

УДК 523.4-854 + 550 385.4

УСКОРЕНИЕ И ПОТЕРИ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 30–31 АВГУСТА 2004 г.

© 2010 г. Л. Л. Лазутин¹, М. И. Панасюк¹, Н. Хасебе²¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцова, МГУ
lll@srd.sinp.msu.ru²Исследовательский научно-инженерный институт Университет Васеда, Япония,

В настоящей работе проводится анализ вариаций потоков частиц во время умеренной магнитной бури 30–31.VIII.2004 года, по измерениям на низковысотных полярных спутниках *КОРОНАС-Ф* и *SERVIS-1*. Радиационные пояса Земли в это время были заполнены повышенным потоком энергичных частиц, ускоренных за месяц до этого во время магнитных бурь 23–27.VII. Анализ показал, что даже во время умеренной магнитной бури наблюдается совокупность нескольких адиабатических и неадиабатических процессов, приводящих к ускорению или сбросу частиц и действующих избирательно в зависимости от диапазона энергий и заряда частиц.

1. ВВЕДЕНИЕ

Во время магнитосферных возмущений стабильность плазменных структур магнитосферы нарушается, и как одно из значимых последствий этих нарушений наблюдается высыпание в атмосферу Земли заряженных частиц. Наиболее исследованными являются высыпания авроральных электронов, ускоренных во время суббурь и энергичных электронов релятивистских и субрелятивистских энергий из радиационных поясов во время магнитных бурь. Последние привлекают к себе усиленное внимание и экспериментаторов и теоретиков, подстегнутое еще и немалой опасностью электронов “киллеров” для работы космических аппаратов. [1–4].

Высыпание протонов мэвных энергий ошутимой интенсивности — явление редкое, если не исключительное, так как протонный радиационный пояс — структура устойчивая, с характерным временем вариаций в месяцы и годы. Максимум протонного пояса для энергий >1 МэВ находится на $L \sim 3$, куда возмущения добираются только во время сильных магнитных бурь. Действительно, во время сильных бурь во внутренних областях протонного пояса наблюдались быстрые вариации энергичных частиц, протонов, и высыпание, и пополнение пояса за счет захвата солнечных космических лучей [5–7].

В частности во время магнитной бури 23–27.VII.2004 г., наблюдались значительные изменения интенсивности и радиального распределения захваченных частиц, как протонов, так и электронов, причем интенсивности частиц в поясах выросли на 2–3 порядка не только на внутренних оболочках, но и на внешних, до $L = 4–5$ [8]. Последовавший медленный спад интенсивности был нарушен во время умеренной магнитной бури 30.VIII.2004 г.,

когда наблюдались значительные вариации, возрастания и сбросы энергичных частиц, которые способны вызвать значительные изменения в ионосфере субавроральных и средних широт и которые стали предметом настоящего исследования.

В настоящей работе проводится анализ вариаций потоков частиц, по измерениям на низковысотных полярных спутниках *КОРОНАС-Ф (КФ)* и *SERVIS-1 (С1)*, показавший, что даже во время умеренной магнитной бури наблюдается совокупность нескольких адиабатических и неадиабатических процессов, приводящих к ускорению и сбросу энергичных частиц различных энергий.

2. ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения энергичных частиц проводились на низковысотных спутниках *КОРОНАС-Ф (КФ)* и *SERVIS-1 (С1)*. Оба спутника имели полярную круговую орбиту с высотой 500 и 1000 км соответственно. Для анализа использовались данные нескольких каналов спектрометров частиц в диапазоне энергий 0.3–6 МэВ для электронов и 1–15 МэВ для протонов [9–10].

2.1. Магнитная буря 30–31.VIII.2004 г. В конце июля 2004 года наблюдалась серия из трех магнитных бурь мощностью до 300 нТ, существенно изменившая структуру радиационных поясов Земли. Весь август до конца месяца магнитная обстановка была спокойной, умеренная магнитная буря началась внезапным началом (*SC*) в 10.04 UT 29.VIII.04 и сопровождалась сильной суббуревой активностью.

На рис. 1 приводятся графики шторм-тайм вариации (D_{st}) и A_e — индекса во время бури. Главная фаза была длительной с 00 UT 30.VIII.04 до 22 UT того

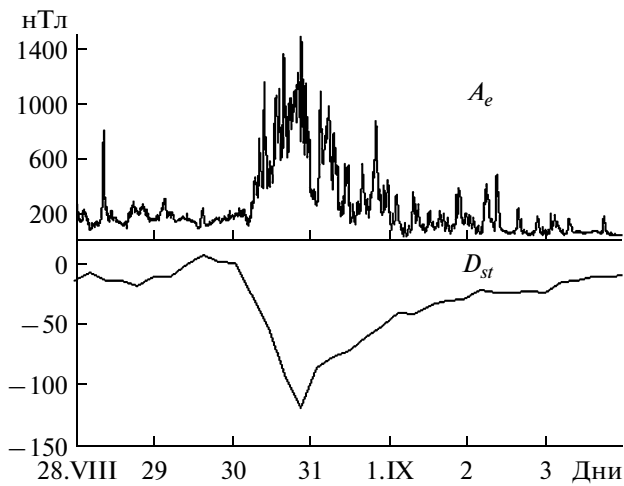


Рис. 1. Индексы магнитной активности в конце августа–начале сентября 2004 г.

же дня. Фаза восстановления продолжалась почти 5 суток.

Особенность этой магнитной бури, выделяющая ее из большого ряда умеренных бурь, заключалась в том, что во время предшествующей серии бурь конца июля радиационные пояса Земли, как протонный так и электронный, были заполнены потоками энергичных частиц, значительно превышавшими спокойный уровень, с нестандартным радиальным распределением [8, 11]. Повышенный поток сохранялся до конца августа, и это обстоятельство позволило проследить, как умеренная магнитная буря влияет на популяцию частиц радиационных поясов в широком диапазоне дрейфовых оболочек.

2.2. Потоки протонов. Низковысотные спутники пролетают через радиационный пояс только в районе Бразильской магнитной аномалии (БМА), на остальных долготах регистрируются лишь высыпавшиеся частицы. Поэтому радиальные профили интенсивности протонов над БМА и вне ее существенно отличаются. На рис. 2 и приведено несколько радиальных профилей протонов с энергией 1 МэВ, измеренных на спутнике *C1* 30.VIII.04. (Точнее, спутник регистрирует распределение интенсивности протонов по широте, но пересчитывая положение спутника в L -координатах мы получаем радиальный профиль).

Над БМА спутник *C1* видит два максимума на $L = 2$ и $L = 3.2$. Первый был заполнен солнечными протонами еще во время экстремальной магнитной бури 29–31.X.2003 г., второй – во время упомянутой выше июльской бури. Несколько пролетов вне магнитной аномалии, приведенные на рис. 2, показывают, что в районе $L = 3–5$ 30.VIII происходит высыпание мэвных протонов. Радиальный профиль высыпавшихся частиц варьирует в широких преде-

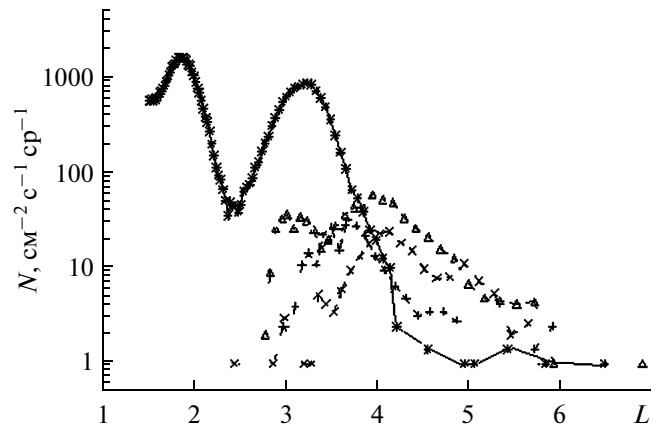


Рис. 2. Радиальные профили протонов 1.2 МэВ, измеренные 30.VIII.2004 г. на спутнике *SERVIS-1* над БМА (сплошная линия со звездочками) и при пролетах на долготах вне БМА отдельные значки.

лах, и высыпание не прекращалось с 05 до 22 UT, т.е. с начала авроральной активности и до конца главной фазы бури.

На рис. 3 приведены измерения на спутнике *КФ*. Три кривых соединенных сплошными линиями, представляют измерения над БМА: 29.VIII – спокойное состояние пояса перед бурей, 30 – в конце главной фазы и 31.VIII – на фазе восстановления.

Так как над аномалией проходит несколько орбит спутника, на графиках представлены верхние огибающие нескольких пролетов – максимальный темп счета на каждом расстоянии с шагом $dL = 0.1$. *КФ* максимума на $L = 2$ не видит (с января 2004 г.), частиц вблизи конуса потерь не осталось, а второй максимум регистрируется надежно, причем поток

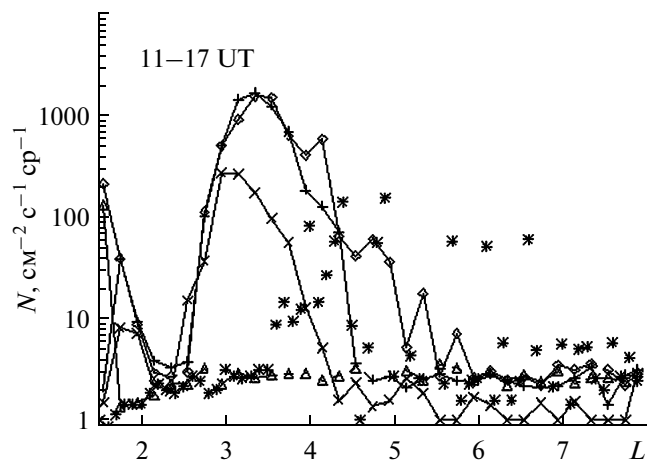


Рис. 3. Три радиальных профиля протонов измеренные на спутнике *КОРОНАС-Ф* над БМА 29, 30 и 31.VIII (сплошные линии) и вне аномалии (треугольники 29.VIII, звездочки – 30.VIII.04).

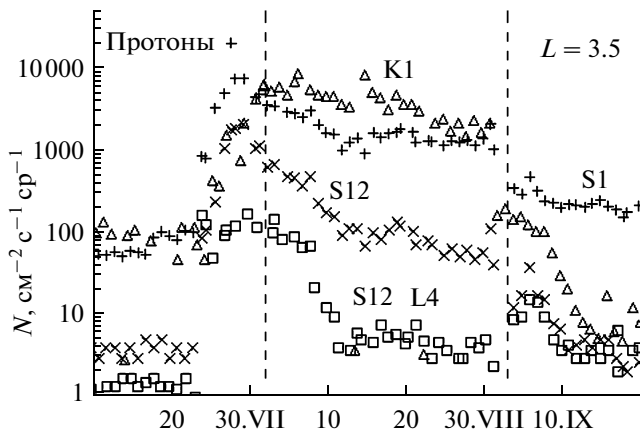


Рис. 4. Временной ход интенсивности протонов в пролетах над БМА.

частиц на этой широте на обоих спутниках превышает уровень невозмущенного пояса на порядок.

Вне БМА радиальные профили по орбитам 29.VIII обозначены треугольниками, а 30.VIII - звездочками. Видно, что 29.VIII в спокойный период до бури высыпаний протонов не было зарегистрировано, а 30.VIII, на главной фазе магнитной бури, поток высыпавшихся протонов составлял порядка 0.1 от потока над БМА, также как и на С1.

Высыпание протонов 30.VIII существенно опустошает протонный пояс, преимущественно вблизи конуса потерь, что и видно при сравнении профиля 31.X с профилями, измеренными в предшествующие дни.

Суммарные результаты опустошения протонного пояса прослеживаются при сравнении вариаций интенсивности протонов над БМА ото дня ко дню на разных широтах. Пример таких изменений на $L = 3.5$ спутниками С1 и КФ приведен на рис. 4. После возрастания 25–30.VII.04 и начального быстрого спада наблюдается медленное плавное уменьшение интенсивности до начала бури 30 августа. Как видно из графика, наблюдается спад интенсивности протонов в энергетическом диапазоне 1–15 МэВ на обеих спутниках с максимальной величиной спада на КФ в канале 1–5 МэВ. Похожая картина наблюдается и на $L = 3$. На $L = 2$ эффекта нет, а на $L = 4$ потери подавляются эффектом роста интенсивности, очевидно связанным с суббулевой активностью.

Классическая теория предполагает, что уход протонов из пояса порождаются ионизационными потерями на молекулах остаточной атмосферы вдоль траектории частицы, процессом достаточно медленным. Для возбуждения ионно-циклотронных волн интенсивности протонов пояса не хватает [12, 13], поэтому питч-угловая диффузия в конус потерь за счет ионно-циклотронной неустойчиво-

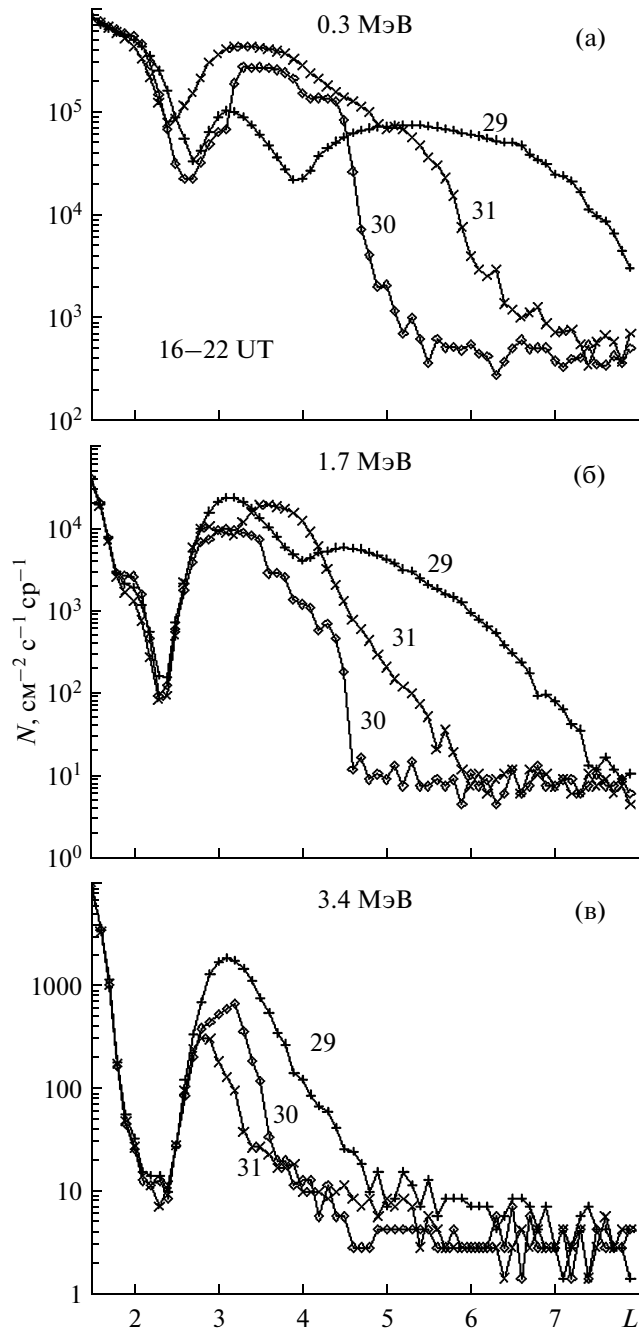


Рис. 5. Трансформация радиальных профилей электронов во время магнитной бури 29–30.VIII.04.

сти не происходит. Действительно, перед бурей высыпание протонов нашими спутниками не регистрируется.

Можно предположить, что во время бури питч-угловая диффузия происходит на ионно-циклотронных волнах (EMIC), развивающихся вблизи плазмопаузы на протонах кольцевого тока. На возможность развития EMIC указывалось в ряде публикаций [14–16].

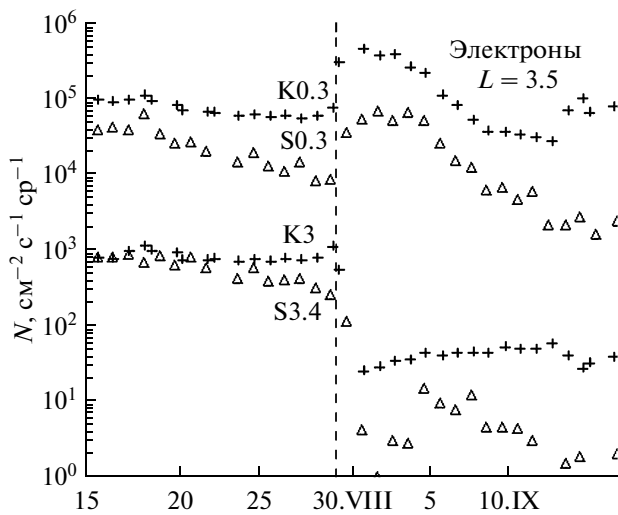


Рис. 6. Изменение интенсивности электронов над БМА во время магнитной бури 30.VIII.04.

На фазе восстановления магнитной бури на спутнике *C1* на $L = 3.5-4$ наблюдается рост интенсивности с наибольшей амплитудой в канале 12.5 МэВ. *КФ* этого роста не видит, вероятно преимущественно растет перпендикулярная составляющая скорости частиц как при ускорении бетатронного типа.

2.3. Поток электронов. На рис. 5а–в) приведены радиальные профили электронов 0.3, 1.7 и 3.4 МэВ, измеренные на спутнике *C1* в районе БМА в вечернем секторе. Так как над аномалией проходит несколько орбит спутника, на графиках представлены верхние огибающие нескольких пролетов — максимальный темп счета на каждом расстоянии с шагом $dL = 0.1$. Профиль 29.VIII отражает предбуревое состояние пояса, 30.VIII — в конце главной фазы и 31.VIII — на фазе восстановления.

Начальный профиль 29.VIII электронов 0.3 МэВ имеет два максимума, главный на $L = 4-6$, там, где и положено быть внешнему поясу, и дополнительный на $L = 3$, оставшийся после недавнего ускорения электронов в июльской буре. К концу главной фазы на внешних оболочках ($L > 4.5$) наблюдается падение интенсивности, а на внутренних ($L = 3.2-4.5$) — заметный рост, который продолжается и на фазе восстановления. 31.VIII начинает расти поток электронов 0.3 МэВ и на внешних оболочках и к концу фазы восстановления возвращается к предбуревому уровню.

Профили электронов с энергией 3.4 МэВ ведут себя по-другому. Здесь перед бурей внешний пояс не виден, не хватает чувствительности детектора, но наблюдается аномальный максимум на $L = 3$, заполненный во время июльских бурь. Затем 30 и 31.VIII интенсивность в этом максимуме последовательно уменьшается и область захвата сжимается,

в результате максимальная амплитуда потерь (в 20 раз) наблюдается на $L = 3.5$.

Профили электронов 1.7 МэВ на внешних оболочках повторяют изменения профилей 0.3 МэВ, а на внутренних оболочках не наблюдается ни отчетливого спада, ни роста интенсивности, по-видимому действуют оба фактора, проявляющие себя на более низких и более высоких энергиях.

Суммарные графики изменения потока электронов ото дня ко дню на $L = 3.5$ показаны на рис. 6. Два противоположных по знаку эффекта магнитной бури наблюдаются спутниками: большой спад интенсивности электронов с энергией 3 МэВ и выше и возрастание потока электронов меньших энергий.

Можно предположить, что сброс идет посредством паразитного резонанса на тех же ЕМІС, которые возбуждаются протонами кольцевого тока. Для этого резонанса требуется большая продольная скорость, которой не хватает у электронов меньших энергий.

Электроны меньшей энергии, напротив, испытывают сначала быстрый рост интенсивности, а затем в течение нескольких дней — возвращение к предбуревому уровню. Наиболее сильный эффект наблюдается на $L = 4$.

На авроральных широтах временной ход обратный — сначала спад, затем возрастание, что объясняется если не полностью, то частично, адиабатическим охлаждением при вытягивании силовых линий в хвост, и затем — адиабатическим же ускорением.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вариации потоков энергичных частиц в радиационных поясах определяются несколькими факторами, зачастую противоположного действия, и сочетание этих факторов в каждой магнитной буре индивидуально. Анализ 276 геомагнитных бурь за 1989–2000 годы, проведенный в [17] показал, что приблизительно в 50% бурь наблюдается итоговое возрастание потока релятивистских электронов на геостационарных орбитах, 25% не дают значительных изменений, и в оставшихся 25% поток электронов падает. Все определяется соотношением процессов ускорения и потерь, которые разделяются на адиабатические и неадиабатические.

На главной фазе поток электронов должен спадать из-за адиабатического охлаждения: сохранение третьего инварианта вызывает движение дрейфовых орбит от Земли в область более слабого поля (“Dst effect.”). На фазе восстановления происходит движение в обратную сторону и начальное состояние восстанавливается.

Адиабатические процессы прослеживаются при анализе данных ([18]), в частности и в нашем случае падение потоков электронов, зарегистрированное *С1* во время главной фазы бури на $L > 4.5$ объясняется тем, что сохранение второго адиабатического инварианта (длины отрезка силовой линии между зеркальными точками) при вытягивании силовой линии приводит к подъему зеркальных точек в область более слабого поля и, соответственно, к уменьшению энергии частиц. Электроны в результате не гибнут, а только падает их энергия и из-за подъема зеркальных точек спутник просто перестает их видеть. На фазе восстановления магнитной бури процесс идет в обратном направлении и спутник вновь регистрирует захваченные электроны внешнего пояса той же интенсивности.

Одновременно мы наблюдаем вариации потока электронов, которые можно объяснить только процессами неадиабатическими, и ускорением частиц и потерями.

Потери этого рода включают питч-угловую диффузию в конус потерь и потери на магнитопаузе (“magnetopause shadowing,”), из-за того, что частицы с замкнутых дрейфовых орбит переходят на разомкнутые, в область квазизахвата. О эффективности механизма питч-угловой диффузии свидетельствуют наблюдения высыпаний электронов [17, 19]. О потерях на магнитопаузе известно меньше, есть косвенные предположения [17], что этот эффект не велик.

Неадиабатические эффекты, приводящие к возрастанию потока частиц объясняются взаимодействием с ОНЧ-волнами (также как и потери) и с радиальной диффузией к Земле при сохранении магнитного момента [1, 20, 21].

3.1. Высыпание частиц на ионно-циклотронных волнах на главной фазе бури. Ионно-циклотронные волны (EMIC waves) возбуждаются и распространяются в авроральной области на частотах ниже протонной гирочастоты и проявляются в геомагнитных пульсациях типа P11 или т.н. “жемчужин”. В области захвата, протонов радиационного пояса недостаточно для возбуждения EMIC, и они возникают только во время магнитных бурь вблизи плазмопаузы на низкоэнергичных (10–50 кэВ) протонах кольцевого тока, генерирующих ионно-циклотронную неустойчивость.

Волны с частотой ω и волновым числом k могут рассеивать частицы высоких энергий с циклотронной частотой Ω через паразитный резонанс, условия которого записываются формулой

$$\omega - k_{\parallel}v_{\parallel} = \Omega(e, p)/\gamma, \quad (1)$$

где $\gamma = (1 - v_2^2/c_2^2)^{1/2}$ и v_{\parallel} – продольная скорость частицы [22]. Минимальная продольная ско-

рость частицы для резонанса с волной определяется следующим выражением [16]:

$$V_{\parallel} = \frac{-y \pm \sqrt{y^2 - 4xz}}{2x}, \quad (2)$$

где $x = k_2 + \Omega_2/c_2$, $y = -2\omega k$, $z = \omega_2 - \Omega_2$ и Ω – гирочастота протонов или электронов, в зависимости от типа рассматриваемых частиц.

Для протонов минимальная энергия резонирующих частиц – единицы или десятки кэВ, что много меньше протонов мэвных энергий. Таким образом потери протонов, которые были нами зарегистрированы во время магнитной бури 30.VIII.04 вполне могут объясняться указанным механизмом.

Минимальная энергия резонансных электронов E_{\min} рассчитывалась в работе [16] на основе измерений ионно-циклотронных волн на спутнике *CRRES*. В большинстве случаев E_{\min} была выше 2 МэВ, вблизи 3 МэВ. С большой степенью уверенности можно утверждать, что спад интенсивности электронов в каналах 3–6 МэВ у *KФ* и 3.7 МэВ спутника *С1* вызван паразитным резонансом с ионно-циклотронными волнами. Становится понятным, почему не наблюдается спад в потоках электронов меньших энергий.

Время жизни релятивистских электронов >3 МэВ по измерениям на *KФ* и *С1* составляет около 10 часов (поток падает на порядок за сутки, возможно и быстрее). Этот результат соответствует теоретическим расчетам в работе [22]. По мнению [17], режим питч-угловой диффузии близок к сильной, при котором время жизни в центре кольцевого тока может составить несколько минут. Однако долгий интервал взаимодействия электронов с волнами невелик, остальную часть дрейфовой орбиты частицы проходят без потерь, что увеличивает время жизни до единиц и первых десятков часов.

Скорость потерь энергичных протонов по нашим измерениям зависит от высоты спутника и энергии частиц. Время жизни порядка 10 часов, близкое по величине к времени жизни электронов, регистрируется на спутнике *KФ*, тогда как на *С1* скорость потерь меньше. Этот результат можно понять, если предположить, что более высокий спутник помимо потока высыпавшихся частиц регистрирует и рост захваченных протонов, обусловленный ускорением на волнах.

3.2. Возрастание потоков частиц на фазе восстановления магнитной бури. Возрастания потока электронов с энергией 0.3–2 МэВ, в нашем эксперименте были зарегистрированы на фазе восстановления магнитной бури, что вообще говоря, нельзя рассматривать как нечто неожиданное, так как об этом известно из большого числа работ, посвященных исследованию электронов-“киллеров” [1–4, 16]. Большой интерес вызывает замеченное

нами одновременное возрастание потока протонов с энергией от 1 до 15 МэВ на $L > 3.5$. По-видимому в “рядовых” умеренных бурях этот эффект было невозможно заметить, поскольку энергичных протонов в районе $L > 3.5$ нет, протонный пояс сидит ближе к Земле. Во время сильных магнитных бурь, после того как в протонный пояс захватывались солнечные протоны 1–15 МэВ, на фазе восстановления также наблюдалось совместное ускорение протонов и электронов релятивистских и субрелятивистских энергий, но на более глубоких орбитах [8].

Одновременная регистрация возрастания потока электронов и протонов трудно объяснить взаимодействием с ОНЧ-волнами, предпочтение следует отдать механизму ускорения за счет радиальной диффузии к Земле при радиальном к Земле электронном $E \times B$ дрейфе, который одинаково действует и на протоны и на электроны.

ВЫВОДЫ

Уникальность умеренной магнитной бури 30.VI–II.2004 заключается в том: что она произошла через месяц после сильного возмущения 23–27.VII.2008, когда поток захваченных и ускоренных во время этого возмущения энергичных частиц оставался еще очень высоким, что позволило исследовать воздействие магнитной бури на захваченные частицы как на внешних, так и на внутренних оболочках. Следующие эффекты обнаружены при анализе измерений энергичных протонов и электронов на спутниках КОРОНАС-Ф и SERVIS-1:

– адиабатический спад интенсивности на главной фазе магнитной бури и рост до невозмущенного уровня на фазе восстановления, электроны 1–12 МэВ на $L > 4.5$;

– падение интенсивности на главной фазе магнитной бури при паразитном резонансе с ионно-циклотронными волнами (EMIC), генерированными протонами кольцевого тока, $L = 3–3.5$, протоны 1–15 МэВ, электроны >3 МэВ;

– рост интенсивности на главной фазе бури предположительно за счет резонанса с суббуревым ОНЧ-излучением, электроны <1 МэВ;

– рост интенсивности на фазе восстановления за счет радиального дрейфа к Земле при сохранении магнитного момента, электроны 1–12 МэВ и протоны 1–15 МэВ. Этот результат существенен для проблемы ускорения электронов-киллеров, для решения которой в последние годы предпринимались значительные усилия.

Каждый из перечисленных эффектов обнаруживался ранее или был предсказан теоретически, однако такое сложное комплексное сочетание этих эффектов наблюдалось впервые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A.* Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc-5 ULF oscillation // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 3273.
2. *Friedel R.H., Reeves G.D., Obara T.* Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere: A review // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 2002. V. 64. P. 265–282.
3. *Meredith N.P., Horne R.B., Iles R.H.A. et al.* Outer zone relativistic electron acceleration associated with sub-storm-enhanced whistler mode chorus // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. A7. doi: 1029/2001JA900146.
4. *Horne R.B., Meredith N.P., Thorne R.M. et al.* Evolution of energetic pitch angle distributions during storm-time electron acceleration to megaelectronvolt energies // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108(A1). P. 1016. doi: 10.1029/2001JA009165.
5. *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.
6. *Lorentzen K.R., Mazur J.E., Loper M.E. et al.* Multisatellite observations of MeV ion injections during storms // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1231–1239.
7. *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.
8. *Lazutin L., Muravjeva E., Panasyuk M. 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.*
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. *Hasebe N., Sukurai K., Hareyama M. et al.* Variations of the radiation belts energetic particles after the July 22–30, 2004 magnetic storms // *Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXXI Annual Seminar, Apatity. 2008.*
12. *Тверской Б.А.* Перенос и ускорение заряженных частиц в магнитосфере Земли // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 1965. Т. 5. С. 793–809.
13. *Тверской Б.А.* Основы теоретической космофизики // *УРСС. М. 2004.*
14. *Erlanson R.E., and Ukhorskiy A.J.* Observations of electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms: Wave occurrence and pitch angle scattering // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 3883.
15. *Jordanova V.K., Farrugia C.J., Thorne R.M. et al.* Modeling ring current proton precipitation by electromagnetic ion cyclotron waves during the May 14–16, 1997, storm // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106 P. 7.
16. *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. Res.* 2003. V. 108. №. A6. P. 1250. doi:10.1029/2002JA009700.
17. *Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W. and O'Brien T.P.* Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. №. 10. P. 1529. doi:10.1029/2002GL016513.
 18. *Kim H.-J., and Chan A.A.* Fully-adiabatic changes in storm-time relativistic electron fluxes // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 22107.
 19. *Liu, W.W., Rostoker B., and Baker D.N.* Internal acceleration of relativistic electrons by large-amplitude ULF pulsations // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 17391.
 20. *Hudson M.K., Elkington S.R., Lyon J.G. et al.* Simulation of radiation belt dynamics driven by solar wind variations // in *Sun-Earth Plasma Connections / Edited by J.L. Burch, R.L. Carovillano, and S.K. Antiochos.* V. 109. P. 171. AGU. Washington D.C. 1999.
 21. *Hudson M.K., Elkington S.R., Lyon J.G., and Goodrich C.C.* Increase in relativistic electron flux in the inner magnetosphere: ULF wave mode structure // *Adv. Space Res.* 2000. V. 25. P. 2327.
 22. *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.
 23. *Summers D., Ma C., Meredith N.P. et al.* Model of the energization of outer-zone electrons by whistler-mode chorus during the 9 October 1990 geomagnetic storm // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29(24). P. 2174. doi: 10.1029/2002GL016039.