

УДК 523.4-854

О ПОЯСЕ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА $L = 2.75$ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2012 г. Ю. И. Логачев, Л. Л. Лазутин

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

Logachev@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 15.04.2010 г.

В 1964 г. при полетах спутников *ЭЛЕКТРОН* в магнитосфере Земли были зарегистрированы узкие пояса энергичных электронов ($E_e \approx 6$ МэВ) на $L \approx 2.75$. Такие же образования приблизительно на тех же магнитных оболочках были обнаружены в 2004 г. спутниками Земли *КОРОНАС-Ф* и *SERVIS-1*. Проводится сравнение результатов этих экспериментов. Показано, что дополнительные узкие пояса энергичных электронов возникают после интенсивных магнитных бурь ($D_{st} > 100$ нТл), в наших случаях имевших двойную-тройную структуру. Время жизни этих поясов составляет несколько месяцев, их исчезновение носило постепенный характер. Полученные результаты, разнесенные по времени на 40 лет, говорят о постоянстве источников частиц радиационных поясов Земли и протекающих в магнитосфере процессов, что обеспечивает не только существование самих поясов радиации, но и повторяемость различных экзотических явлений в поясах, подобных поясу энергичных электронов на внутренних магнитных оболочках.

1. НЕМНОГО ИСТОРИИ

Структура потоков энергичных электронов в радиационных поясах Земли в плоскости экватора имеет картину, представленную на рис. 1. Видно, что для потоков электронов с энергией >100 кэВ, а особенно с энергией >1 МэВ на $L = 3.0-3.2$ наблюдается глубокий минимум, разделяющий внутренний и внешний пояса. Для электронов малых энергий (10–50 кэВ) этот минимум почти отсутствует.

Этот рисунок получен по результатам полетов спутников *ЭЛЕКТРОН* в 1964 г. Полеты этих спутников дали ответ и на вопрос об устойчивости радиационных поясов Земли и их вариациях в зависимости от уровня солнечной активности. Как мы помним, радиационные пояса были открыты в период максимума солнечной активности и не было уверенности, что при ее уменьшении пояса не претерпят сильного изменения или вообще не исчезнут. Время полета спутников *ЭЛЕКТРОН* пришлось на год минимума солнечной активности. Один из важных результатов полетов этих спутников состоял в том, что радиационные пояса Земли являются устойчивым образованием и их характеристики меняются не катастрофически при переходе солнечной активности от максимума к минимуму.

2. ПОЯС ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В 1964 г.

При полете спутников *ЭЛЕКТРОН* было обнаружено интересное образование – узкий пояс

энергичных электронов ($E_e > 6$ МэВ), располагавшийся в зазоре между внутренним и внешним поясом на $L \approx 2.7-2.8$ (см. рис. 2). Этот пояс уже существовал к моменту запуска спутников *ЭЛЕКТРОН-1*, -2 (30.I.1964 г.) и практически исчез ко времени запуска спутников *ЭЛЕКТРОН-3*, -4 (11.VII.1964 г.). Он регистрировался в основном спутником *ЭЛЕКТРОН-1*, имевшим орбиту, пересекавшую магнитную оболочку с $L \approx 2.7-2.8$. Спутник *ЭЛЕКТРОН-2* также регистрировал это образование, но менее отчетливо, т.к. он пересекал магнитные оболочки с $L \approx 2.7-2.8$ на значительно больших высотах, где фоновый счет счетчика Гейгера, зарегистрировавшего обсуждаемый пояс высокоэнергичных электронов, от тормозного излучения электронов меньших энергий заглушевывал счет электронов с энергией $E_e > 6$ МэВ. На рис. 2 приведены данные некоторых последовательных пролетов спутника *ЭЛЕКТРОН-1*, приблизительно каждого десятого, пересекающего области зазора между внутренним и внешним поясами по прибору, регистрировавшему энергичные электроны ($E_e > 4$ МэВ).

На рисунке хорошо видно наличие пика таких электронов на $L \approx 2.5-3$. Сравнение данных других приборов показало, что пояс образован электронами с энергиями >6 МэВ [1]. Статистическая обработка положений этого пояса в пересчете на экваториальные широты дала значение для $L = 2.75 \pm 0.4$.

Анализ показаний трех счетчиков Гейгера и сцинтилляционных счетчиков показал, что источник возрастания – электроны с энергией от

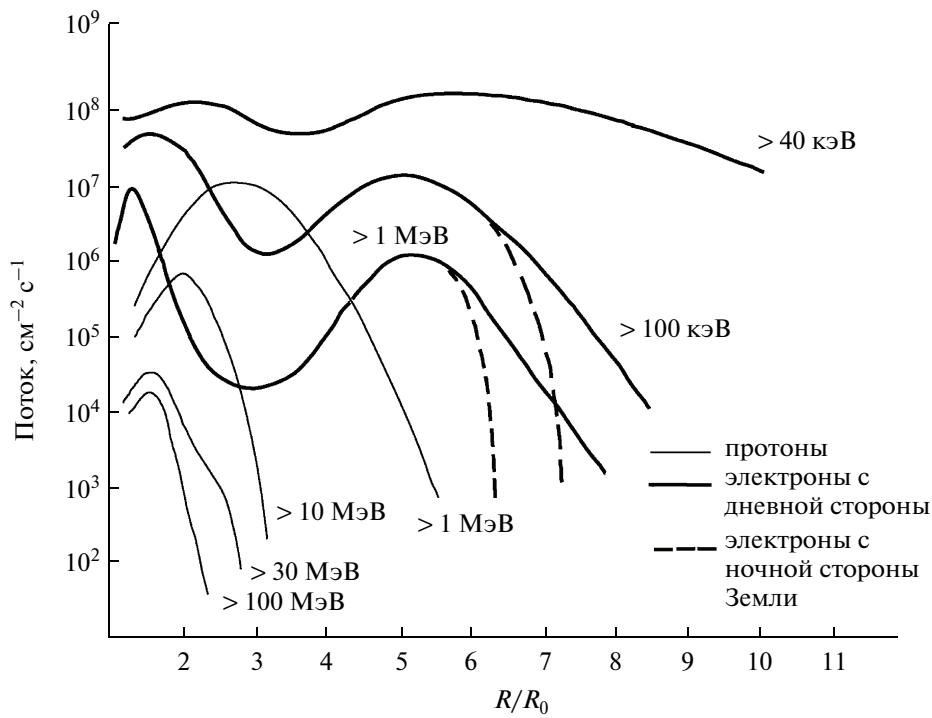


Рис. 1. Потоки электронов и протонов различных энергий в плоскости геомагнитного экватора в периоды спокойной магнитосферы.

4 до 7 МэВ. В 1964 году это экзотическое явление не было строго объяснено. Но было высказано предположение, что пояс, возможно, возник во время магнитной бури 23.IX.1963 г., т.е. задолго до начала полетов спутников *ЭЛЕКТРОН* [1].

Другую возможность дает теория Тверского Б.А. (1968 г.), которая допускает заброс частиц во внутренние области магнитосферы под действием мощных одиночных или более слабых групповых внезапных положительных импульсов магнитного поля, которая, однако, в 1964 г. еще не была создана [2].

В настоящей заметке мы покажем, что предположение о связи магнитной бури 23.IX.1963 г. с появлением пояса энергичных электронов является правильным. Это предположение позволяет нам обсудить временные характеристики пояса энергичных электронов, существовавшего в 1963–64 гг. в зазоре между внутренним и внешним радиационными поясами.

Прежде всего, нужно обратить внимание на стабильность потоков электронов в течение месяца наблюдения спутником *ЭЛЕКТРОН-1* в феврале 1964 г. (см. рис. 2). Здесь в течение 20 дней скорость счета детектора сохранялась в пределах 60–80 имп/с (после вычета фоновой скорости счета детектора) и только в следующие 20 дней начала несколько уменьшаться, оставаясь около 40 имп/с в последний день работы спутника *ЭЛЕКТРОН-1*.

Это обстоятельство говорит о том, что после возникновения этого пояса в конце сентября 1963 года, он также оставался стабильным, поток электронов изменялся медленно все четыре месяца. Зарегистрированные скорости счета ≈ 100 имп/с соответствуют потоку электронов около $10^2 \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{sr}^{-1}$.

Как уже упоминалось, в работе [1], посвященной результатам экспериментов на спутниках *ЭЛЕКТРОН*, было высказано предположение, что описываемый пояс энергичных электронов на $L = 2.75$ возник в связи с магнитной бурей 22–23.IX.1963 г., т.е. за 4 месяца до полета спутников *ЭЛЕКТРОН*. Характеристики этой бури (значения D_{st}) представлены на рис. 3. Видно, что буря была достаточно сильная, максимальное $D_{st} = 240$ нТл, причем, буря была двойная: первая 22.IX., а затем более мощная 23.IX. Эта буря было вызвана солнечной вспышкой 21.IX.1963 N10W09, балл 2, McM 6964. Вспышка сопровождалась генерацией протонов достаточно высокой энергии ($J_p(E_p > 1.7 \text{ МэВ}) = 3 \cdot 10^2 / \text{см}^2 \text{с ср МэВ}$, $J_p(E_p > 200 \text{ МэВ}) = 3 \cdot 10^{-1} / \text{см}^2 \text{с ср МэВ}$), о потоке солнечных электронов в этой вспышке сведений нет. Вторая последовательная вспышка произошла в той же активной области 26.IX.1963 г. (N13W78, балл 3) также с протонами ($J_p(E_p > 1.3 \text{ МэВ}) = 3.5 \cdot 10^3 / \text{см}^2 \text{с ср МэВ}$, $J_p(E_p > 120 \text{ МэВ}) = 1 / \text{см}^2 \text{с ср МэВ}$), сведения об электронах также отсутствуют.

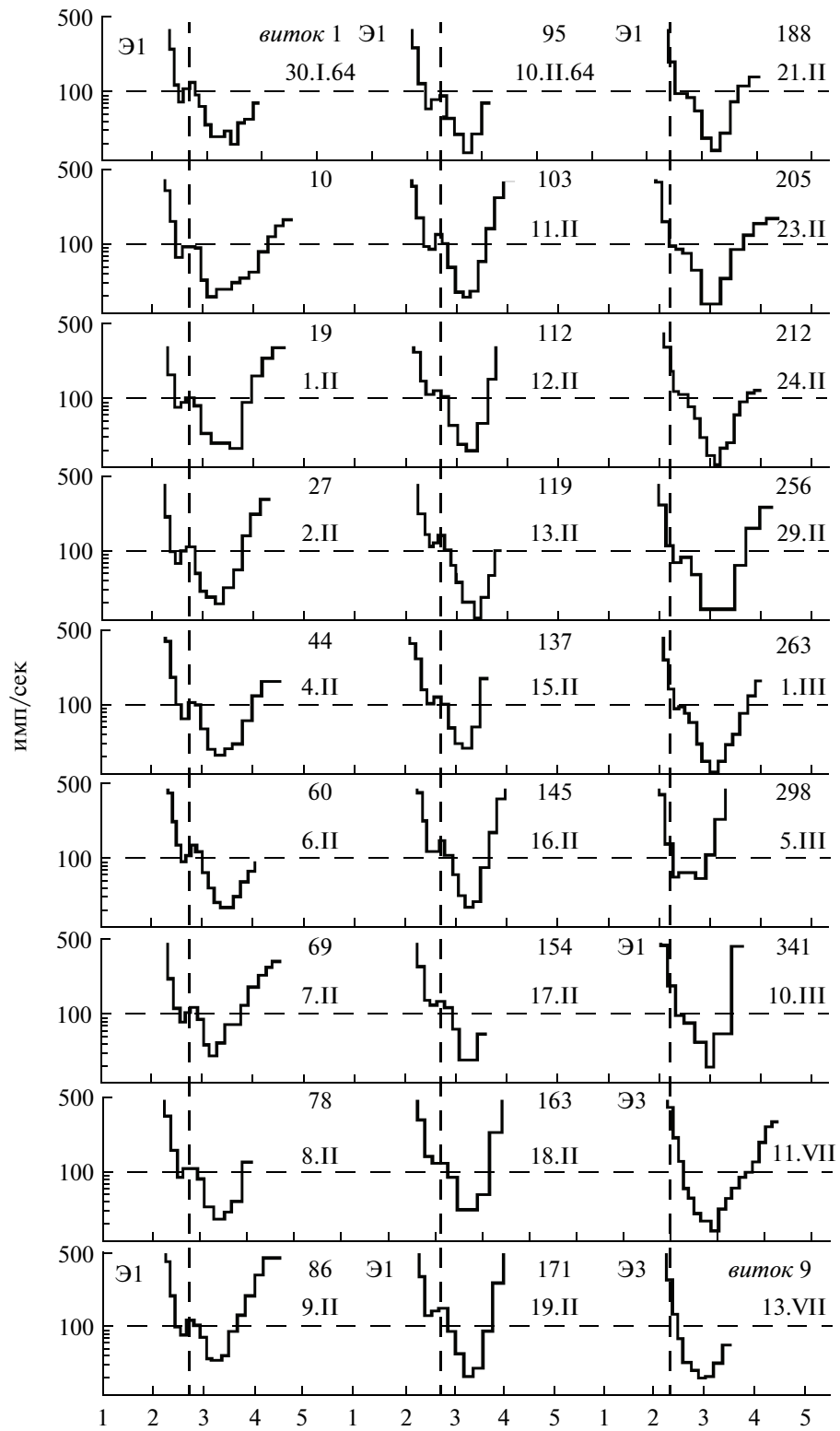


Рис. 2. Пояс энергичных электронов $E_e > 6$ МэВ по данным спутников ЭЛЕКТРОН-1 и ЭЛЕКТРОН-3. эффективный геометрический фактор детектора составлял около $1 \text{ см}^2 \text{ ср}$. Приведены номера витков орбит спутников ЭЛЕКТРОН и даты пролета через пояс энергичных электронов.

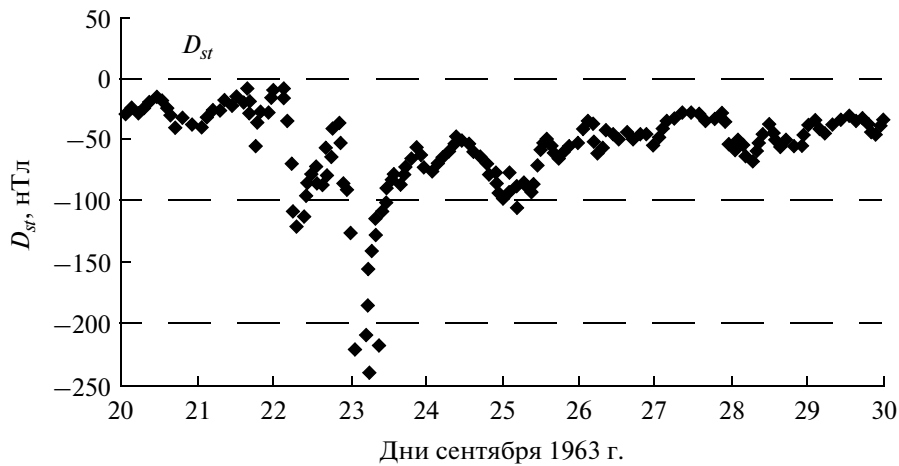


Рис. 3. Значения D_{st} для магнитной бури в сентябре 1963 г.

Запуск спутника *ЭЛЕКТРОН-3* на такую же орбиту, как и *ЭЛЕКТРОН-1* был осуществлен 11.VI.1964 г., т.е. спустя 3 месяца с небольшим после окончания работы спутника *ЭЛЕКТРОН-1*. К этому времени пояс энергичных электронов перестал существовать (см. рис. 2). Следовательно, полное время существования пояса составило от 5 до 8 месяцев. Отметим, что это был период очень спокойного состояния магнитосферы Земли, солнечная активность имела минимальный уровень, за это время произошло только две заметных вспышки на Солнце (28.X.1963, N12W24, мощность 3 и 16.III.1964, N05W73, мощность 1+), которые не создали значительного числа солнечных частиц, но вызвали умеренные магнитные бури 170 и 60 нТл. Первая из этих бурь также могла вызвать рост интенсивности релятивистских электронов.

Исчезновение пояса электронов происходило в результате постепенного уменьшения потока электронов из-за рассеяния их на электромагнитных волнах. По теории Тверского [2] превышение интенсивности электронов над критическим уровнем в зазоре между поясами приводит к генерации циклотронных волн, сбрасывающих избыток частиц в атмосферу. Этот же механизм привел к исчезновению пояса электронов на $L = 2.75$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ 2004 г.

2004 год также как и 1963–64 годы, был годом, предшествующий очередному минимуму солнечной активности. В 2004 году наблюдалось несколько мощных солнечных вспышек (апрель, июль, ноябрь) и достаточно мощных магнитных бурь, две из которых также привели к появлению пояса энергичных электронов на $L = 2.5–3$. Это бури в конце июля и в ноябре 2004 года. Анализ

динамики частиц во время этих бурь опубликован в работах [3] и [4] соответственно.

3.1. Магнитная буря 22–28.VII.2004 г. На рис. 4 приведены широтные (в зависимости от L) профили потоков электронов $E_e = 1.7$ по данным спутника *SERVIS-1* для различных моментов времени: до магнитной бури (4.VII), спустя две недели после начала бури (4.VIII), потом через месяц (4.IX) и еще через месяц (4.X). Все профили относятся к 3–5 числу указанного месяца. Форма профиля до начала бури практически совпадает с профилем в спокойные периоды солнечной активности, как, например, на рис. 1. Меньшие потоки электронов объясняются как большей энергией, так и значительно меньшей высотой полета КА *SERVIS-1* (круговая орбита на высоте 1000 км.). После бури сформировался совершенно другой профиль: поток электронов увеличился на большом диапазоне широт с максимумом на $L = 2.7–2.8$ и небольшим дополнительным максимумом на $L = 2.3$.

Через месяц максимум на $L = 2.7–2.8$ стал на порядок меньше, несколько сместившись к меньшим L . Этот процесс релаксации продолжался и через месяц и прекратился из-за новой бури, полностью изменившей конфигурацию пояса. Отметим, что по окончании этой новой бури возник еще один пояс электронов, о котором речь пойдет ниже. Небольшой пояс на $L = 2.3$ исчез, просуществовав не более месяца.

Временная картина появления энергичных электронов на внутренних магнитных оболочках ($L = 2.8$) представлена на рис. 5. На рисунке приведен поток электронов с энергией $E_e = 1.7$ МэВ, показано временное поведение D_{st} и потоков энергичных солнечных электронов ($E_e = 2.64–6.18$ МэВ) вне магнитосферы Земли по данным КА *SOHO* (прибор EPHIN).

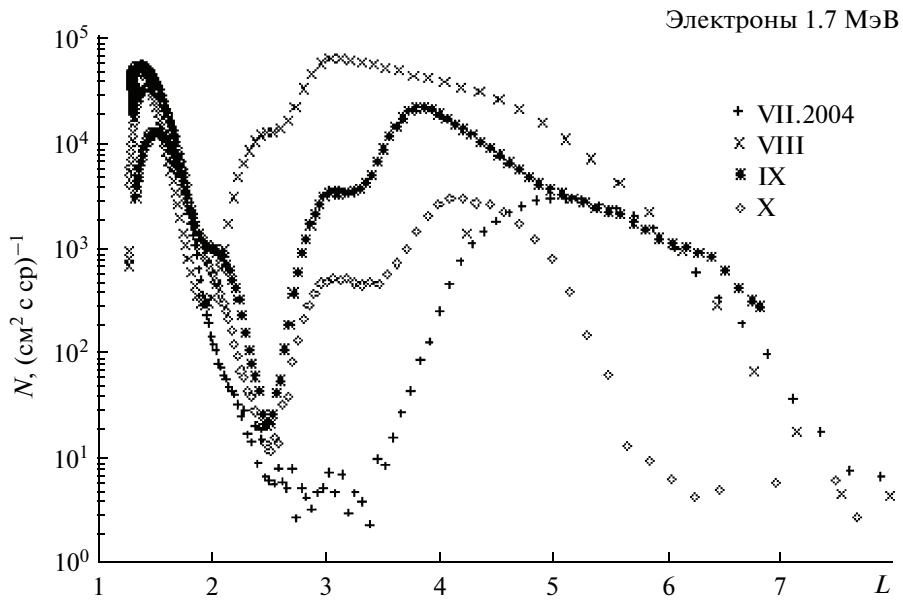


Рис. 4. Пространственные профили электронов на высотах 1000 км.

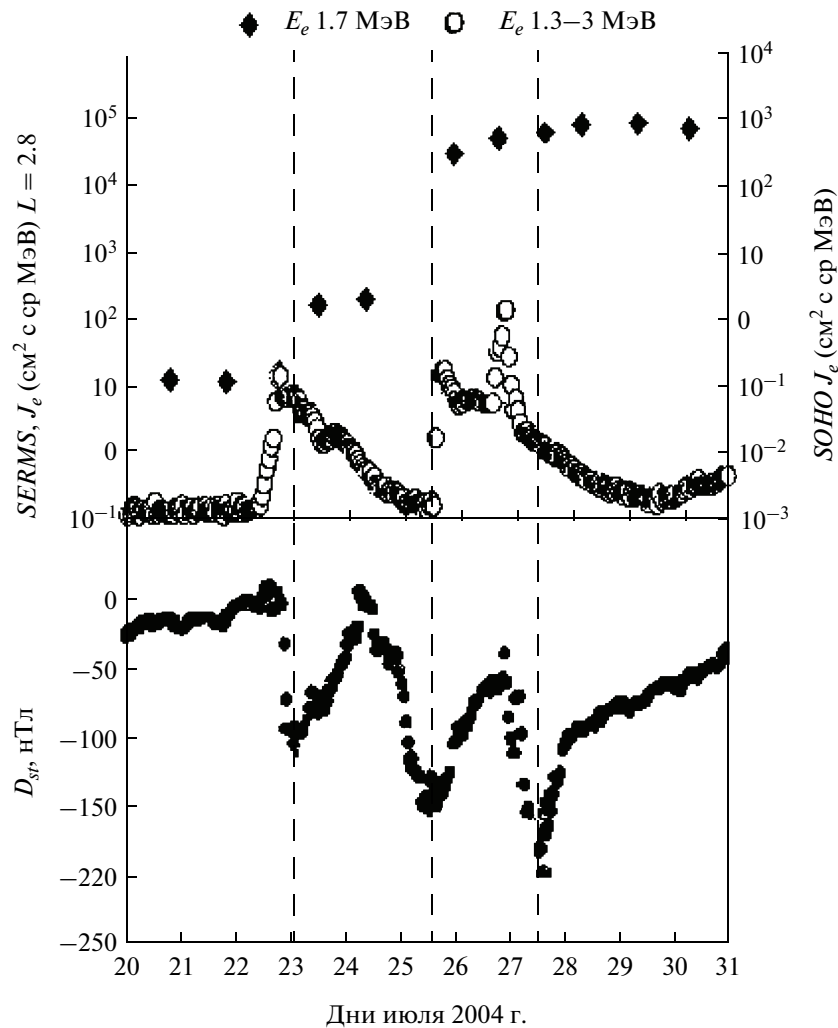


Рис. 5. Магнитная буря 22–28. VII.2004 г. Вертикальный пунктир – время максимального значения D_{st} для всех трех возмущений геомагнитного поля.

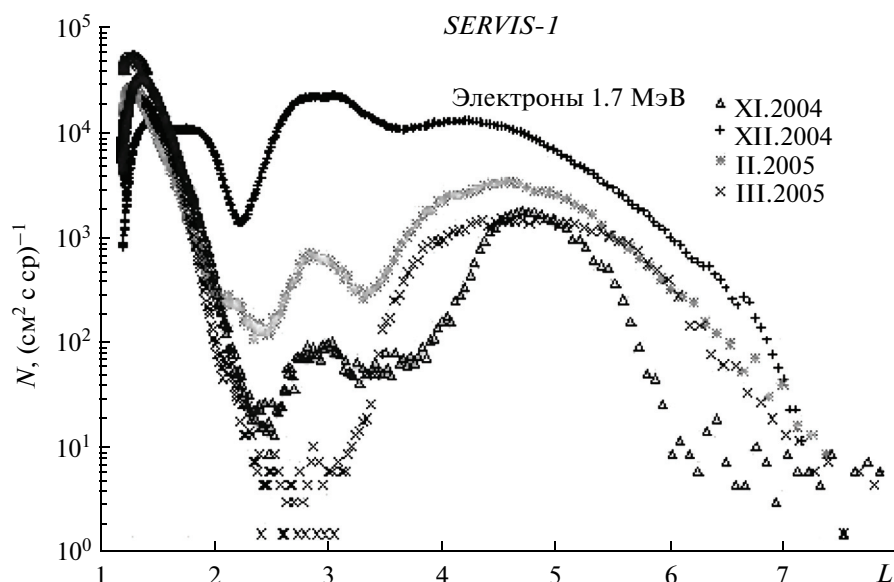


Рис. 6. Пространственные профили электронов на высотах 1000 км.

Обсуждение этих рисунков дает возможность утверждать, что в результате магнитной бури появился новый пояс электронов на очень близких к Земле магнитных оболочках, куда в результате “эффекта рогатки” электроны обычно не забрасываются. Значит происходит ускорение электронов в процессе развития бури, может быть главную роль играет тот факт, что буря была с тремя последовательными усилениями, каждое следующее более сильное, чем предшествующее. Обращает на себя внимание присутствие в максимуме D_{st} значительных потоков солнечных электронов достаточно высокой энергии (>2 МэВ), могущих играть роль инжектора частиц, которые затем доускоряются и перемещаются на внутренние магнитные оболочки.

3.2. Магнитная буря 7–12.XI.2004 г. На рис. 6 приведены пространственные (в зависимости от L) профили потоков электронов $E_e = 1.7$ для различных моментов времени: до магнитной бури (4.XI), спустя две недели после начала бури (4.XII), потом через два месяца (5.II) и еще через месяц (5.III). Все профили, также как и на предыдущем рисунке, относятся к 3–5 числу указанного месяца. Форма профиля в ноябре до начала бури совпадает с профилем, имевшим место через 4 месяца после июльской бури (ср. с профилем 4.X на рис. 4). Затем новая буря резко усилила поток электронов, правда максимум потока, в данном случае, оказался более протяженным и расположенном на больших $L = 2.8–3.2$ (профиль 4.XII). Следующий профиль демонстрирует форму профили почти через три месяца после начала бури. К этому времени максимум пояса стал более острым, а поток электронов уменьшился на 1.5 по-

рядка. Грубая оценка характеристического времени τ жизни электронов в поясе за этот период приводит к значению τ более 20 суток ($J(t) = J_0 \exp(-t/\tau)$). Еще через месяц к 1.III.2005 г. пояс электронов практически исчез.

Временная картина появления энергичных электронов на внутренних магнитных оболочках ($L = 2.8$) во время ноябрьской бури 2004 г. представлена на рис. 7. На рисунке приведен поток электронов с энергией $E_e = 1.7$ МэВ на магнитной оболочке $L = 2.8$, показано временное поведение D_{st} и потоков энергичных солнечных электронов ($E_e = 2.64–6.18$ МэВ) вне магнитосферы Земли по данным прибора ERNIN КА SOHO.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные примеры показывают, что возникновение поясов энергичных электронов на внутренних оболочках в магнитосфере Земли является достаточно регулярным эффектом, связанным с магнитными бурями. Возникшие во время бурь пояса энергичных электронов существуют достаточно долгое время, достигающее полугода и более. В 1964 году этот пояс был зарегистрирован спустя 4 месяца после бури и существовал еще не менее месяца. В 2004 году временное поведение возникших поясов энергичных электронов удается проследить, так как измерения продолжались до марта 2005 года. На рис. 8 приведена развертка потоков электронов с энергией 0.3, 1.7, 3.4 и 6.6 МэВ на магнитной оболочке $L = 2.8 \pm 0.2$ с декабря 2003 по февраль 2005 гг.

Обращают на себя внимание несколько последовательных возрастаний потоков электронов,

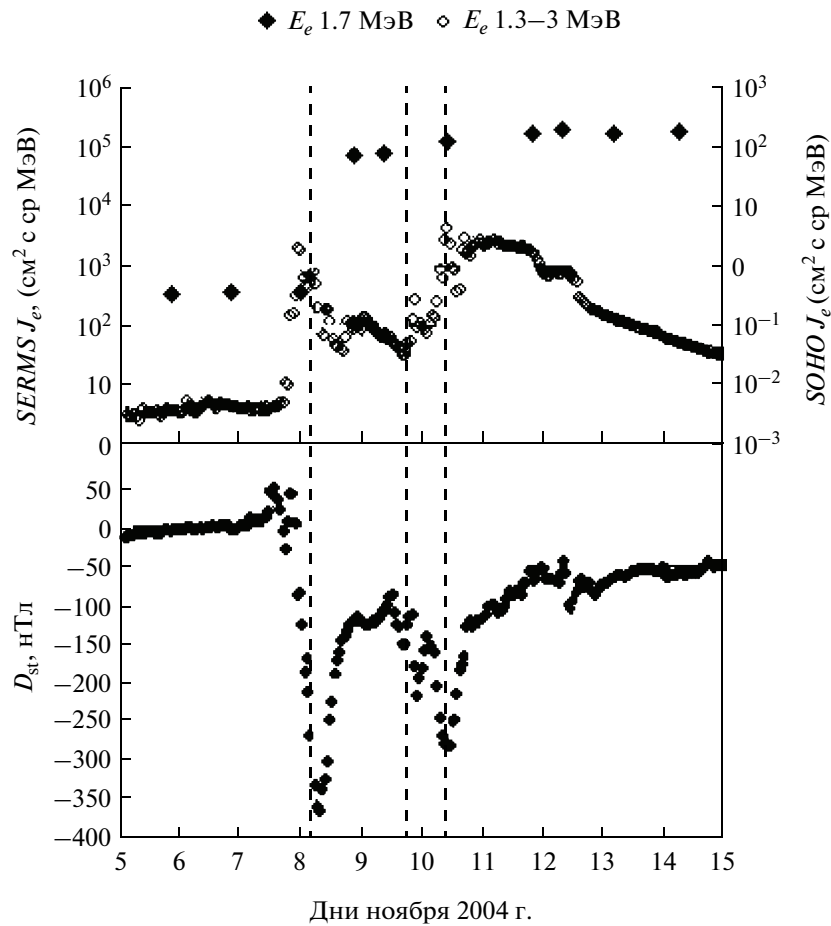


Рис. 7. Магнитная буря 7–12.XI.2004 г.

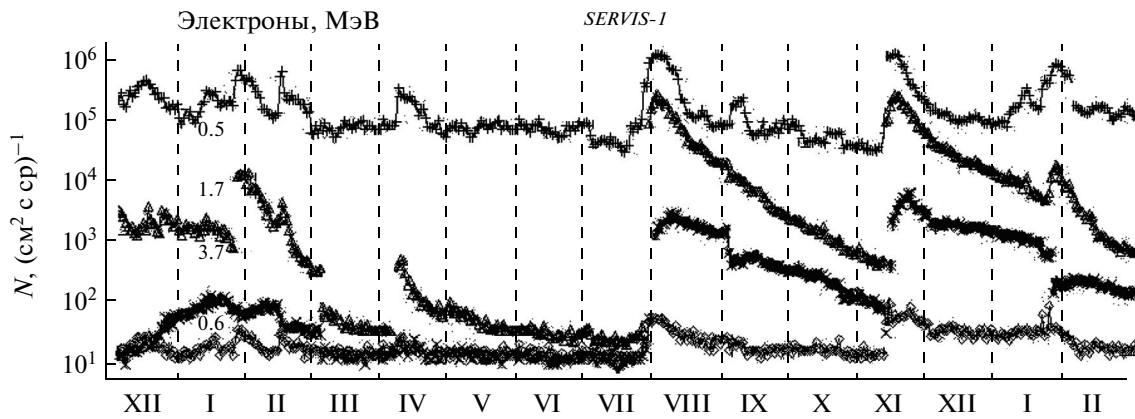


Рис. 8. Временные профили потоков электронов на $L = 2.8 \pm 0.2$.

особенно яркими из которых представляются потоки электронов с энергией $E_e = 1.7$ МэВ. Они имеют наибольшую амплитуду, плавное, близкое к экспоненциальному, уменьшение потока со временем. Если аппроксимировать эти спады функцией $J(t) = J_0 \exp(-t/\tau)$, то характеристиче-

ское время спада оказывается практически одинаковым для всех пяти зарегистрированных последовательных событий (в январе-феврале, апреле, июле-августе, ноябре 2004 г. и январе-феврале 2005 г.): $\tau = 9, 8, 8, 8$ и 8 суток, причем для последних трех событий эти значения относятся к

первой фазе спада. Спустя приблизительно 20 суток скорость спада резко замедляется и составляет $\tau = 22, 20$ и 20 суток для последних трех, наиболее длительных событий. Для первых двух событий спад был коротким и до второй, медленной фазы спада дело не дошло.

Ускорение электронов до релятивистских энергий во время магнитных бурь — факт известный давно и широко обсуждаемый в теоретических и модельных работах, в частности в связи с проблемами космической погоды. Вместе с тем, основной экспериментальный материал относится к внешней магнитосфере, к измерениям на геостационарной орбите. Ускорение на внутренних оболочках, да еще на таких глубоких, на $L < 3$, остается недостаточно исследованным.

Обсудим возможные причины возникновения поясов энергичных электронов на внутренних магнитных оболочках ($L < 3$) в магнитосфере Земли. Мы видим по крайней мере четыре возможности.

1. Локальное ускорение в результате взаимодействия с ОНЧ-волнами. Этот механизм подробно исследован теоретически (см обзор [5] и цитируемые там работы) и работает преимущественно на внешних дрейфовых оболочках. В районе $L = 2.75$ не регистрируются электромагнитные волны достаточной мощности, да и исходный для ускорения поток электронов в провале очень мал.

2. Ускорение посредством радиальной диффузии, то, что в шестидесятые года называлось эффектом “рогатки”. Быстрый радиальный перенос может возникать при вытягивании во время бури силовых линий магнитного поля в хвост магнитосферы, с захватом на них авроральных электронов и при последующем возвращении поля в дипольное состояние, что обеспечивает перенос частиц на внутренние оболочки. Сохранение 1 и 2 инвариантов в этом процессе дает дополнительное ускорение электронов. Такой процесс может работать во время суббури. Так как пояс на $L < 3$ возникает только во время магнитных бурь, вероятно для его возникновения необходим сдвиг суббури активности на более низкие широты, который и обеспечивает магнитная буря.

3. В принципе сильный импульс индукционного магнитного поля, необходимый для быстрого радиального переноса частиц, может создаваться и солнечным ветром, например, в момент SC. Такой эффект был зарегистрирован в начале магнитной бури 24.III.1991 года на спутнике CRRES [6]. Однако во время магнитных бурь 2004 года образование пояса на $L = 2.75$ произошло не в начале бури, а на фазах восстановления.

4. Солнечные электроны от ближайшей вспышки могут быть захвачены в магнитосфере и послужить источником нового пояса. Как видно из приведенного выше анализа и рисунков 5 и 7, потока солнечных электронов не хватает, необходимо дополнительное их ускорение.

Из рассмотренных возможностей мы отдаем предпочтение п. 2, т.е. ускорению электронов за счет радиального переноса, который обеспечивается сдвинутой к средним широтам суббуриевой активностью.

ВЫВОДЫ

Главный вывод статьи можно сформулировать следующим образом: результаты экспериментов, разнесенные по времени на 40 лет, говорят о постоянстве источников частиц радиационных поясов Земли и протекающих в магнитосфере процессов, что обеспечивает не только существование самих поясов радиации, но и повторяемость различных экзотических явлений в поясах, подобных поясу энергичных электронов на внутренних магнитных оболочках.

Авторы благодарят проф. Н. Хасебе за предоставленные результаты по спутнику *SERVIS-1*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернов С.Н., Чудаков А.Е., Вакулов П.В. и др. Результаты исследования геометрического расположения и состава частиц радиационных поясов по данным спутников “Электрон-1” и “Электрон-2”. Исследование космического пространства М.: Наука, 1965. С. 394–405.
2. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 1968.
3. Kuznetsov S.N., Lazutin L.L., Panasyuk M.I. et al. Solar particle dynamics during magnetic storms of July 23–27, 2004 // J. Adv. Space Res. 2008. doi: 10.1016/j.asr.2008.09.014
4. 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 аэрномия. 2010. Т. 50. № 2. С. 176–188.
5. Shprits Yu.I., Subbotin D.A., Meredith N.P., Elkington S.R. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: Local acceleration and loss // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. V. 70. P. 1694–1713.
6. Blake J.B., Kolasinski W.A., Fillius R.W., and 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.