеренной активности. Плазмапауза при этом находится выше  $L = 3$  и эпизодически перекрывает дрейфовую оболочку  $L = 4$ .

Внутри плазмосферы доминируют ОНЧ типа шипений, обеспечивая, по оценке [15, 16] время жизни электронов 3 суток для 0.5 МэВ, 10 для 1 МэВ и больше 40 дней для 2 МэВ.

Из анализа наших данных следует, во первых, что потоки электронов в каналах 0.3 и 1.7 МэВ изменяются синхронно на всех дрейфовых оболочках (рис. 5), подтверждая вывод вышеуказанных авторов о преимущественном воздействии на электроны плазмосферного шипения. Время

жизни составило 30 суток для 1.7 МэВ и около 50 – для 3.4 МэВ. Электроны 0.3 МэВ сохраняются существенно дольше, чем следует из теоретических оценок (несколько дней) – вероятно, вмешивается процесс ускорения суббуревого происхождения, на отдельных отрезках создающий рост интенсивности вместо быстрого спада.

Процессы ускорения релятивистских электронов вызываются радиальной диффузией, стохастическими процессами [17]. Ряд исследователей считает главным механизмом ускорения и потерь электронов в возмущенные периоды вне плазмосферы ОНЧ-взаимодействие с излучениями типа авроральных хоров и свистов (вистлеров) (см. [4] и цитируемую литературу). Хоры следует делить на две группы, с разным соотношением эффектов ускорения и потерь. Эти быстрые возрастания и сбросы хорошо видны на  $L = 4$  (рис. 4) и в канале 0.3 МэВ доминируют над медленными потерями. Потери на вистлерах составляют 2, 5 и 15 дней для энергий 0.5, 1, и 2 МэВ.

На энергиях выше нескольких МэВ дополнительный и быстрый сброс создается за счет паразитного резонанса с электромагнитными ионно-циклотронными волнами (EMIC waves), создаваемыми протонами кольцевого тока во время магнитных бурь [18–20]. В наших измерениях быстрые сбросы электронов 3.4 МэВ наблюдались 30.VIII.2004 на  $L = 3-4$  и во время двух бурь января 2005 г. Первый случай подробно рассмотрен в работе [11]. Эффекта сброса в канале 1.7 МэВ вопреки предсказанию, нет, вероятно, эффекты ускорения подавляют потери на EMIC-волнах.

**Потоки протонов**, захваченных в магнитосфере Земли, намного стабильнее, чем потоки электронов. Теория, развитая Тверским [1] утверждает, что протонный пояс устойчив и лишь потери на ионизацию в остаточной атмосфере уменьшают потоки протонов с временем жизни порядка года. Расчеты выполненные [12], специально были посвящены обсуждаемой нами проблеме – как поведет себя поток протонов в поясе после инжекции солнечных протонов. Предсказания модели таковы, что потоки протонов мэвных энергий будут стабильно существовать без заметного понижения интенсивности месяцы и годы на всех  $L$ -оболочках протонного пояса от 2 до 4. Эти предсказания не подтверждаются полученными выше результатами.

Действительно, в магнитосфере нет интенсивных электромагнитных волн на ионно-циклотронных частотах кроме ионно-циклотронных волн EMIC, которые возбуждаются кратковременно и нечасто протонами кольцевого тока и не могут создавать непрерывный фон для сброса энергичных протонов. Какие же механизмы остаются способными обеспечить регистрируемую нами большую скорость потерь?

1. Потери за счет диффузии на кривизне силовых линий

2. Диффузия на ионно-циклотронных волнах, возбуждающихся при повышенной интенсивности энергичных протонов.

3. Паразитный резонанс с ОНЧ излучениями на электронно-циклотронных частотах.

На этапе быстрого спада сброс происходит на ионно-циклотронных волнах. По оценке Тверского [1] в протонном поясе для развития ионно-циклотронной неустойчивости в потоке протонов пояса не хватает двух порядков; у нас эти два порядка появляются после ускорения мэвных протонов во время фазы восстановления сильных магнитных бурь в июле и ноябре 2004 года. Источником волн служат именно энергичные протоны, а не протоны кольцевого тока, поток которых после бури быстро падает, тогда как быстрый режим диффузии еще продолжается. Время жизни протонов меняется от 15 суток на  $L = 2$  до 5 суток на  $L = 4$ . Отчетливо прослеживается рост скорости потерь с удалением дрейфовой оболочки от Земли. По какой причине на  $L = 2.5$  происходит существенно более ускоренный сброс – не ясно, возможно это связано с тем, что во время сильной бури сюда сдвигается плазмапауза, где всегда можно обнаружить повышенную волновую активность.

На медленном этапе потоки протонов 1–15 МэВ держатся на возмущенном уровне от трех месяцев до года, в зависимости от энергии и положения дрейфовой оболочки. Время жизни составляет 200 суток и более на  $L = 2$ , что соответствует расчетам [12]. Но на больших  $L$  время жизни последовательно спадает к  $L = 4$  до 20–40 суток, что явно противоречит оценкам [12]. Спад интенсивности в канале 12.5 МэВ происходит примерно вдвое быстрее, чем в канале 1.2 МэВ. Скорость потерь растет с удалением дрейфовой оболочки от Земли.

Эти потери компенсируются радиальной диффузией с сохранением магнитного момента, т.е. с ускорением протонов. В представленных выше примерах эффект радиальной диффузии действительно виден на  $L = 2.5$  во всех энергетических каналах. Но все же на больших  $L$ -оболочках регистрируется спад гораздо более быстрый, чем можно было бы предполагать исходя из теории потерь за счет ионизации.

Нам представляется, что наиболее привлекательным выглядит механизм питч-угловой диффузии в конус потерь за счет нарушения адиабатичности. Этот механизм работает в тех случаях, когда кривизна силовой линии становится сравнима с ларморовским радиусом частиц. Они перестают удерживаться, и при пролете через такую критическую область (в плоскости магнитного экватора) питч-угол частицы меняется. Наруша-

ется первый адиабатический инвариант. Параметр адиабатичности  $\epsilon$  определяется как отношение ларморовского радиуса и радиуса кривизны силовой линии:

$$\epsilon = \rho c / (q B_0 R c) = \rho / R c. \quad (3)$$

Траекторные расчеты, выполненные [21–24] показывают, что режим сильной питч-угловой диффузии наступает при  $\epsilon$  от 1/10, до 1/3. В большинстве работ утверждается, что граница между областями сильной питч-углово диффузии и полным отсутствием какой-либо диффузии по кривизне очень резкая. С другой стороны, в работе [25] было показано, что даже для спокойной магнитосферы смена режимов происходит постепенно, хотя и достаточно быстро. Наши измерения говорят о плавном уменьшении скорости диффузии с уменьшением дрейфовой оболочки и, соответственно, с ростом радиуса кривизны силовой линии и с уменьшением ларморовского радиуса частицы. Возможно, что расхождение с расчетами заключается в том, что в них не учитывалось наличие быстрых вариаций магнитного поля, способных изменять на время и локально конфигурацию силовых линий.

Паразитный резонанс с ОНЧ-волнами на электронно-циклотронной частоте рассматривался в работе [26]. В соответствии с (1) резонанс наблюдается при движении протона и волны в одном направлении, продольная скорость протона должна быть большой. В результате этот механизм работает только вблизи конуса потерь. Он может объяснить небольшие по интенсивности высыпания протонов, регистрируемые на низковысотных спутниках, но не способны существенно уменьшить время жизни протонов в поясе.

## ВЫВОДЫ

В радиационных поясах Земли потери и рост интенсивности уравновешены и теоретические расчеты проверить экспериментально не так просто. Быстрый рост интенсивности энергичных электронов и протонов во время сильных магнитных бурь на всех дрейфовых оболочках предоставляет такую возможность. Большая часть предсказаний подтверждается нашими измерениями, но выявляются и отличия и новые эффекты. Освобождение магнитосферной ловушки от избыточного потока частиц происходит в два этапа, первый, с быстрым сбросом, второй – с более медленным. Такое деление наблюдается как в потоках электронов, так и протонов, и если второй этап вписывается в существующие представления, первый, быстрый процесс сброса ранее не был исследован.

**Потери электронов** из пояса происходят за счет питч-угловой диффузии в конус потерь, вызванной разными механизмами.

Первый этап развивается сразу после бури: при большом росте интенсивности в потоке энергичных электронов возбуждается циклотронная неустойчивость. Время жизни составляет 5–10 суток, на  $L = 2.5$  спад интенсивности несколько более быстрый.

После падения интенсивности на 1–2 порядка возбуждение ОНЧ волн прекращается и диффузия продолжается с меньшей силой за счет паразитного резонанса с ОНЧ-волнами типа плазмосферных шипений (hiss). Время жизни меняется в широких пределах – от 20 до 80 суток; виден отчетливый минимум в районе  $L = 3.5$ , там, где формируется щель между внутренним и внешним поясом. Время жизни электронов в канале 1.7 МэВ всюду меньше, чем в канале 0.3 МэВ.

На внешних оболочках общий ход медленного падения потока электронов происходит при диффузии на плазмосферных шипениях. При усилении магнитной активности плазма сдвигается ближе к Земле, и здесь наблюдаются подъемы и спады интенсивности, связанные с ускорением и сбросом частиц в конус потерь во время суббурь, вызванных авроральными хорами и свистами. Эти процессы достаточно хорошо освещены в литературе.

Наконец, еще один механизм, которому подвержены электроны с энергией больше 3 МэВ и который отчетливо проявился в наших измерениях, связан с паразитным резонансом на ионно-циклотронных волнах (EMIC). Он работает только во время магнитных бурь, когда эти волны генерируются протонами кольцевого тока. В период с июля 2004 по февраль 2005 действие этого механизма наблюдалось во время умеренной магнитной бури 30.VIII.2004 и дважды – в январе 2005 г. Время жизни электронов в канале 3.4 МэВ – сутки или меньше. Модельные расчеты предсказывают сброс электронов и с меньшими энергиями, до 0.5 МэВ, однако этот эффект в наших измерениях отсутствует, вместо падения наблюдается рост интенсивности. Повидимому, падение потока на волнах EMIC компенсируется с лихвой ростом на авроральных хорах и свистах.

**Потери протонов** на первом этапе, не описанные ранее, связаны скорее всего с генерацией ионно-циклотронных волн. Протоны кольцевого тока могут быть источником этих волн только в первые 1–3 дня после бури, кольцевой ток быстро спадает на фазе затухания. В качестве источника остается избыточный поток мэвных протонов солнечных космических лучей, захваченных и ускоренных во время бури. Эффект быстрого сброса виден в каналах 1.2 и 12.5 МэВ на  $L = 2–3$ , причем на  $L = 2.5$  виден ускоренный сброс, причина которого не ясна.

Этап медленного сброса протонов скорее всего связан с питч-угловой диффузией за счет кри-

визны силовых линий. Четкая зависимость скорости потерь от  $L$  говорит в пользу этого предположения, равно как и меньшее время жизни более энергичных протонов. Измеренные времена жизни существенно меньше расчетных.

Авторы благодарят Н. Хасебе за разрешение использовать данные измерений на спутнике *SERVIS-1*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тверской Б.А.* Транспорт и ускорение заряженных частиц в магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 1965. Т. 5. С. 793–809.
2. *Schulz M., Lanzerotti L.J.* Particle Diffusion in the Radiation Belts // Physics and Chemistry in Space. V. 7. New York: Springer, 1974.
3. *Friedel R.H.W., Reeves G.D., Obara T.* Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere—a review // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 265–289.
4. *Shprits Y.Y., Elkington S., Meredith N.P., Subbotin D.A.* Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt I:— Local acceleration and loss // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. P. 1694–1713. doi: 10.1016/j.jastp. 2008.06.008.
5. *Лазутин Л.Л., Кузнецов С.Н., Подорольский А.Н.* Динамика радиационного пояса, образованного солнечными протонами во время магнитных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация. 2007. Т. 47. № 2. С. 187–197.
6. *Лазутин Л.Л., Гоцелюк Ю.В., Муравьева Е.А. и др.* Динамика солнечных протонов в магнитосфере Земли во время магнитных бурь в ноябре 2004–январе 2005 // Геомагнетизм и аэронавигация. 2010. Т. 50. № 2. С. 176–188.
7. *Lazutin L., Muravjeva E., Hasebe N. et al.* Comparative analysis of the energetic electron and solar proton dynamics during strong magnetic storms // Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXXI Annual Seminar. Apatity, 2008. P. 33–37.
8. *Lazutin L.L., Kuznetsov S.N., Panasyuk M.I.* Solar cosmic rays as a source of the temporary inner radiation belts // J. Adv. Space Res. 2009. V. 44. P. 371–375.
9. *Kuznetsov S.N., Kudela K., Ryumin S.P., Gotselyuk Yu.V.* CORONAS-F satellite – tasks for study of particle acceleration // Adv. Sp. Res. 2002. V. 30. P. 1857–186.
10. *Kodaira S., Asaeda M., Fujii M. et al.* Space and Time Correlations of Particle Fluxes after Giant Flares in Radiation Belts Observed by Two Satellites, *USERS* and *SERVIS-1* // Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference. Pune, 2005. P. 101–104.
11. *Лазутин Л.Л., Панасюк М.И., Хасебе Н.* Ускорение и потери энергичных протонов и электронов во время магнитной бури 30–31 августа 2004 г. // Космич. исслед. 2011. Т. 49. № 1. С. 38–44. (Cosmic Research. P. 35).
12. *Spjeldvik W.N.* Transient Effects of Solar Energetic Particle Flux Enhancements on the Inner Magnetosphere of the Earth // Advances in Space Research. 2000. V. 25. № 12. P. 2307–2310.

13. *Abel B., Thorne R.M.* Electron scattering loss in Earth's inner magnetosphere 1. Dominant physical processes // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103 (A2). P. 2385–2396.
14. *Blake J.B., Kolasinski W.A., Fillius R.W., Mullen E.G.* Injection of electrons and protons with energies of tens of MeV into  $L > 4$  on 24 March 1991 // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19 P. 821.
15. *Selesnick R.S., Blake J.B., Mewaldt R.A.* Atmospheric losses of radiation belt electrons // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108(A12). P. 1468.
16. *Meredith N.P., Horne R.B., Glauert S.A., Anderson R.R.* Slot region electron loss timescales due to plasmaspheric hiss and lightning generated whistlers // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A08. P. 214.
17. *Antonova E.E., Bahareva M.F., Kirpichev I.P. et al.* Regular and turbulent mechanisms of relativistic electron acceleration in the magnetosphere of the Earth: Theoretical treatment and results of experimental observations // *Proceedings of the 21st European Cosmic Ray Symposium. Kosice, Slovakia, 9–12 September 2008* / Ed. by P. Kiraly, K. Kudela, M. Stehlik, A.W. Wolfendale. 2008. P. 17–26.
18. *Summers D., Thorne R.M.* Relativistic electron pitch angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108(A4). P. 1143. doi:10.1029/2002JA009489.
19. *Meredith N.P., Thorne R.M., Horne R.B. et al.* Statistical analysis of relativistic electron energies for cyclotron resonance with EMIC waves observed on *CRRES* // *J. Geophys. Research.* 2003. V. 108 (A6). P. 1250.
20. *Li W., Shprits Y.Y., Thorne R.M.* Dynamic evolution of energetic outer zone electrons due to wave-particle interactions during storms // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A10. P. 220.
21. *Сергеев В.А., Цыганенко Н.А.* Границы захвата и потери частиц внешнего радиационного пояса, обусловленные магнитосферным магнитным полем // *Космич. исслед.* 1982. Т. 20. № 6. С. 866–870. (*Cosmic Research.* P. 612).
22. *Ильин В.Д., Кузнецов С.Н., Панасюк М.И., Сосновец Э.Н.* Неадиабатические эффекты и граница захвата протонов радиационных поясов Земли // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1984. Т. 48. № 11. С. 2200–2203.
23. *Кузнецов С.Н., Юшков Б.Ю.* О границе адиабатического движения заряженной частицы в поле магнитного диполя // *Физика плазмы.* 2002. Т. 28. № 4. С. 375–383.
24. *Imhof W.L., Chenette D.L., Gaines E.E., Winningham J.D.* Characteristics of electrons at the trapping boundary of the radiation belt // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102(A1). P. 95–104.
25. *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.* 2008. V. 113. A03. P. 210. doi: 10.1029/2006JA012133.
26. *Гоцелюк Ю.В., Кузнецов С.Н., Кузнецова В.А. и др.* Рассеяние протонов радиационного пояса на свистовой моде ОНЧ-излучения // *Космич. исслед.* 1985. Т. 23. № 5. С. 729–735. (*Cosmic Research.* P. 570).