

СТРУКТУРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ И ДИНАМИКА ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ РАДИАЦИИ В ПЕРИОД МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В 2007 Г. И 2009 Г.

И.П. Безродных, Е.И. Морозова, А.А. Петрукович
(ИКИ РАН)

М.Н. Будяк, М.В. Кожухов, А.А. Мусалитин, В.Т. Семёнов
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Введение

Возможности длительной эксплуатации оборудования на спутниках тесно связаны с динамикой потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ), увеличение радиационных нагрузок может приводить к нарушениям работы электронных систем: появлению поверхностных токов и возникновению спонтанных электрических разрядов. Структура потоков электронов ВРПЗ формируется под влиянием целого ряда конкурирующих процессов транспортировки, ускорения и потерь частиц, которые возникают внутри магнитосферы и на ее границах при воздействии солнечного ветра (СВ). Значительные вариации потоков электронов ВРПЗ, связанные с перестройкой структуры потоков СВ, вызывают значительные изменения структуры энергетических спектров электронов ВРПЗ, что приводит к изменению радиационных дозовых нагрузок для аппаратуры на космических аппаратах. В работе анализируется динамика энергетических спектров электронов ВРПЗ для периода минимума солнечной активности 23-го солнечного цикла в 2007 г. и в 2009 г. и показано влияние двух различных источников СВ на формирование потоков электронов ВРПЗ, высокоскоростных и медленных потоков СВ. В 2007 г. рекуррентные потоки СВ со скоростью >500 км/с наблюдались ~ 30 % времени, средняя скорость СВ составила ~ 440 км/с. В 2009 г. потоки СВ со скоростью < 400 км/с наблюдались ~ 75 % времени, средняя скорость СВ составила 364 км/с [1]. В работе подробно для каждого из 30 возрастаний потоков электронов в 2007 г., вызванных высокоскоростными потоками СВ, анализируется временная динамика и структура энергетических спектров электронов ВРПЗ (диапазон энергии 21 кэВ – 2 МэВ, данные спутников LANL). Анализ полученных результатов указывает на различие механизмов (как суммарного эффекта комплекса конкурирующих процессов ускорения, потерь и транспортировки частиц), ответственных за возрастание потоков низкоэнергичных и релятивистских электронов. Увеличение скорости СВ сопровождается значительным повышением потока электронов малых энергий < 300 кэВ (спектр становится более мягким) – эффективность механизма падает при увеличении энергии частиц. Структура энергетического спектра электронов > 600 кэВ указывает на преимущественное повышение интенсивности высокоэнергичных частиц (спектр становится более жестким) – с увеличением энергии электронов повышается эффективность механизма формирования потоков релятивистских электронов (при этом время достижения максимальной интенсивности частиц увеличивается с увеличением энергии частиц). Отметим, что минимальная эффективность обоих механизмов наблюдается для диапазона энергий электронов ~ 200 – 400 кэВ (для этого диапазона энергий отмечаются минимальные вариации потоков частиц при изменениях скорости СВ). Наши результаты указывают на двухэтапный механизм формирования потоков релятивистских электронов ВРПЗ, такой концепции в настоящее

время придерживается большинство исследователей [2, 3]. В 2009 г., по сравнению с 2007 г., интенсивность потоков электронов уменьшается для всего рассматриваемого диапазона энергий, существенно меняется и структура энергетических спектров: уменьшение интенсивности зависит от энергии частиц, что приводит к значительному уменьшению относительного содержания в спектре числа релятивистских частиц. В работе вычисляются среднегодовые радиационные нагрузки для 2007 г. и 2009 г. и показано существенное отличие суточной дозовой нагрузки для зарегистрированных в 2007 г. максимальных потоков электронов от среднегодовой суточной дозовой нагрузки.

Результаты обработки экспериментальных данных

В работе использована следующая база данных: данные за 2007–2009 гг. по параметрам СВ взяты с сайта [4]; данные за 2007–2009 гг. для потоков электронов 24,1 кэВ – 2 МэВ (13 энергетических каналов), полученные на спутниках серии LANL на геостационарной орбите, взяты с сайта [5].

На рис. 1 (для первых 90 дней 2007 г.) и на рис. 2 (для первых 90 дней 2009 г.) представлены временные профили потоков электронов (диапазон энергии 24,1 кэВ – 2000 кэВ, 13 энергетических каналов, данные спутника LANLGEО) и показана временная структура скорости СВ.

Далее мы подробно рассмотрим структуру потоков ВРПЗ, сформированных в 2007 г. при воздействии высокоскоростных потоков СВ. На графике (рис. 1) отлично просматривается тесная связь возрастных потоков электронов с появлением 10 высокоскоростных потоков СВ. В 2007 г. можно выделить 30 достаточно изолированных возрастных (событий) потоков электронов, вызванных высокоскоростными потоками СВ. Отметим сильные вариации величин потоков для различных событий, наиболее значительные для энергий электронов >1 МэВ. Вариации потоков электронов ВРПЗ отражают сложный динамический баланс между конкурирующими процессами транспортировки, ускорения и потерь частиц, которые формируются в магнитосфере при воздействии солнечного ветра [6, 7].

На рис. 3 в качестве примера динамики энергетических спектров при воздействии высокоскоростного потока СВ ($V=660$ км/с) приведена последовательность энергетических спектров электронов в событии 15–26 января 2007 г.

На рис. 3 показаны энергетические спектры электронов для нескольких периодов: для 15 января (минимум потока электронов ≥ 1 МэВ – черный цвет), для 18 января (максимум потока электронов 24,1 кэВ – красный цвет), для 21 января (максимум потока электронов 925 кэВ – зеленый цвет) и для 26 января (максимум потока 2000 кэВ – коричневый). В этом событии увеличение потоков низко-энергичных электронов совпадает с максимумом скорости СВ (17 января), потоки электронов с энергией 31,7 кэВ, 127 кэВ и 270 кэВ возрастают соответственно \sim в 2, 1,7 и 1,3 раза, в это же время начинают увеличиваться потоки электронов с энергией ≥ 407 кэВ. Скорость нарастания потоков увеличивается с увеличением энергии частиц, например, для энергий электронов 407 кэВ, 925 кэВ и 2 МэВ потоки за сутки (с 16 до 17 января) увеличиваются соответственно \sim в 1,6, 4,5 и 30 раз. Максимальные величины потоков электронов < 200 кэВ (максимум инъекции) наблюдаются спустя сутки (18 января) после максимума скорости СВ (17 января). Такая динамика энергетических спектров электронов ВРПЗ достаточно типична для возрастных, формируемых в магнитосфере при воздействии высокоскоростных потоков. Следует отметить различие в механизмах формирования низко-энергичных < 300 кэВ электронов (эффективность механизмов падает с увеличением энергии) и электронов > 400 кэВ (эффективность повышается с увеличением энергии).

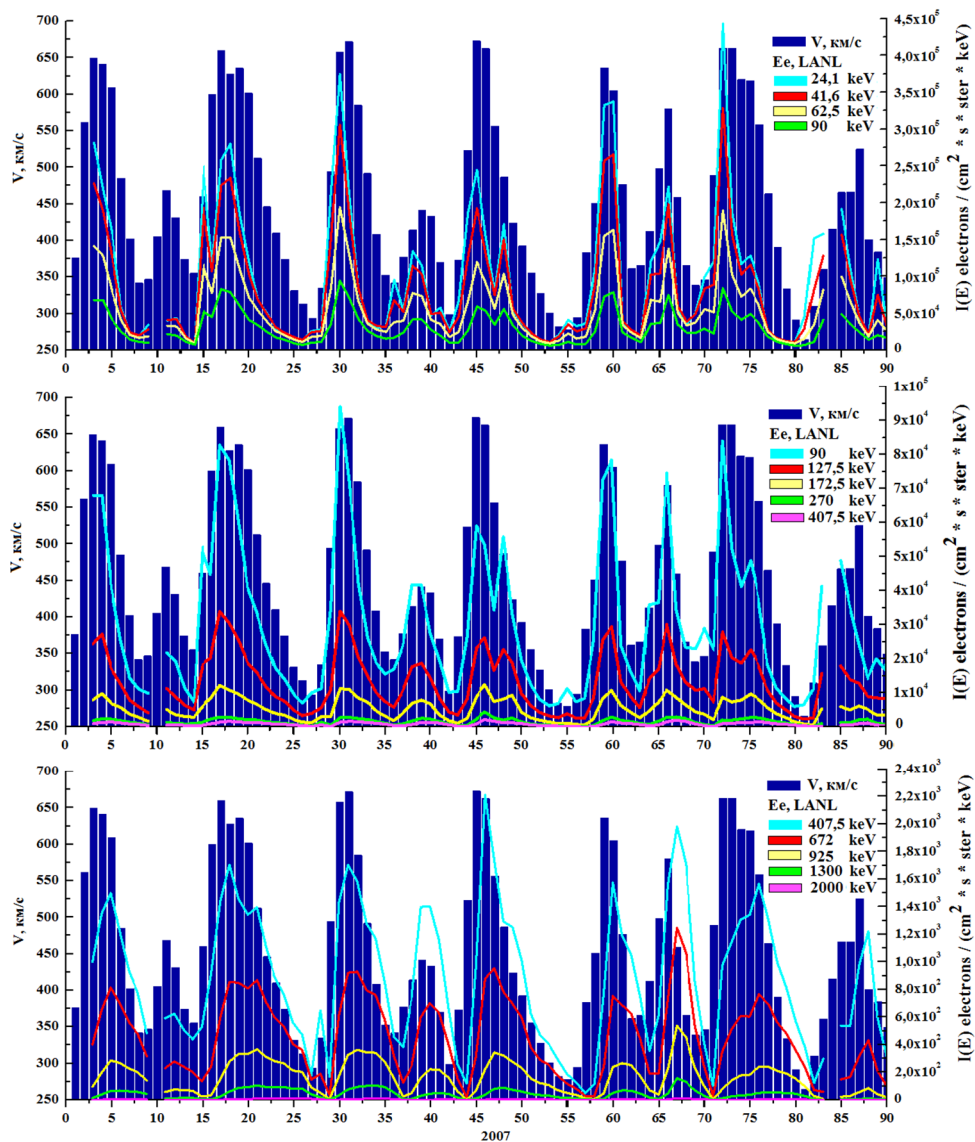


Рис. 1. Динамика потока электронов для 13 энергетических каналов электронов от 24,1 кэВ до 2 МэВ и скорости СВ для первых 90 дней 2007 г. Цветная маркировка каналов указана на панелях

Характерной особенностью временной структуры возрастных явлений является зависимость моментов регистрации максимальных потоков частиц от энергии электронов. Удобно рассмотреть времена задержки регистрации максимальных потоков относительно момента регистрации максимальных потоков низкоэнергичных электронов (максимума инжекции). На рис. 4 для всех возрастных потоков электронов в 2007 г. представлено распределение моментов задержки (единица измерения – сутки) максимальных потоков электронов с энергией 407 кэВ, 925 кэВ, 1,3МэВ и 2 МэВ относительно времени регистрации максимальных потоков электронов с энергией 24,1 кэВ.

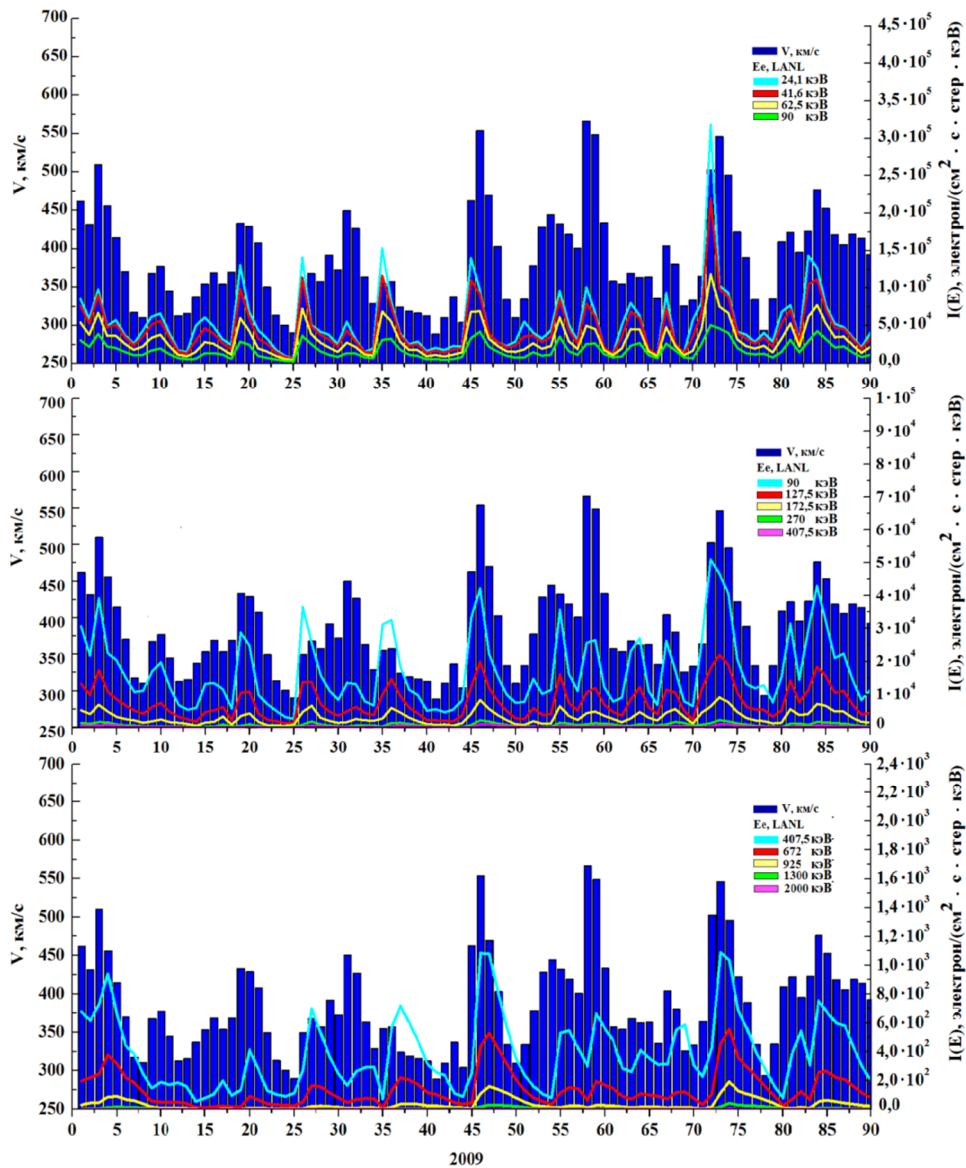


Рис. 2. Динамика потока электронов для 13 энергетических каналов электронов от 24,1 кэВ до 2 МэВ и скорости СВ для первых 90 дней 2009 г. Цветная маркировка каналов указана на панелях

Сравнивая типы распределений потоков электронов разных энергий, можно выделить некоторые закономерности: максимумы распределений потоков электронов 407 кэВ и ≥ 925 кэВ соответствуют задержкам относительно максимума инжекции 1-м и 2-м суткам; с увеличением энергии частиц распределения сдвигаются к большим задержкам, при увеличении энергии частиц значительно увеличивается процент задержек ≥ 4 суткам.

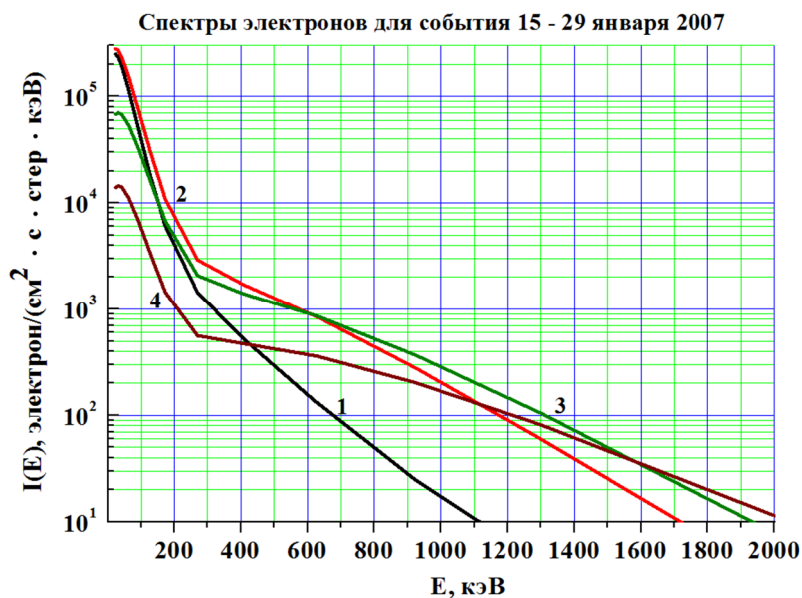


Рис. 3. Динамика энергетических спектров электронов для события 15–26 января 2007 г.:
 1 – спектр 15 января (минимум потока электронов 925 кэВ); 2 – спектр 18 января
 (максимум инъекции – максимум потоков электронов < 200 кэВ); 3 – спектр 21 января
 (максимумы потоков электронов 925 кэВ и 1,3 МэВ); 4 – спектр 26 января
 (максимум потока электронов 2 МэВ)

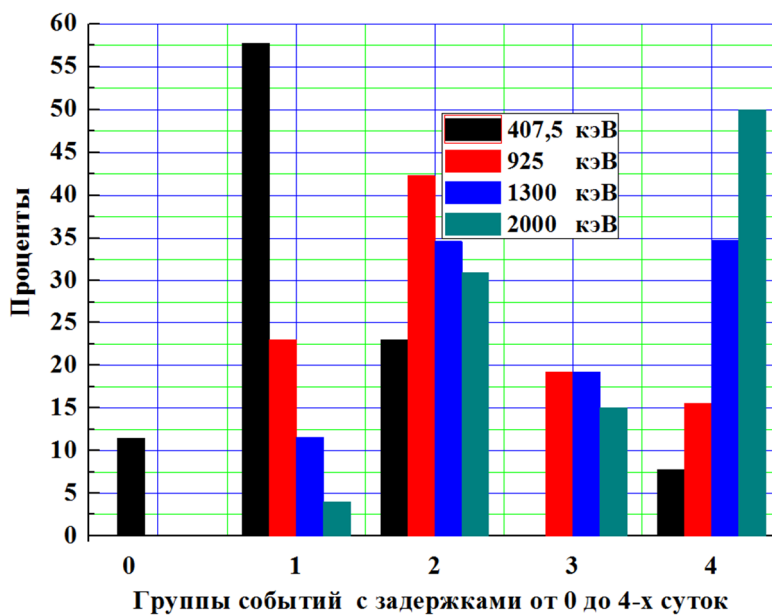


Рис. 4. Распределение времени задержки (%) максимальных потоков электронов 407,5 кэВ, 925 кэВ, 1300 кэВ и 2000 кэВ относительно максимума инъекции (момента регистрации максимальных потоков электронов для энергий <200 кэВ)

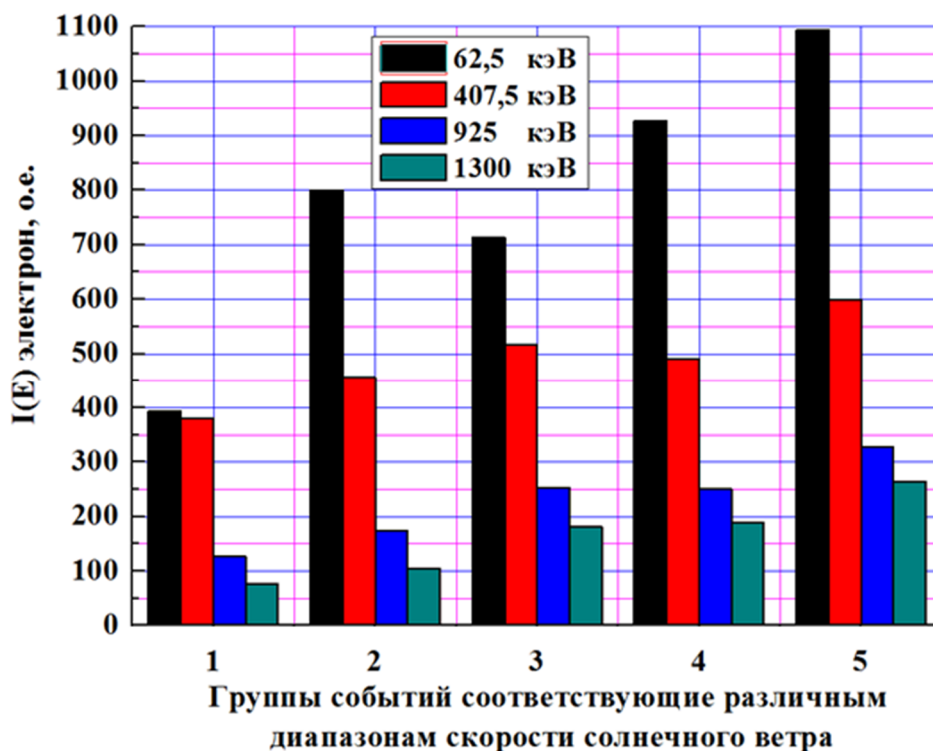


Рис. 5. Зависимость интенсивности (о. е.) потоков электронов 62,5 кэВ, 407,5 кэВ, 925 кэВ и 1,3 МэВ для пяти диапазонов скорости СВ: 400–499 км/с – 1, 500–550 км/с – 2, 551–600 км/с (Kp=24) – 3, 601–650 км/с (Kp=22,5) – 4 и >650 км/с – 5. Цветные маркеры указаны на графике

Энергетические спектры электронов, построенные по максимальным потокам частиц каждой энергии, и времена задержки регистрации максимальных потоков относительно максимума инжекции являются основными параметрами для анализа структуры возрастных потоков. Для всех событий 2007 г. при оценке влияния скорости солнечного ветра на интенсивность потоков частиц была сделана выборка величин максимальных потоков в каждом диапазоне энергий для пяти диапазонов скорости СВ: 400–499 км/с, 500–550 км/с, 551–600 км/с, 601–650 км/с и >650 км/с.

На рис. 5 представлены распределения интенсивности электронов для энергий 62,5 кэВ, 407,5 кэВ, 925 кэВ, 1,3 МэВ для пяти диапазонов скорости СВ: 400–499 км/с, 500–550 км/с, 551–600 км/с, 601–650 км/с и >650 км/с. Отметим, что при увеличении скорости СВ от 525 км/с до скоростей ≥ 650 км/с наиболее значительные возрастания потоков регистрируются для энергий электронов ≥ 1 МэВ. Для энергий 407,5 кэВ, 925 кэВ, 1,3 МэВ и 2 МэВ потоки увеличиваются соответственно в 1,3, 1,9, 2,5 и 7,6 раз. Это означает, что эффективность механизмов формирования потоков релятивистских частиц повышается при увеличении скорости СВ. Следует отметить, что нет прямой зависимости интенсивности потоков электронов от состояния магнитосферы и параметров СВ, что указывает на значительное разнообразие типов и мощности процессов, реализуемых при формировании потоков частиц в отдельных событиях. Например, при близких значениях скорости СВ (584 и 566 км/с) и близких среднесуточных величинах Kp-индекса (25 и 26 при МИ)

максимальные потоки релятивистских электронов в событиях 6–8 марта 2007 г. и 14–16 июня 2007 г. отличаются на порядок (отношение максимальных потоков для 925 кэВ, 1300 кэВ и 2000 кэВ равны соответственно ~ 6, 13 и 54). Отметим, увеличение потоков релятивистских электронов не всегда более значительное при большей скорости СВ. Например, при равных значениях Kp -индекса (~ 30) потоки релятивистских электронов 2000 кэВ при скорости СВ $V=602$ км/с ~ в 1,7 раз выше (событие 31 марта – 6 апреля 2007 г.), чем при скорости $V=660$ км/с (событие 15 – 26 января 2007 г.). Интересно сравнить влияние определенных структур СВ на формирование энергетических спектров потоков электронов ВРПЗ и, в частности, сравнить энергетические спектры потоков электронов ВРПЗ, сформированные в 2007 г., в основном при воздействии рекуррентных высокоскоростных потоков СВ, и спектры, сформированные в 2009 г. в отсутствие высокоскоростных потоков при чрезвычайно низких величинах скорости СВ.

На рис. 6 представлена структура энергетических спектров электронов в 2007 г. и 2009 г.: 1 – средний спектр потоков электронов в 2007 г.; 2 – средний спектр при минимальных потоках 925 кэВ электронов для 2007 г.; 3 – средний спектр потоков электронов в 2009 г.; 4 – спектр максимальных потоков для самого значительного возрастания потоков в событии 31 марта – 6 апреля 2007 г. ($V=602$ км/с).

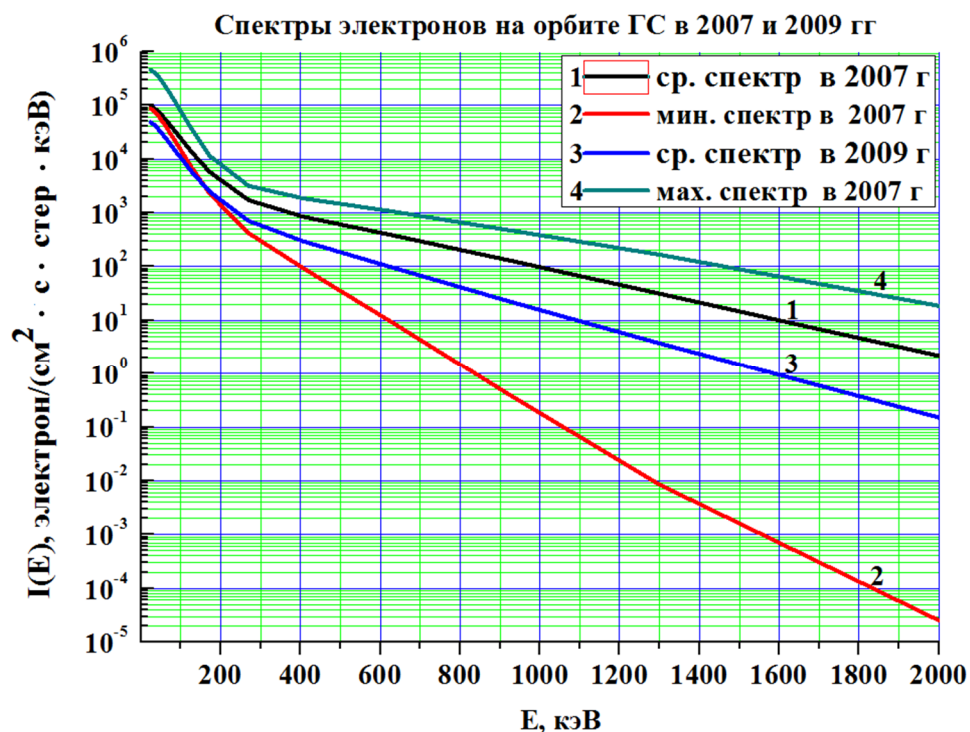


Рис. 6. Структура энергетических спектров электронов в 2007 г. и 2009 г.: 1 – средний спектр потоков электронов в 2007 г.; 2 – средний спектр при минимальных потоках 925 кэВ электронов для 2007 г.; 3 – средний спектр потоков электронов в 2009 г.; 4 – спектр максимальных потоков для самого значительного возрастания потоков в событии 31 марта – 6 апреля 2007 г. ($V=602$ км/с)

Потоки электронов, сформированные при воздействии высокоскоростного потока со скоростью 602 км/с (спектр 4), значительно выше средних величин (спектр 1) потоков для 2007 г. Отношение потоков для энергий 31,7 кэВ, 270 кэВ, 407,5 кэВ, 925 кэВ и 2 МэВ соответственно равно ~ 4,7, 1,8, 2,2, 3,7 и 8,6 раз. Это означает, что механизмы формирования структуры энергетических спектров электронов при воздействии высокоскоростных потоков значительно отличаются для энергий электронов < 200 кэВ (с увеличением энергии электронов эффективность механизмов понижается) и энергий > 400 кэВ (с увеличением энергии электронов повышается эффективность механизмов, что приводит к преимущественному повышению потока релятивистских электронов). Следует отметить, что для энергий ~ 300–400 кэВ регистрируются минимальные вариации потоков при изменении скорости СВ. В 2009 г. фиксируется значительное уменьшение интенсивности электронов всех энергий. По сравнению с 2007 г. средние потоки частиц для энергий < 200 кэВ, 407,5 кэВ, 925 кэВ и 2000 кэВ уменьшились соответственно ~ в 2,2, 2,8, 5,8 и 14,5 раз. В 2009 г. зарегистрированы на ГСО орбите самые низкие за все время наблюдений (два солнечных цикла) потоки релятивистских электронов ≥ 2000 кэВ [8]. Такое «опустошение» электронных потоков ВРПЗ связано с чрезвычайно низкими величинами межпланетного магнитного поля (~ 4 нТ) и скорости СВ (~ 364 км/с), что привело к чрезвычайно низкой геомагнитной активности (Kp -индекс = 8,99; Dst -индекс = -2,9), значительному уменьшению числа и мощности суббурь и ослаблению магнитосферной конвекции [9].

Следует отметить, что возможности длительной эксплуатации оборудования на спутниках тесно связаны с динамикой потоков электронов ВРПЗ, увеличение радиационных нагрузок может приводить к нарушениям работы электронных систем и возникновению спонтанных электрических разрядов [10, 11].

Сравним дозовые радиационные нагрузки при потоках электронов ВРПЗ, представленных спектрами на рис. 6., для спектров средних потоков электронов в 2007 г. и 2009 г. и для спектра максимальных потоков в 2007 г. Для диапазона энергий электронов 24,1 кэВ – 2000 кэВ годовая поглощенная доза в 2007 г. равна $\approx 1,75 \cdot 10^8$ рад, в 2009 г. равна $\approx 8,13 \cdot 10^7$ рад. Увеличение почти в 2 раза дозовой нагрузки в 2007 г. определяются возрастанием потока низкоэнергичных электронов ≤ 400 кэВ. Поглощенная годовая доза для диапазона энергий 24,1–400 кэВ составляет соответственно $\approx 1,73 \cdot 10^8$ рад и $\approx 8,07 \cdot 10^7$ рад в 2007 г. и в 2009 г. Преимущественная генерация электронов с энергией > 400 кэВ при воздействии высокоскоростных потоков СВ нашла отражение в значительном увеличении годовой дозы (в 3,8 раза) для диапазона энергий электронов 400–2000 кэВ ($\approx 2,49 \cdot 10^6$ рад в 2007 г. и $\approx 6,56 \cdot 10^5$ рад в 2009 г.). Интересно сравнить величины суточной поглощенной дозы для максимальных потоков электронов 2007 г. (спектр 4, рис. 6) со среднегодовыми суточными значениями (спектр 1, рис. 6). Для диапазона энергий электронов 24,1–400 кэВ максимальная величина составляет $\sim 1,94 \cdot 10^6$ рад/сутки, средняя для 2007 г. $\sim 4,74 \cdot 10^5$ рад/сутки (увеличение ~ в 4,1 раза), для диапазона 400–2000 кэВ максимальная величина составляет $\sim 2 \cdot 10^4$ рад/сутки, средняя $\sim 6,82 \cdot 10^3$ рад/сутки (увеличение ~ в 2,9 раза).

Основные результаты

В работе представлены результаты исследования структуры энергетических спектров электронов ВРПЗ в период минимума солнечной активности в 2007 г. и в 2009 г. Рассмотрена динамика энергетических спектров отдельно для каждого из 30 возрастных потоков электронов, сформированных в 2007 г. при воздействии высокоскоростных потоков СВ. Анализ полученных результатов указывает на различие механизмов (как суммарного эффекта комплекса конкурирующих процессов ускорения, потерь и транспортировки частиц), ответственных за возрастание потоков

низкоэнергичных и релятивистских электронов. Показано, что реакция на возрастание скорости СВ значительно отличается для энергий электронов $< 200\text{--}300$ кэВ и энергий электронов > 400 кэВ, что нашло отражение в структуре и временной динамике энергетических спектров для этих энергий. Для энергий $< 200\text{--}300$ кэВ увеличение потока электронов начинается при увеличении скорости СВ, максимальные потоки частиц (максимум инжекции) достигаются в пределах суток относительно максимума скорости СВ. Возрастание потоков релятивистских электронов продолжается достаточно долго, задержка максимумов потоков частиц относительно максимума инжекции составляет в среднем $\sim 2\text{--}3$ -е суток. Следует отметить значительное отличие в зависимости от энергии частиц эффективности этих механизмов. Для электронов $< 200\text{--}300$ кэВ увеличение скорости СВ сопровождается значительным повышением потока электронов малых энергий < 50 кэВ (спектр становится более мягким) – эффективность механизма падает при увеличении энергии частиц. Структура энергетического спектра электронов > 600 кэВ указывает на преимущественное повышение интенсивности высокоэнергичных частиц (спектр становится более жестким) – с увеличением энергии электронов повышается эффективность механизма формирования потоков релятивистских электронов (при этом время достижения максимальной интенсивности частиц увеличивается с увеличением энергии частиц). Отметим, что минимальная эффективность обоих механизмов наблюдается для диапазона энергий электронов $\sim 200\text{--}400$ кэВ (для этого диапазона энергий отмечаются минимальные вариации потоков частиц при изменениях скорости СВ). Наши результаты указывают на двухэтапный механизм формирования потоков релятивистских электронов ВРПЗ, такой концепции придерживается в настоящее время большинство исследователей [2, 3].

Для сравнения влияния рекуррентных высокоскоростных потоков СВ на формирование структуры потоков электронов СВ в работе проведен анализ среднегодовых энергетических спектров электронов для 2007 г. и 2009 г.

Таблица среднегодовых и среднесуточных величин поглощенной дозы

СРЕДНЕГОДОВАЯ ДОЗА, рад/год			СРЕДНЕСУТОЧНАЯ ДОЗА, рад/сутки		
Период	Диапазон энергии электронов		Период	Диапазон энергии электронов	
	24,1–400 кэВ	400–2000кэВ		24,1–400 кэВ	400–2000кэВ
2007	$1,73 \cdot 10^8$	$2,49 \cdot 10^6$	2007	$4,74 \cdot 10^5$	$6,82 \cdot 10^3$
2009	$8,07 \cdot 10^7$	$6,56 \cdot 10^5$	Для макс. потоков	$1,94 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^4$

В 2007 г. средняя структура спектров формируется как суммарный эффект 30 возрастных потоков электронов при воздействии рекуррентных высокоскоростных потоков СВ (потоки СВ со скоростью > 500 км/с наблюдались ~ 30 % времени). В 2009 г. средняя структура спектров сформирована при чрезвычайно низких величинах скорости СВ (потоки СВ со скоростью < 400 км/с наблюдались ~ 75 % времени).

В 2009 г. интенсивность потоков электронов уменьшается для всего рассматриваемого диапазона энергий электронов, по сравнению с 2007 г., существенно меняется и структура энергетических спектров (уменьшение интенсивности зависит от энергии частиц). Для энергий электронов < 300 кэВ потоки частиц в среднем уменьшаются \sim в 2 раза. Для энергий > 400 кэВ проявляется сильная зависимость глубины спада от энергии электронов, что приводит к существенному уменьшению в спектре числа релятивистских частиц (это уменьшение для электронов 407,5 кэВ, 925 кэВ и 2000 кэВ равно $\sim 2,8$, 5,8 и 14,5). Значительные вариации потоков электронов ВРПЗ, связанные с перестройкой структуры потоков СВ, вызывают изменения радиационных дозовых нагрузок для аппаратуры на космических

аппаратах, орбиты которых проходят вблизи экваториальной области внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ). В таблице представлены среднегодовые дозовые нагрузки, вычисленные для двух энергетических диапазонов потоков электронов 24,1–400 кэВ и 400–2000 кэВ для 2007 г. и 2009 г. Там же для сравнения показаны среднесуточные величины дозовых нагрузок для средних и максимальных величин потоков в 2007 г. Следует отметить, что максимальная среднесуточная доза для диапазона энергий электронов 24,1–400 кэВ превышает ~ в 4 раза среднюю величину, для диапазона 400–2000 кэВ ~ в 3 раза.

Список литературы

1. Формирование периодических структур в потоках солнечного ветра и в магнитосфере Земли в период минимума солнечной активности 2006–2010 г. / И.П. Безродных, Е.И. Морозова, А.А. Петрукович и др. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – Т. 145. – С. 27–41.
2. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves/ Richard B. Horne, Richard M. Thorne, Sarah A. Glauert et al // J. Geophys. Res. Space Physics, 2005. – V. 110.
3. Energy-dependent dynamics of keV to MeV electrons in the inner zone, outer zone, and slot regions / Geoffrey D. Reeves, Reiner H. W. Friedel, Brian A. Larsen, Ruth M. Skoug et al. // J. Geophys. Res. Space Physics, 2016. – V. 121. – P. 397–412.
4. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://omni-web.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.
5. Электронный ресурс. – Режим доступа: <ftp://ftp.agu.org/apend/ja/2010ja015735>.
6. The dual role of ELF/VLF chorus waves in the acceleration and precipitation of radiation belt electrons / Bortnik J., R. M. Thorne // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2007. – V. 69. – P. 378–386.
7. Competing source and loss mechanisms due to wave-particle interactions in Earth's outer radiation belt during the 30 September to 3 October 2012 geomagnetic storm / D. L. Turner, V. Angelopoulos, W. Li, J. Bortnik et al. // J. Geophys. Res. Space Physics, 2014. – V. 119. – Issue 3. – P. 1960–1979.
8. Why are relativistic electrons persistently quiet at geosynchronous orbit in 2009? / R. Kataoka, Y. Miyoshi // Space Weather, 2010. – V. 8.
9. Nature's Grand Experiment: Linkage Between Magnetospheric Convection and the Radiation Belts / Craig J. Rodger, Kathy Cresswell-Moorcock, Mark A. Clilverd // J. Geophys. Res. Space Physics, 2016. – V. 121. – Issue 1. – P. 171–189.
10. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits / N. Iucci, A. E. Levitin, A. V. Belov, E. A. Eroshenko et al. // Space Weather, 2005. – V. 3.
11. Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships / HoSung Choi, Jaemin Lee, Kyun Suk Cho et al. // Space Weather, 2011. – V. 9. [Электронный ресурс.] – Режим доступа: <http://d54x.ru/articles/02/201602.pdf>.