

УДК 523.165

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ФАЗЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 6 АПРЕЛЯ 2000 г.

© 2011 г. М. Ф. Бахарева, Л. В. Тверская, К. Г. Орлова

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
Московского государственного университета, Москва

e-mail: [tverskaya@iaspd.sinp.msu.ru](mailto:tverskaya@iaspd.sinp.msu.ru)

Поступила в редакцию 20.07.2009 г.

После доработки 11.10.2010 г.

Проведен анализ энергетического спектра электронов в диапазоне энергий 0.8–6.0 МэВ по данным геостационарного спутника Экспресс-А2 и временной динамики потоков электронов с энергиями  $>0.6$  МэВ и  $>2$  МэВ (по данным GOES-10) в периоды до и после слабой магнитной бури 9–10 апреля 2000 г., развившейся на длительной (~10 суток) фазе восстановления сильной магнитной бури 6 апреля 2000 г. Впервые исследовано влияние вторичной инжекции и ускорения, обусловленных усилением суббуревой активности во время слабой бури, на динамику потоков электронов. На основе аналитических решений кинетического уравнения для функции распределения электронов с учетом стохастического ускорения и потерь получено описание энергетических спектров и временной динамики потоков электронов до и после слабой бури. Установлена разница в значениях темпов ускорения, а также темпов потерь до и после слабой бури 9–10 апреля 2000 г.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

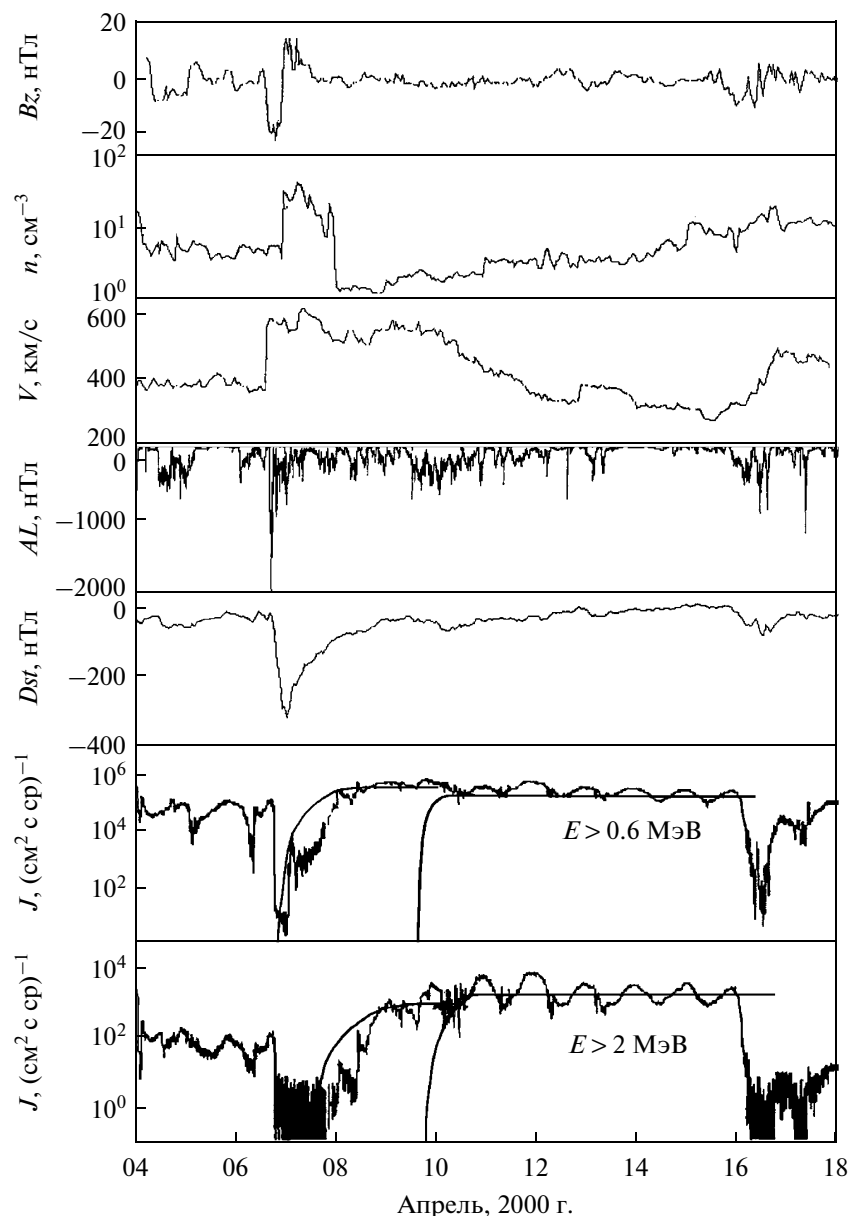
Изучением процессов стохастического ускорения и потерь, определяющих динамику потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли во время сильных геомагнитных возмущений, занимаются в течение многих лет. При этом создано большое количество хорошо известных модельных представлений.

В работе [Бахарева, 2005] был развит аналитический метод описания энергетических спектров и временной динамики потоков ускоренных электронов, включающий способ оценки темпов стохастического ускорения и потерь по наблюдаемой динамике потоков. Этот метод был применен для описания и интерпретации энергетического спектра и временной динамики потоков мэвных электронов на геостационарной орбите на длительной фазе восстановления четырех известных магнитных бурь — 10 января 1997 г. [Бахарева, 2005], 11 июня 1980 г. и 3–4 ноября 1993 г. [Бахарева и Орлова, 2009 а], а также — 6 апреля 2000 г. [Бахарева и др., 2007]. Во всех этих работах исследовались последствия магнитной бури в предположении неизменности темпов ускорения и потерь на всей фазе восстановления бури. Однако, как известно, на длительной фазе восстановления сильной магнитной бури может развиваться дополнительная слабая магнитная буря. Вопрос о возможном изменении темпов ускорения и потерь, вызванном такой слабой бурей, в литературе не ставился и не обсуждался. Не обсуждался также вопрос, может ли усиление суббуревой

активности во время слабой бури привести к ужесточению спектра, то есть к увеличению потока наиболее энергичных релятивистских электронов (так называемых “киллер” электронов, опасных для аппаратуры ИСЗ). В данной работе все эти вопросы исследуются на примере мощной магнитной бури 6 апреля 2000 г., на фазе восстановления которой возникла слабая магнитная буря 9–10 апреля 2000 г. Так же как в работе [Бахарева и др., 2007] мы используем данные геостационарных спутников Экспресс-А2 (~80° E) и GOES-10 (135° W). Для описания эффектов, вызванных наличием слабой магнитной бури, используется развитый нами ранее аналитический метод [Бахарева; 2005].

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ

Как известно, 6 апреля 2000 г. произошла мощная магнитная буря ( $|Dst|_{\max} \sim 300$  нТл), начало которой сопровождалось резким увеличением скорости солнечного ветра и  $AL$ -индекса геомагнитной активности (рис. 1). В начале фазы восстановления этой бури во внутренней магнитосфере сформировался пояс релятивистских электронов с максимумом на  $L \sim 3$ . На фазе восстановления этой бури возникла еще одна слабая магнитная буря 9–10 апреля 2000 г. ( $|Dst|_{\max} \sim 70$  нТл), которая привела к появлению второго пояса релятивистских электронов с максимумом на  $L \sim 4.5$  (данные ИСЗ SAMPEX) [Tverskaya et al., 2003]. Начало слабой магнитной бу-



**Рис. 1** Вариации потоков электронов с энергиями  $>0.6$  МэВ и  $>2$  МэВ по данным ИСЗ GOES-10 в период 4–18 апреля 2000 г. Гладкие кривые (на нижних двух панелях) – расчетные временные профили электронов после бурь 6 апреля и 9–10 апреля 2000 г. (подробности в тексте). Сверху вниз:  $B_z$  – компонента ММП, плотность и скорость солнечного ветра, геомагнитные индексы  $AL$  и  $Dst$ .

ри также сопровождалось большим возрастанием  $AL$ -индекса и дополнительным увеличением скорости солнечного ветра (рис. 1). Однако ИСЗ SAMPEX регистрировал лишь высыпавшиеся электроны. По данным этих измерений интенсивность электронов с энергиями  $>2$  МэВ в максимумах сформировавшихся поясов на  $L \sim 3$  и  $L \sim 4.5$  была примерно одинакова. Но как показали данные измерений на больших высотах (ИСЗ НЕО) [Lorentzen et al., 2002], во время того же события потоки релятивистских электронов в максимумах поясов на  $L \sim 3$  и  $L \sim 4.5$  существенно различались. На

$L \sim 3$  после падения интенсивности на главной фазе бури 6 апреля на фазе восстановления она вернулась к практически добуревому уровню. Во втором новом поясе ( $L \sim 4.5$ ) возрастание интенсивности превысило более чем на порядок величину предбуревую интенсивность в поясе.

На геостационарной орбите ( $L \approx 6.6$ ) по данным спутников Экспресс-А2 и GOES-10 потоки релятивистских электронов во всех энергетических каналах заметно возросли на фазе восстановления сильной магнитной бури 6 апреля 2000 г. (по сравнению с добуревым уровнем).

В данном разделе рассмотрим энергетические спектры. При этом мы воспользуемся данными ИСЗ Экспресс-А2 о потоках электронов в энергетических интервалах 0.8–1.0, 1.0–1.2, 2.0–4.0, 4.0–6.0 МэВ и данными GOES-10 о потоках электронов с энергиями >0.6 и >2 МэВ. Подробности сравнения данных этих двух спутников содержатся в работе [Бахарева и др., 2007]. Вначале рассмотрим энергетический спектр на фазе восстановления сильной магнитной бури 6 апреля, установившийся к 9 апреля, то есть перед началом слабой магнитной бури. По данным Экспресс-А2 наблюдаемые в момент 00 UT (~05 LT) 9 апреля потоки  $j$  равнялись  $\sim 5.4 \times 10^4$ ,  $1.7 \times 10^4$ ,  $4 \times 10^2$  и  $1.4 \times 10$  (см<sup>2</sup> с ср)<sup>-1</sup>, соответственно в интервалах энергий 0.8–1.0, 1.0–1.2, 2.0–4.0 и 4.0–6.0 МэВ. Эти значения использовались для установления формы дифференциального энергетического спектра  $dJ/dE \approx j/\Delta E$ , где  $\Delta E = 0.2$  МэВ для первых двух и  $\Delta E = 2$  МэВ – для последних двух интервалов  $E$ . В результате было установлено, что этот спектр наиболее удовлетворительно описывается степенной по импульсу функцией, а именно:

$$dJ/dE = 2.9 \times 10^8 p^{-7.39} \text{ (см}^2 \text{ с ср МэВ)}^{-1}. \quad (1)$$

Здесь  $p = \sqrt{\kappa(\kappa + 2)}$  – безразмерный импульс электронов, где  $\kappa = E/mc^2$ ,  $E$  – кинетическая энергия в МэВ,  $mc^2 = 0.51$  МэВ. При получении (1) значения  $p$  рассчитывались для средней энергии в каждом из 4-х указанных интервалов  $E$ . Из (1) следует, что при  $E > 0.6$  МэВ и  $E > 2$  МэВ интегральные потоки равны, соответственно,  $3.4 \times 10^5$  и  $10^3$  (см<sup>2</sup> с ср)<sup>-1</sup>. Это хорошо согласуется со среднесуточными значениями этих потоков перед началом бури 9–10 апреля по данным GOES-10 (см. рис. 1).

В работе [Бахарева и др., 2007] при определении формы спектра  $dJ/dE \approx j/\Delta E$  на фазе восстановления магнитной бури 6 апреля 2000 г. рассматривались значения потоков  $j$  (по этим же данным Экспресс-А2), наблюдавшиеся на длительных платообразных частях временных профилей с ~10 по 16 апреля. Тем самым фактически был определен энергетический спектр, установившийся после слабой магнитной бури 9–10 апреля. Было показано, что в диапазоне 0.8–6.0 МэВ этот спектр наиболее удовлетворительно описывается степенной по импульсу (а не по энергии) функцией:

$$dJ/dE = 8.9 \times 10^7 p^{-6.45} \text{ (см}^2 \text{ с ср МэВ)}^{-1}. \quad (2)$$

Было также показано, что рассчитанные с использованием (2) потоки электронов с энергиями  $E > 0.6$  и  $> 2$  МэВ (равные, соответственно,  $2.3 \times 10^5$  и  $1.6 \times 10^3$  (см<sup>2</sup> с ср)<sup>-1</sup>) практически совпадают со среднесуточными значениями этих потоков по данным GOES-10 на платообразных частях временных профилей интегральных потоков с ~10 по 16 апреля 2000 г.

Из (1) и (2) следует, что после слабой бури 9–10 апреля спектр был более жесткий. Для сравнения укажем, что согласно (1) и (2), поток  $dJ/dE$  электронов с энергией 5 МэВ равнялся 7 и 20 (см<sup>2</sup> с ср МэВ)<sup>-1</sup>, соответственно, перед и после бури 9–10 апреля. Но поток электронов с энергией 0.6 МэВ был несколько выше перед началом бури 9–10 апреля, а именно  $dJ/dE = 2.2 \times 10^6$  и  $1.3 \times 10^6$  (см<sup>2</sup> с ср МэВ)<sup>-1</sup>, соответственно, перед и после бури 9–10 апреля.

Согласно работам [Бахарева, 2005; Бахарева и др., 2007] установившийся на фазе восстановления магнитной бури степенной по импульсу энергетический спектр  $dJ/dE = Ap^{-\gamma}$  удовлетворительно описывается стационарным решением кинетического уравнения для функции распределения  $f$  с коэффициентом диффузии  $D(p) = D_0 p^2$  и временем потерь  $t_{esc} = \text{const}$ . При этом показатель спектра  $\gamma = (\sqrt{9 + 4a} - 1)/2$ , а постоянная  $A = Q_0(4\pi mc D_0)^{-1}(9 + 4a)^{-1/2}$ , где  $a = (D_0 t_{esc})^{-1}$ ,  $Q_0$  – мощность инжекции затравочных электронов. Используя эти выражения и полученные спектры (1), (2), нетрудно показать, что перед началом слабой бури  $a = 60$ ,  $Q_0/D_0 = 0.98$  см<sup>-3</sup>, а после нее  $a = 46$ ,  $Q_0/D_0 = 0.26$  см<sup>-3</sup>. Очевидно, что при  $D(p) = D_0 p^2$  постоянная  $D_0$  совпадает со скоростью диффузии или, что то же самое, с темпом ускорения  $t_{ac}^{-1} = D(p)/p^2 = D_0$ . Абсолютные значения  $D_0$ ,  $t_{esc}$  и  $Q_0$  до и после слабой бури будут оценены при анализе временной динамики потоков электронов (см. раздел 4).

### 3. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для описания временной динамики потоков электронов мы воспользуемся нестационарным решением кинетического уравнения для функции распределения  $f$  при  $D(p) = D_0 p^2$  и времени потерь  $t_{esc} = \text{const}$  в предположении  $\delta(t)\delta(p - 1)$  инжекции затравочных электронов [Бахарева, 2003]:

$$f(p, \tau) = \frac{f_0}{2\sqrt{\pi\tau}} p^{-3/2} \exp\left[-\left(\frac{9}{4} + a\right)\tau - \frac{\ln^2 p}{4\tau}\right], \quad (3)$$

где  $\tau = D_0 t$  – безразмерное время,  $a = (D_0 t_{esc})^{-1}$ .

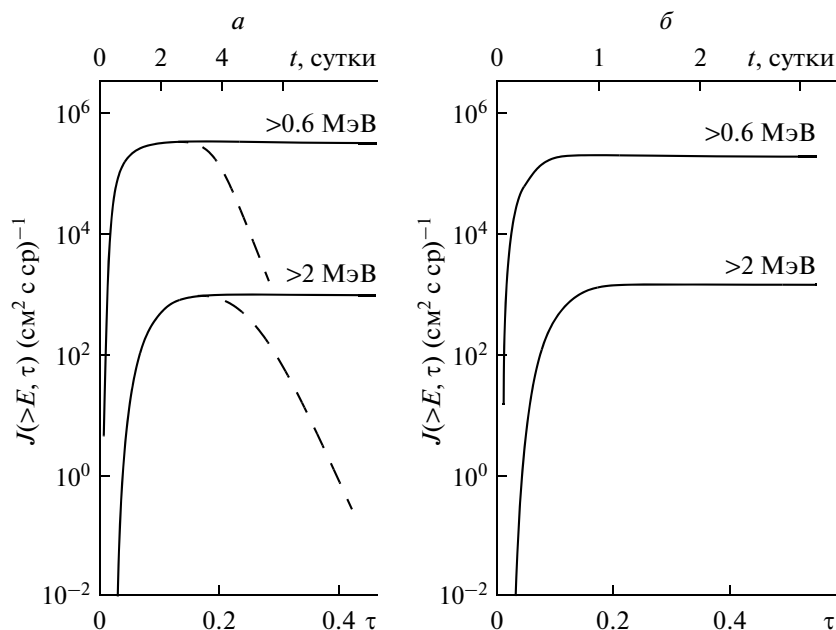
В данной работе нас будет интересовать динамика интегральных потоков  $J_0(> E, \tau) = \frac{c}{4\pi} \int_p^\infty p^2 f(p, \tau) dp$ .

Используя (3) и интегрируя по  $p$ , получаем:

$$J_0(> E, \tau) = \frac{c}{8\pi} f_0 e^{-a\tau} \left[1 - \Phi\left(\frac{\ln p - 3\tau}{2\sqrt{\tau}}\right)\right], \quad (4)$$

где  $\Phi$  – интеграл вероятности.

Выражение (4) соответствует мгновенной инжекции затравочных электронов с импульсом  $p = 1$  (т.е. с энергией  $E = 214$  кэВ). При конечной во времени длительности  $t_0$  инжекции затравочных элек-



**Рис. 2** Расчетная по формуле (5) (с использованием (4)) зависимость интегральных потоков  $J(> E, \tau)$  электронов с энергиями  $E > 0.6$  МэВ и  $E > 2$  МэВ от безразмерного времени  $\tau = D_0 t$ : (а) – для бури 6 апреля 2000 г. (при значениях  $a = (D_0 t_{esc})^{-1} = 60$ ,  $Q_0/D_0 = 0.98 \text{ см}^{-3}$ ) при неограниченной длительности инъекции  $\tau_0$  (сплошные кривые) и при  $\tau_0 = 0.145$  (сплошные кривые, переходящие в пунктирные); (б) – для бури 9–10 апреля 2000 г. (при значениях  $a = 46$ ,  $Q_0/D_0 = 0.26 \text{ см}^{-3}$ ) при неограниченной длительности инъекции.

На верхней горизонтальной оси указано реальное время  $t = \tau/D_0$ , отсчитываемое от начала бури, при скорости диффузии  $D_0 = 6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  (а) и  $D_0 = 2 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  (б).

тронов с постоянной мощностью  $Q_0$  функция  $J_0(> E, \tau)$  преобразуется в функцию  $J(> E, \tau)$  (с множителем  $Q_0/D_0$  вместо  $f_0$ ):

$$J(> E, \tau) = \frac{Q_0}{D_0} \int_0^{\tau} J_0(> E, \tau) d\tau, \quad \tau \leq \tau_0. \quad (5)$$

При  $\tau > \tau_0$  нижний предел интегрирования заменяется на  $(\tau - \tau_0)$ , где  $\tau_0 = D_0 t_0$  – безразмерная длительность инъекции.

#### 4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Для сравнения теории и эксперимента мы воспользовались временной динамикой потоков электронов с энергиями  $>0.6$  и  $>2$  МэВ за период 6–16 апреля 2000 г. по данным GOES-10 (см. рис. 1). Для описания этой динамики был проведен численный расчет зависимости интегральных потоков  $J(> E, \tau)$  от безразмерного времени  $\tau$  по формуле (5) с подынтегральной функцией (4). Для каждой из двух бурь расчет проводился для электронов с энергиями  $E = 0.6$  МэВ ( $p = 1.93$ ) и  $E = 2$  МэВ ( $p = 4.81$ ) при полученных в разделе 2 значениях  $a$  и  $Q_0/D_0$  для этих бурь. Расчет проводился при неограниченной

длительности инъекции  $\tau_0$ , а также при  $\tau_0 = 0.145$  (для бури 6 апреля). Результаты расчета изображены на рис 2а, б. Как и следовало ожидать расчетные абсолютные значения  $J(> E, \tau)$  на платообразных частях временных профилей практически совпадают с интегральными потоками, которые были получены в разделе 2 из дифференциальных спектров (1) и (2). Для дальнейшего сравнения расчетов с экспериментом необходимо было учесть, что реальное время  $t = \tau/D_0$ , отсчитываемое от начала инъекции ( $t = \tau = 0$ ), зависит от неизвестной скорости диффузии  $D_0$ . Укажем, что от значения  $D_0$  зависит скорость нарастания потоков и начало формирования плато. Варьируя  $D_0$ , мы нашли, что для бури 6 апреля наилучшее согласие с экспериментом достигается при  $D_0 = 6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ , а для бури 9–10 апреля при  $D_0 = 2 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ . При этом за начало инъекции было принято начало этих бурь, а именно, для первой бури – 17 UT 6 апреля, а для второй бури – 12 UT 9 апреля.

На рисунке 2 на верхней горизонтальной оси указано реальное время  $t$  в сутках, соответствующее найденным  $D_0$ . Расчетные кривые на рис. 2а при  $\tau_0 = 0.145$  иллюстрирует случай прекращения инъекции в начале бури 9–10 апреля (т.е. в момент  $t_0 = \tau_0/D_0 = 2.79$  сут при  $D_0 = 6 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ ) при условии

Расчетные характеристики ускорения и потерь для указанных магнитных бурь (подробности в тексте)

Дата	$a$	$D_0, \text{с}^{-1}$	$t_{esc}^{-1}, \text{с}^{-1}$	$Q_0, \text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$
6 апреля 2000г.	60	$6 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-5}$	$5.9 \times 10^{-7}$
9–10 апреля 2000г.	46	$2 \times 10^{-6}$	$9.2 \times 10^{-5}$	$5.2 \times 10^{-7}$

сохранения значений  $D_0$  и темпа потерь после прекращения инъекции.

На рисунке 1 на нижних двух панелях изображены расчетные временные профили (гладкие кривые) потоков электронов с энергиями  $>0.6$  МэВ и  $>2$  МэВ в масштабе реального времени  $t$  (с учетом указанного начала инъекции и значений  $D_0$  для этих бурь). Расчетные кривые, соответствующие буре 6 апреля, мы ограничили моментом времени 00 UT 10 апреля.

Используя найденные  $D_0$  и полученные в данной статье (см. раздел 2) значения  $a = (D_0 t_{esc})^{-1}$  и  $Q_0/D_0$  для бурь 6 и 9–10 апреля нетрудно вычислить абсолютные значения темпа потерь  $t_{esc}^{-1}$  и мощности инъекции затравочных электронов  $Q_0$  для этих бурь. Сводку всех этих величин мы приводим в таблице. Укажем, что значения  $t_{esc}^{-1}$  (см. таблицу) согласуются с оценками этой величины в магнитосфере Земли во время сильных геомагнитных возмущений, полученными в работе [Summers et al., 2004].

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показало проведенное исследование, после слабой бури 9–10 апреля 2000 г. произошло изменение динамики потоков релятивистских электронов, сопровождавшееся ужесточением энергетического спектра электронов при почти неизменной мощности инъекции затравочных электронов. Однако, это ужесточение было сравнительно невелико, несмотря на то, что скорость диффузии  $D_0$  (темп ускорения) увеличилась в 3.3 раза (см. таблицу). Это объясняется тем, что усиление суббуревой активности во время слабой бури привело также к увеличению темпа потерь  $t_{esc}^{-1}$  (но в меньшей степени, а именно в 2.5 раза). В результате отношение темпа потерь к темпу ускорения  $a = (D_0 t_{esc})^{-1}$  уменьшилась только в 1.3 раза, что и привело к наблюдаемому ужесточению спектра (2).

Можно предположить, что затравочные электроны (с энергиями  $\sim 200$  кэВ) инжектируются на геостационарную орбиту из внутренних областей магнитосферы, т.е. после бури 6 апреля – из первого радиационного пояса на  $L = 3$ , а после бури 9–10 апреля – из второго радиационного пояса на  $L \sim 4.5$ , т.е. имеет место двукратная инъекция малоэнергичных электронов.

Теперь обсудим вопрос о кажущемся противоречии между большим темпом потерь  $t_{esc}^{-1}$  и малым тем-

пом ускорения  $t_{ac}^{-1} = D(p)/p^2 = D_0$ . (см. таблицу). Из кинетического уравнения для функции распределения  $f$  без учета ускорения следует, что  $t_{esc}^{-1} = f^{-1} \partial f / \partial t$ , где  $f \sim \exp(-t/t_{esc})$ . Очевидно, что  $t_{esc}^{-1}$  надо сравнивать не с величиной  $t_{ac}^{-1}$  (характеризующей темп нарастания импульса во времени), а с относительной скоростью изменения  $f$  за счет ускорения. Оценим эту скорость при отсутствии потерь в простейшем случае  $\delta(t)$  инъекции. Используя формулу (3) для  $f$  при  $a = 0$  (т.е. при  $t_{esc} = 0$ ), нетрудно показать, что  $f^{-1} \partial f / \partial t = D_0(-\frac{1}{2} \tau^{-1} - \frac{9}{4} + \frac{1}{4} \tau^{-2} \ln^2 p)$ . Полагая для бури 6 апреля  $D_0 = 6 \times 10^{-7} \text{с}^{-1}$ , находим, что для электронов с энергией 2 МэВ в начальные моменты времени, например при  $\tau = D_0 t = 0.01$  и  $0.03$ , величина  $f^{-1} \partial f / \partial t$  равна, соответственно,  $3.7 \times 10^{-3} \text{с}^{-1}$  и  $4 \times 10^{-4} \text{с}^{-1}$  (т.е. существенно превышает  $t_{esc}^{-1} = 3.6 \times 10^{-5} \text{с}^{-1}$ ). С ростом времени величина  $f^{-1} \partial f / \partial t$  постепенно убывает и обращается в нуль, когда  $f$  достигает максимального значения. При этом убывание  $f^{-1} \partial f / \partial t$  происходит не за счет потерь, а в силу диффузионного характера ускорения. При совместном действии ускорения и потерь  $\max f$  достигается раньше, а величина  $\max f$  становится меньше, чем при отсутствии потерь. Более детально вопрос о влиянии темпов ускорения и потерь на временную динамику мэВных электронов в случае  $\delta(t)$  инъекции, а также при конечной длительности инъекции, исследован в работе [Бахарева и Орлова, 2009б].

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что после слабой магнитной бури 9–10 апреля 2000 г., развившейся на фазе восстановления сильной магнитной бури 6 апреля 2000 г., произошло изменение динамики потоков релятивистских электронов, связанное с увеличением темпа ускорения, а также с увеличением (но в меньшей степени) темпа потерь.

В результате проведенного исследования мы приходим к заключению о возможности двукратной (или, в более общем случае, многократной) инъекции и ускорения электронов на длительной фазе восстановления основной сильной магнитной бури, если в течение этой фазы регистрируются дополнительные магнитные бури меньшей амплитуды.

Авторы работы выражают благодарность группам и лицам, поддерживающим Интернет-сайты данных ИСЗ ACE, GOES, LANL и геомагнитной активности (WDC-2, Kyoto).

Работа выполнена при поддержке гранта НШ-1255.2008.2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахарева М.Ф. Нестационарное статистическое ускорение релятивистских частиц и его роль во время геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 6. С. 737–744. 2003.
- Бахарева М.Ф. Временная динамика потоков энергичных частиц при различных типах статистического ускорения и ее свойства во время геомагнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 5. С. 585–596. 2005.
- Бахарева М.Ф., Тверская Л.В., Иванова Т.А., Веденькин Н.Н. Интерпретация энергетического спектра и временной динамики потоков электронов с энергиями 0.8–6.0 МэВ на геостационарной орбите на фазе восстановления магнитной бури 6 апреля 2000 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 2. С. 176–186. 2007.
- Бахарева М.Ф., Орлова К.Г. Зависимость энергетических спектров релятивистских электронов на фазе восстановления магнитных бурь от темпов ускорения и потерь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 5. С. 611–619. 2009а.
- Бахарева М.Ф., Орлова К.Г. Влияние темпов ускорения и потерь на временную динамику потоков энергичных электронов во время геомагнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 1. С. 18–27. 2009б.
- Lorentzen K.R., Mazur J.E., Looper J.F., Fennell J.F., Blake J.B. Multisatellite observations of MeV ion injections during storms // J. Geophys. Res. V. 107. № A9. 1231. doi: 10.1029/2001JA000276.2002.
- Summers D., Ma C., Mukai T. Competition between acceleration and loss mechanisms of relativistic electrons during magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 109. A04221. doi: 10.1029/2004JA010437. 2004.
- 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. 2003.