

ВЛИЯНИЕ РЕКУРРЕНТНЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович,
М. Н. Будяк, М. В. Кожухов, В. Т. Семёнов

Получены и проанализированы количественные оценки влияния скорости и плотности солнечного ветра на структуру энергетических спектров потоков электронов внешнего радиационного пояса (ВРПЗ), сформированные в 2007 г. при воздействии отдельных достаточно изолированных высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ). В 2007 г. было зарегистрировано 29 возрастаний потоков электронов, в которых наблюдались потоки релятивистских электронов ~ 2 МэВ. В работе использованы данные спутника LANL – GEO (диапазон энергии электронов 24,1 – 2000 кэВ) и база данных OMNI для параметров СВ. Для анализа в качестве параметра использовалась плотность плазмы на переднем фронте высокоскоростного потока СВ. Для каждого из 29 возрастаний потоков электронов исследуется зависимость максимальных дифференциальных потоков электронов отдельно от скорости и плотности СВ. Для трёх диапазонов плотности СВ 4 – 6, 6 – 12 и 13 – 21 см⁻³ исследована зависимость потоков электронов от скорости СВ и для трёх диапазонов скорости СВ 400 – 535, 535 – 602 и 602 – 668 км/с исследована зависимость потоков электронов от плотности плазмы СВ. На основе статистического анализа были выделены три энергетических диапазона энергий электронов: < 100 кэВ, 100 – 500 кэВ и релятивистские электроны (> 625 кэВ), для которых регистрируются значительные отличия динамики потоков при изменении скорости и плотности СВ. В частности показано, что потоки электронов ~ 100 – 500 кэВ (зародышевые частицы) практически не зависят от вариаций скорости и плотности СВ. Эта область энергий резко ограничена сверху энергией электронов ~ 500 кэВ. Электроны 100 – 500 кэВ ускоряются вне GEO в среднем до энергий 500 кэВ и формируют внешний источник для GEO. По нашим данным, резкий переход от практической независимости потоков электронов от параметров СВ к значительным вариациям потоков электронов > 625 кэВ, зависящих от скорости и плотности СВ, наблюдается при энергии электронов ~ 500 кэВ. Эта величина фактически определяет нижний порог локального резонансного ускорения зародышевых электронов ультранизкочастотными волнами (ULF-волнами) на L ~ 5 до релятивистских энергий (L – параметр Мак-Илвейна, например, магнитная оболочка L = 6 удалена в плоскости геомагнитного экватора от центра Земли на 6R_з, где R_з – радиус Земли). Наши результаты, основанные на исследовании зависимости динамики потоков электронов ВРПЗ от скорости и плотности плазмы СВ, находят подтверждение в целом ряде исследований динамики фазовой плотности потоков электронов ВРПЗ. При анализе энергетических спектров электронов были получены количественные оценки влияния скорости и плотности СВ на формирование потоков релятивистских электронов ВРПЗ. Были получены следующие результаты: 1) уменьшение потока электронов при увеличении плотности плазмы СВ для постоянной скорости СВ; 2) возрастание влияния плотности при увеличении скорости СВ, эффект регистрируется при скорости ≤ 650 км/с.; 3) при скорости СВ > 660 км/с и плотности плазмы СВ > 8 см⁻³ потоки энергичных электронов на геостационарной орбите практически не зависят от плотности СВ. Полученные результаты отражают сложный баланс процессов ускорения и потерь, возникающих при резонансном взаимодействии электронов с ультранизкочастотными (ULF) и ионно-циклотронными (EMIC) волнами. При увеличении плотности плазмы СВ значительно повышается мощность EMIC-волн, которые, в основном, определяют скорость питч-угловой диффузии электронов в конус потерь, которая максимальна для релятивистских электронов.

Ключевые слова: солнечный ветер, магнитосфера Земли, частицы радиационных поясов.

Введение

Одной из задач «космической погоды» является прогноз влияния высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ) на динамику потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ). В настоящее время достаточно подробно разработаны и по измерениям на спутниках экспериментально подтверждены физические процессы, возникающие в магнитосфере Земли при воздействии высокоскоростных потоков СВ. Динамические вариации потоков электронов отражают сложный баланс конкурирующих процессов ускорения и потерь частиц. Основные процессы, формирующие структуру потоков электронов ВРПЗ (радиальная диффузия, резонансное взаимодействие электронов с электромагнитными волнами, адиабатическая транспортировка, потери на магнитопаузе и в атмосфере) связаны (прямо или косвенно) со структурой волновых пакетов электромагнитных волн, возбуждаемых

в магнитосфере при воздействии высокоскоростных потоков СВ [1 – 5]. Скорость и плотность плазмы СВ, а также направление межпланетного магнитного поля (ММП) являются основными параметрами, определяющими вероятность возникновения и эффективность этих процессов. Резонансное взаимодействие волна – частица [6 – 9] является одним из основных факторов, формирующих потоки электронов ВРПЗ. Вариации скорости и плотности СВ определяют диапазон частот (от десятков кГц до 10⁴ Гц) и амплитуду волновых пакетов, и соответственно во многом определяют структуру потоков электронов ВРПЗ [10 – 16].

Для объяснения сложной и часто неоднозначной связи структуры потоков релятивистских электронов ВРПЗ со скоростью СВ [17, 18] многими авторами проводился анализ влияния плотности плазмы СВ на динамику потоков электронов ВРПЗ. В работе [19] при изучении данных спутников GOES-8 и GOES-10

было показано, что плотность плазмы СВ эффективно контролирует величину потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите (определяет потери частиц), и самые большие потоки электронов регистрируются в условиях низкой плотности СВ. Избирательный характер влияния плотности СВ на энергетические спектры электронов ВРПЗ показан в работе [20] (данные спутников SAMPEX и POES). Высокоплотные потоки СВ провоцируют возбуждение в магнитосфере электромагнитных ионноциклотронных волн (EMIC-волн). Было показано, что EMIC-волны эффективно взаимодействуют с релятивистскими электронами $> 2,5$ МэВ и рассеивают их в атмосферу, что приводит к трансформации спектра электронов ВРПЗ. Статистический анализ связи потоков электронов ВРПЗ (энергии электронов от 24 кэВ и до > 2 МэВ) с параметрами СВ и индексами геомагнитной активности проведён в работе [21] (данные спутников LANL и GOES, 1986 – 2009 гг.). При анализе больших временных периодов (более года) показано, что скорость СВ является наилучшим индикатором появления потоков релятивистских электронов. Для трёхмесячных периодов скорость СВ является лучшим индикатором \sim для 60% случаев, плотность СВ \sim для 20% случаев, для остальных 20% – индексы геомагнитной активности. Исследование зависимости величин наиболее вероятных потоков электронов ВРПЗ отдельно от скорости и плотности потоков СВ проведено в работе [22]. Для анализа использовалась база данных (\sim за 20 лет) измерений потоков электронов на спутниках LANL – GEO. В работе построены зависимости величин наиболее вероятных потоков электронов от скорости СВ при постоянной плотности и от плотности при постоянной скорости. Диапазон используемых величин плотности $2 - 8 \text{ см}^{-3}$, скорости $300 - 600 \text{ км/с}$. Анализ показал нелинейность процессов, формирующих энергетические спектры потоков электронов ВРПЗ. При увеличении скорости СВ потоки электронов, в основном, увеличиваются, но по-разному в зависимости от энергии электронов. При увеличении плотности СВ потоки электронов > 200 кэВ уменьшаются, потоки электронов < 60 кэВ увеличиваются. В обоих случаях характер изменений зависит от энергии электронов.

Целью нашей работы является анализ и получение количественных оценок влияния скорости и плотности плазмы СВ в качестве изолированных параметров (эти величины некоррелированные) на структуру энергетических спектров потоков электронов ВРПЗ, сформированных в 2007 г. при воздействии отдельных достаточно изолированных высокоскоростных потоков СВ [23]. Основным

источником высокоскоростных потоков солнечного ветра в 2007 г. были низкоширотные корональные дыры. Рекуррентные потоки СВ со скоростью $\sim 500 \text{ км/с}$ наблюдались $\sim 30\%$ времени, со скоростью $\sim 400 \text{ км/с}$ – $\sim 60\%$, $\sim 10\%$ времени регистрировались потоки со скоростью $\sim 600 \text{ км/с}$, средняя скорость медленного ветра составила $\sim 344 \text{ км/с}$. В 2007 г. (минимум солнечной активности) структура межпланетного пространства была достаточно однородна. Это дало возможность выделить влияние плотности и скорости на формирование потоков электронов ВРПЗ при воздействии практически однородных структур СВ.

Результаты обработки экспериментальных данных

В работе использована база данных спутника LANL – GEO за 2007 г. по измерению потоков электронов на геостационарной орбите (сайт [ftp://ftp.agu.org/apend/ja/2010ja015735]) и база данных OMNI для параметров солнечного ветра (сайт [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html]). В работе для всех параметров использованы среднесуточные значения. В 2007 г. было зарегистрировано 29 возрастных потоков электронов, сформированных при воздействии высокоскоростных потоков. На рис. 1 показаны энергетические спектры максимальных потоков электронов для 25 выделенных событий (диапазон энергии 24,1 кэВ – 2 МэВ, 13 энергетических каналов). Для каждого события при вычислении энергетических спектров использовались максимальные в каждом дифференциальном канале потоки электронов. Отметим сильные вариации величин потоков в различных событиях, наиболее значительные для энергий электронов ~ 1 МэВ.

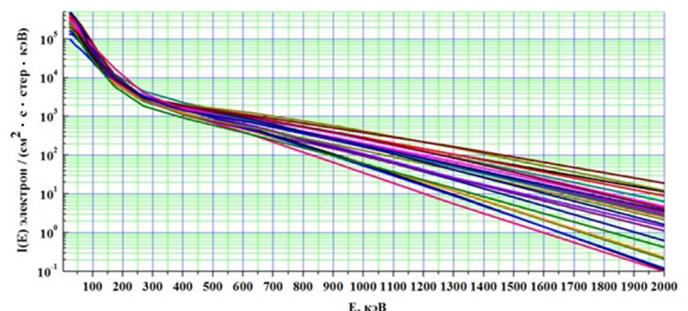


Рис. 1. Дифференциальные энергетические спектры максимальных потоков электронов для 25 возрастных интенсивности потоков электронов, зарегистрированных в 2007 г. на геостационарной орбите

Для выявления влияния плотности и скорости СВ на формирование энергетических спектров, мы разделили все события на 6 подгрупп: три диапа-

зона плотности и три диапазона скорости СВ. Были построены зависимости максимальных дифференциальных потоков электронов при изменении скорости СВ для интервала от 400 до 700 км/с для трёх диапазонов плотности СВ: 6 – 9, 9 – 12 и 13 – 21 см⁻³ (рис. 2) и зависимости максимальных дифференциальных потоков электронов при изменении плотности СВ для интервала от 4 до 22 см⁻³ для трёх диапазонов скорости СВ 440 – 535, 535 – 602 и 602 – 668 км/с (рис. 3). Для анализа были использованы величины плотности на переднем крае высокоскоростного потока плазмы СВ [24]. Вариации давления СВ на магнитосферу являются основным параметром для механизма возбуждения магнитосферных ULF-волн (ультранизкочастотные волны, 10⁻³ Гц), которые, в свою очередь, определяют структуру потоков электронов ВРПЗ [25]. Рассмотрим динамику потоков электронов в зависимости от скорости СВ при постоянных величинах плотности солнечной плазмы (рис. 2). СВ потоки электронов > 100 кэВ возрастают, но в зависимости от энергии частиц по-

разному для каждого диапазона плотности, что указывает на нелинейный характер связи величин потоков электронов со скоростью СВ. Потоки электронов для диапазона энергий 172,5 – 407,5 кэВ практически не зависят от скорости при плотности в диапазоне 9 – 21 см⁻³. Потоки электронов ≥ 625 кэВ для заданной скорости с увеличением плотности значительно уменьшаются, но при скорости > 600 км/с влияние скорости снижается, можно предположить, что при очень высоких скоростях реализуется некоторая предельная величина потоков. При заданной скорости потоки электронов < 100 кэВ возрастают при увеличении плотности для диапазона 6 – 12 см⁻³ и уменьшаются для диапазона 9 – 21 см⁻³. Отметим близкое подобие зависимости вариаций потоков электронов от скорости для трёх диапазонов энергии частиц: 31,7 – 90, 172,5 – 407,5 и ≥ 625 кэВ (на рис. 2 показана только часть кривых). Минимальные вариации потоков электронов при изменении скорости и плотности СВ регистрируются для энергий электронов 172,5 – 407,5 кэВ.

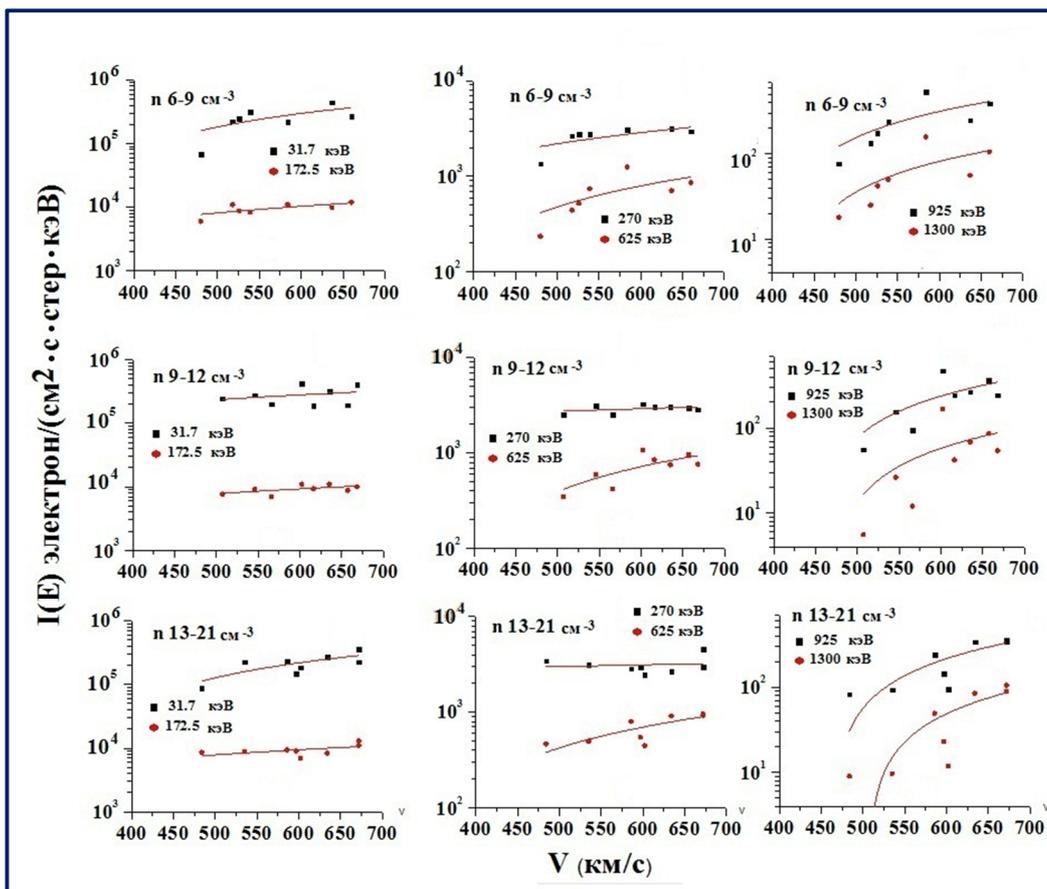


Рис. 2. Зависимость максимальных потоков электронов для 6 дифференциальных энергетических каналов (31,7; 172,5; 270; 625; 925 и 1300 кэВ) от скорости СВ для трёх диапазонов плотности СВ 6 – 9; 9 – 12 и 13 – 21 см⁻³

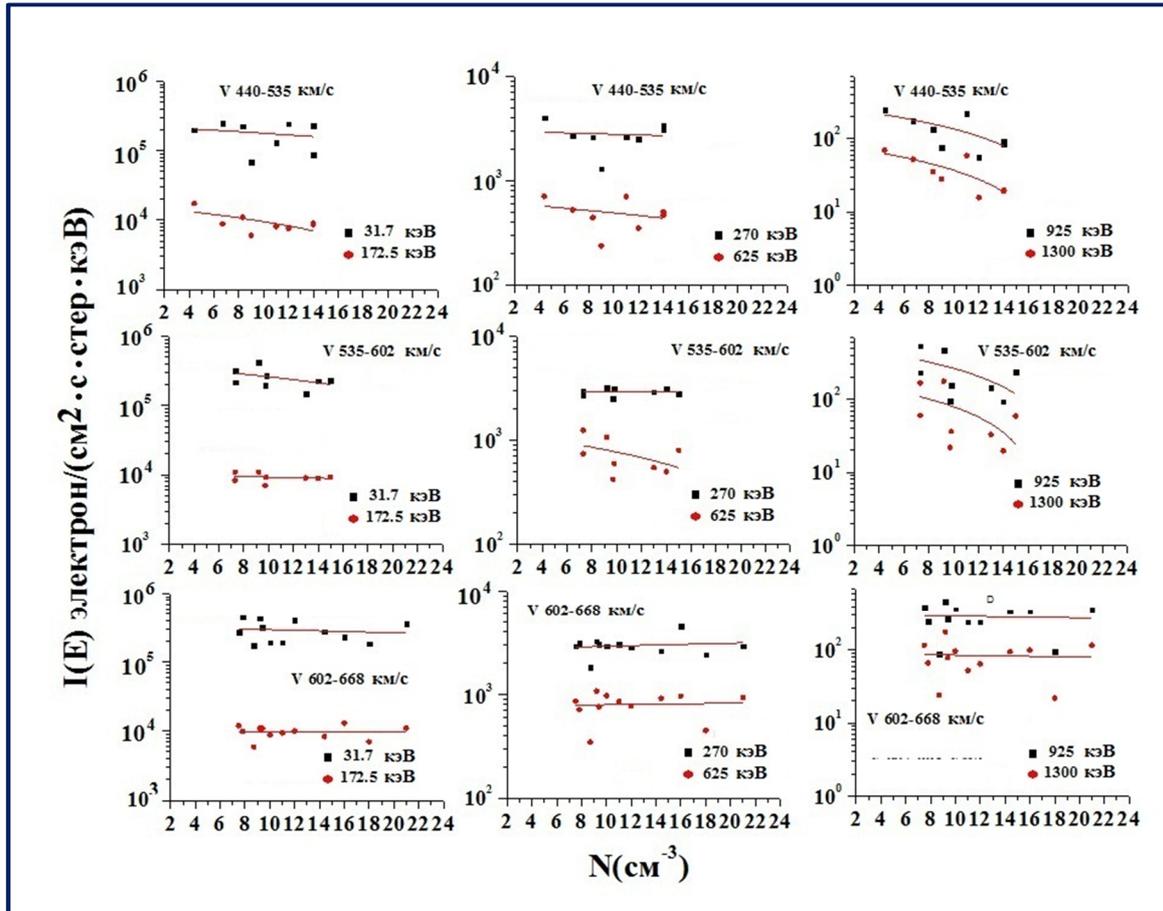


Рис. 3. Зависимость максимальных потоков электронов для 6 дифференциальных энергетических каналов (31,7; 172,5; 270; 625; 925 и 1300 кэВ) от плотности СВ для трёх диапазонов скорости СВ 440 – 535; 535 – 602 и 602 – 668 км/с

Выделим наиболее интересные результаты для всех диапазонов плотности с увеличением скорости. Далее рассмотрим влияние плотности СВ на формирование потоков электронов для трёх выделенных диапазонов скорости 440 – 535, 535 – 602 и 602 – 668 км/с (см. рис. 3).

Для всех диапазонов скорости СВ при увеличении плотности СВ потоки электронов уменьшаются, но в зависимости от энергии частиц по-разному для каждого диапазона скорости, что также указывает на нелинейный характер связи величин потоков электронов с плотностью СВ. Выделим наиболее общие результаты. При данной плотности СВ с увеличением скорости СВ для всех энергий потоки электронов возрастают. Для энергий < 200 кэВ и плотности СВ от 4 до 14 см⁻³ потоки электронов уменьшаются незначительно, в среднем на 20 – 30 %. Отметим, что при плотности < 8 см⁻³ и скорости < 520 км/с потоки электронов ≤ 50 кэВ увеличиваются. Потоки электронов в диапазоне ~

172,5 – 407,5 кэВ для каждого диапазона скорости практически не меняются при изменении плотности. При скоростях в диапазоне от 400 до 600 км/с потоки электронов с энергией ≥ 625 кэВ уменьшаются при увеличении плотности, наиболее значительно для высоких энергий (наклон кривых увеличивается). Для диапазона скорости ~ от 535 до 602 км/с при изменении плотности от 7 до 15 см⁻³ потоки электронов 625, 925 и 1300 кэВ уменьшаются в 1,6, 2,5 и 3,7 раз. При скорости > 650 км/с потоки электронов ≥ 625 кэВ в диапазоне плотностей 7 – 21 см⁻³ практически не зависят от плотности.

Отметим особенности вариации потоков релятивистских электронов, регистрируемые при изменении скорости и плотности: уменьшение потоков при увеличении плотности для данной скорости; увеличение потоков при увеличении скорости для данной плотности; некоторое насыщение потоков при высоких скоростях для всех диапазонов плот-

ности от 6 до 21 см³; при скорости > 650 км/с и плотности > 8 см³ независимость потоков электронов от плотности. Анализ зависимости динамики потоков электронов от параметров СВ (отдельно от скорости и плотности) показал возможность выделения и получения основных характеристик отдельных энергетических групп потоков электронов, определяющих этапы формирования электронов ВРПЗ. Исследование показало, что имеется три группы электронов, для которых регистрируются значительные отличия динамики потоков при изменении параметров СВ: < 100, 100 – 407,5 и > 625 кэВ (релятивистские электроны). При изменении скорости и плотности (как независимых параметров) минимальные вариации регистрируются для электронов диапазона энергий 172,5 – 407,5 кэВ, максимальные – для электронов > 925 кэВ. Изменение характера связи происходит при энергии электронов ~ 500 кэВ, в диапазоне энергий 407,5 – 625 кэВ. Рассмотрим полученные результаты в рамках современной теории формирования потока релятивистских электронов ВРПЗ. Электроны < 100 кэВ принято рассматривать как частицы источника (source), а электроны ~ 100 – 500 кэВ в качестве зародышевых частиц (seed) для релятивистских электронов. Процесс формирования потоков релятивистских электронов ВРПЗ прямо связан с появлением во внутренней магнитосфере потоков десятков и сотен кэВ электронов, которые возникают при суббуревой инжекции и повышенной глобальной магнитосферной конвекции и ускоряются в диполяризационных процессах [26 – 29] и при резонансном взаимодействии с электромагнитными волнами [27, 30]. Ускорение зародышевых частиц определяется процессами во внутренней магнитосфере, которые развиваются при суббуревой активности. Электроны в диапазоне энергий 100 – 500 кэВ ускоряются вне GEO в среднем до энергий ~ 500 кэВ [27].

В процессе радиальной диффузии зародышевые электроны плазменного слоя заполняют внутреннюю магнитосферу ($L \sim 3 - 8$) [31, 32]. Наличие зародышевых электронов в магнитосфере является необходимым условием для формирования релятивистских электронов ВРПЗ [33]. Фазовая плотность (phase space density) электронов для энергий < 500 кэВ увеличивается при увеличении L (градиент положительный), источник электронов находится вне данной оболочки [34, 35]. Экспериментально установлено, что смена знака градиента происходит при энергии электронов ~ 500 кэВ, при этом максимум фазовой плотности наблюдается на $L \sim 5$ в сердце внешнего радиационного пояса,

что указывает на реализацию внутреннего источника для ускорения релятивистских электронов [36, 37].

Заключительный этап формирования потоков релятивистских электронов ВРПЗ определяется локальным резонансным ускорением зародышевых электронов электромагнитными волнами (в широком диапазоне низкочастотных электромагнитных волн (VLF- и ULF-волн), которые возбуждаются при суббуревой активности [38, 39]. Следует отметить, что имеется пороговая энергия ~ 400 – 500 кэВ, выше которой электроны ускоряются волнами, а ниже порога рассеиваются [3, 9]. В процессах радиальной диффузии происходит постепенное перераспределение потоков ускоренных электронов с $L \sim 5$ на внешние и внутренние оболочки. По нашим данным, такая последовательность процессов формирования потоков электронов ВРПЗ проявляется в нелинейной зависимости динамики электронов от скорости и плотности СВ. Следует отметить достаточно резкие энергетические границы такой динамики: электроны < 100 кэВ (электроны источника), электроны в диапазоне энергий 100 – 500 кэВ (зародышевые электроны) и релятивистские электроны. Эти границы фактически определяют области реализации наиболее эффективного для данной группы энергий электронов процессов ускорения и транспортировки. Электроны 100 – 500 кэВ можно рассматривать как внешний источник частиц для GEO. Переход от практической независимости потоков электронов от параметров СВ к значительным вариациям потоков электронов > 625 кэВ от скорости и плотности СВ наблюдается при энергии электронов ~ 500 кэВ (см. рис. 2 и 3). Эта величина фактически определяет нижний порог локального резонансного ускорения ULF-волнами зародышевых электронов до релятивистских энергий. Электроны ≥ 500 кэВ, локально ускоренные до релятивистских энергий на $L \sim 5$, в процессе радиальной диффузии заполняют внешние и внутренние L -оболочки. В работе [37] показано, что начало формирования потоков релятивистских электронов происходит при достижении некоторого минимального потока электронов средних энергий, зародышевых электронов. На $L \sim 5$ эта величина составила ~ 10^3 электрон/см²·с·стер·кэВ для электронов 230 кэВ. В нашем случае на GEO минимальный поток 270 кэВ электронов составил ~ $1,3 \cdot 10^3$ эл/см²·с·стер·кэВ. Эта величина близка к минимальной величине наиболее вероятного потока 270 кэВ, представленной в работе [22] при анализе возрастных потоков релятивистских электронов ВРПЗ.

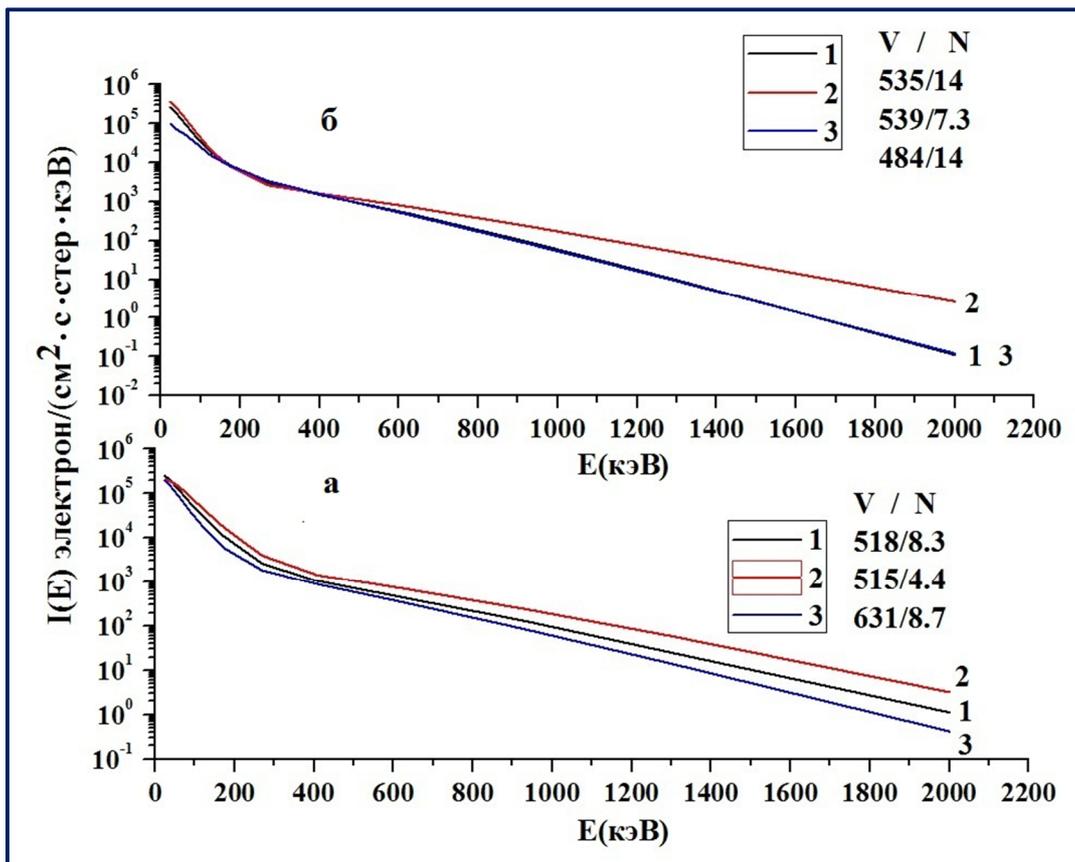


Рис. 4. Дифференциальные энергетические спектры электронов, зарегистрированные на геостационарной орбите в 2007 г. при разных соотношениях скорости плазмы СВ (V , км/с) к плотности плазмы СВ (N , см⁻³): *a* – для события при средней скорости ~ 516 км/с и плотности 4,4 и 8,3 см⁻³ и для события при плотности $\sim 8,7$ см⁻³ и скорости 631 км/с; *b* – для события при средней скорости ~ 537 км/с и плотности 7,3 и 14 см⁻³ и для события при плотности ~ 14 см⁻³ и скорости 484 км/с

Для получения количественных оценок влияния скорости и плотности СВ был проведён анализ энергетических спектров электронов в отдельных событиях (рис. 4, 5 и 6). При этом для сравнения энергетических спектров были выделены события, сформированные при близких значениях скорости СВ и разных величинах плотности, а также при близких величинах плотности СВ и разных величинах скорости.

В табл. 1 представлены основные результаты сравнительного анализа энергетических спектров для отдельных событий: для 6 значений энергий электронов и 6 величин скорости СВ показаны отношения потоков электронов ($F1/F2$) при изменении плотности СВ ($N2/N1$) для близких значений скорости СВ в отдельных событиях (результаты по данным рис. 4, 5 и 6).

Табл. 1 показывает уменьшение потоков электронов при увеличении плотности СВ при посто-

янной скорости СВ. Эффект зависит от энергии частиц и увеличивается при увеличении скорости СВ. При скорости 602 км/с и возрастании плотности СВ \sim в 2 раза поток электронов уменьшается \sim в 2,4 раза для энергии 625 кэВ и \sim в 14 раз для энергий 1300 кэВ. Для улучшения статистики для каждого диапазона скорости были выбраны несколько событий (не менее 4) с разбросом скорости $< 1,5\%$ и проведены вычисления влияния плотности для двух диапазонов энергии частиц 31,7 – 90 кэВ, 172,5 – 407,5 кэВ и трёх дифференциальных каналов электронов 925, 1300 и 2000 кэВ. Для двух выделенных диапазонов энергий электронов в таблице даны средние отношения потоков. Такой выбор диапазонов энергии связан с подобием зависимости электронов в этих диапазонах от скорости и плотности СВ (см. рис. 2 и 3). Результаты представлены на рис. 7 и в табл. 2.

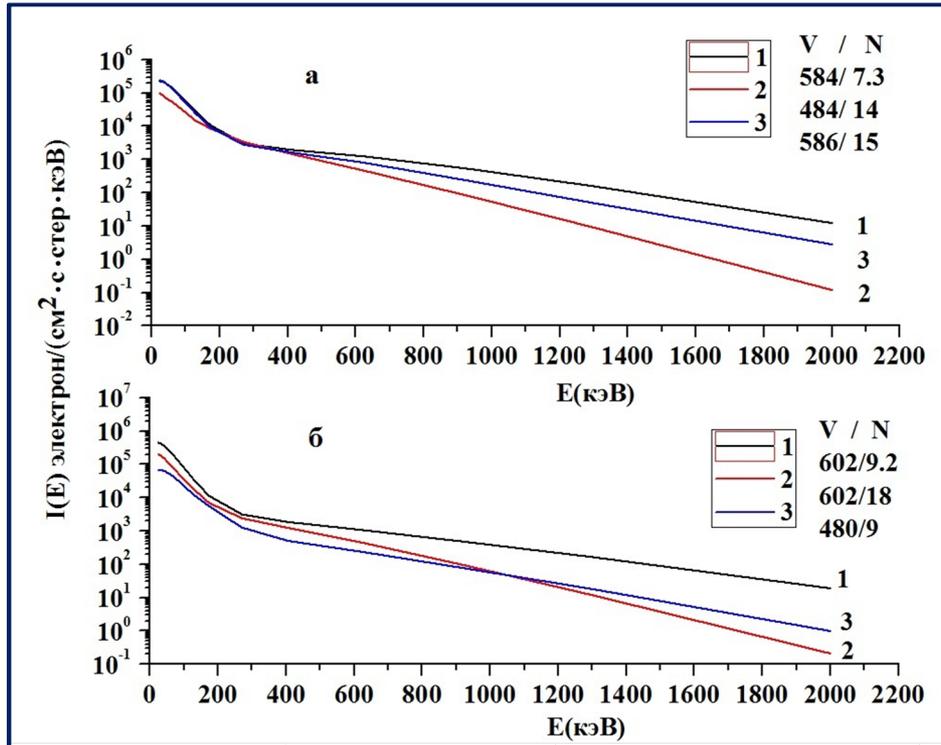


Рис. 5. Дифференциальные энергетические спектры электронов, зарегистрированные на геостационарной орбите в 2007 г. при разных соотношениях скорости плазмы СВ (V , км/с) к плотности плазмы СВ (N , см⁻³):
 а – для события при средней скорости ~ 585 км/с и плотности 7,3 и 15 см⁻³ и для события при плотности ~ 14 см⁻³ и скорости 484 км/с; б – приведены спектры для события при скорости ~ 602 км/с и плотности 9,2 и 18 см⁻³ и для события при плотности ~ 9 см⁻³ и скорости 480 км/с

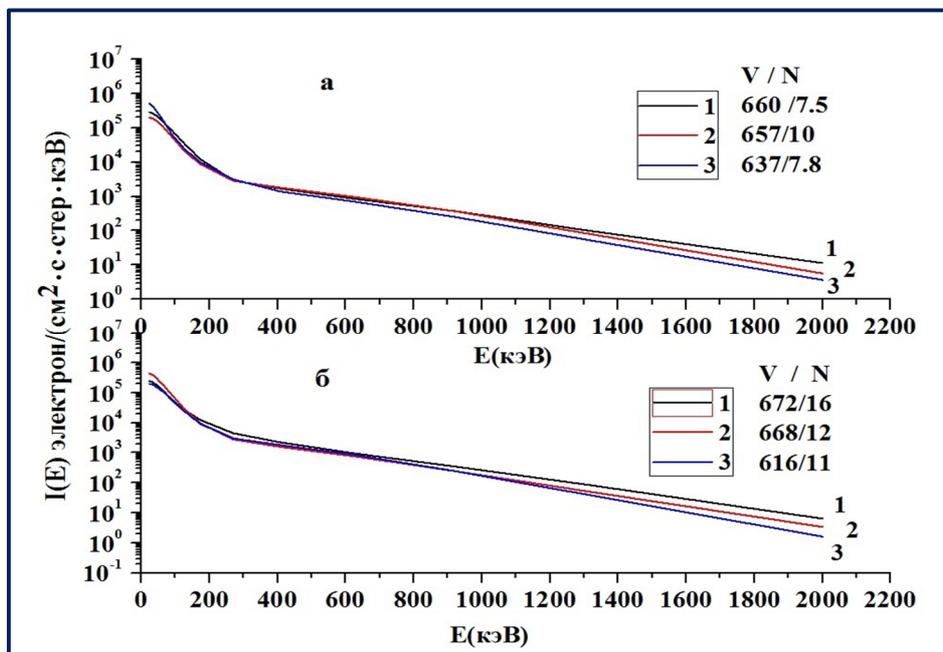


Рис. 6. Дифференциальные энергетические спектры электронов, зарегистрированные на геостационарной орбите в 2007 г. при разных соотношениях скорости плазмы СВ (V , км/с) к плотности плазмы СВ (N , см⁻³):
 а – для события при средней скорости ~ 658 км/с и плотности 7,5 и 10 см⁻³ и для события при плотности $\sim 7,8$ см⁻³ и скорости 637 км/с; б – для события при средней скорости ~ 670 км/с и плотности 12 и 16 см⁻³ и для события при плотности ~ 11 см⁻³ и скорости 616 км/с

Таблица 1

Диапазон скоростей, км/с	Отношение Плотностей, $N2/N1$	Отношения потоков электронов $F1/F2$ при разных энергиях (кэВ)					
		31,7	62,5	625	925	1300	2000
515 – 518	1,89	0,88	1,21	1,6	1,85	2,36	2,88
535 – 539	1,92	1,39	1,38	1,49	2,53	5,2	13
584 – 586	2,05	0,95	1,08	1,56	2,26	3,2	4,36
602	1,96	2,3	2,46	2,4	5	13,9	90
657 – 660	1,33	1,41	1,39	0,88	1	1,22	2
668 – 672	1,33	1,77	1,58	0,8	0,7	0,61	0,53

Таблица 2

Скорость V , км/с	Плотность $N1$, см ⁻³	Отношение плотностей $N2/N1$	Отношения потоков электронов $F1/F2$ при разных энергиях (кэВ)				
			31,7 – 90	172,5 – 407,5	925	1300	2000
541	9,8	1,43	1,23	1,01	1,67	2,74	12,9
600	9,2	1,41	2,9	1,23	3,28	7,2	31
659	7,5	1,33	1,44	1,1	1	1,22	2
671	14	1,32	1,11	1,02	1,17	0,73	0,62
516	4,4	1,89	1,05	1,55	1,85	2,36	2,88
534	7	2	1,27	0,93	2,21	4,8	12
590	7,3	1,78	1,81	1,23	3,73	6,63	19,8
602	9,2	1,96	2,35	1,49	5	13,9	90

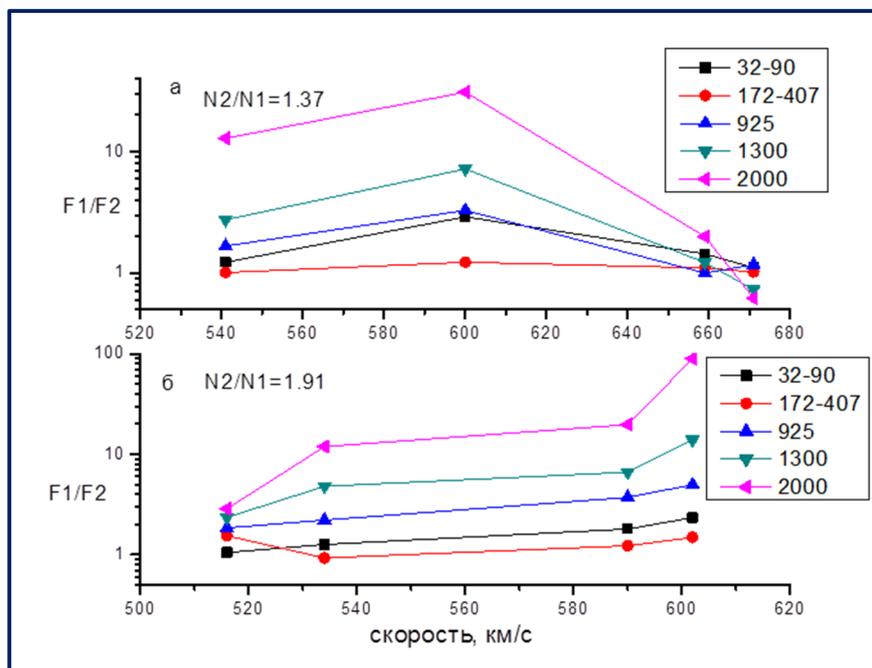


Рис. 7. Зависимость отношения величин потоков электронов ($F1/F2$) от скорости СВ при изменении плотности СВ (N) для двух диапазонов энергий электронов на геостационарной орбите 31,7 – 90 кэВ, 172,5 – 407,5 кэВ и трёх дифференциальных каналов электронов 925 кэВ, 1300 кэВ и 2000 кэВ: a – $N2/N1=1,37$; $б$ – $N2/N1=1,91$

Отметим следующие средние количественные эффекты – влияние плотности и скорости СВ на формирование потоков электронов: 1. Уменьшение потока электронов при увеличении плотности СВ для постоянной скорости СВ, наиболее значительное для релятивистских энергий. 2. Возрастание влияния плотности при увеличении скорости СВ. Для скорости СВ ~ 534 км/с увеличение \sim в 2 раза плотности приводит к уменьшению потока электронов в $\sim 2,2$, 4,8 и 12 раз соответственно для энергий 925, 1300 и 2000 кэВ, при скорости ~ 590 км/с потоки уменьшаются \sim в 3,7, 6,6 и 20 раз. Эти эффекты регистрируются при скорости ≤ 650 км/с. 3. При скорости СВ > 660 км/с и плотности > 8 см³ потоки электронов практически не зависят от плотности. 4. Минимальные вариации при изменении плотности при постоянной скорости СВ наблюдаются для диапазона энергий 172,5 – 407,5 кэВ. В событиях, сформированных при высокой плотности потоков СВ, дифференциальный энергетический спектр электронов должен быть более мягким, значительно уменьшается число электронов > 625 кэВ. Динамика потоков релятивистских электронов во многом определяет величину радиационных дозовых нагрузок для аппаратуры космических аппаратов. На рис. 5, б показана структура энергетических спектров для двух событий при скорости 602 км/с. Полное число электронов с энергией 900 – 1500 кэВ составило $\sim 114 \times 10^3$ электрон/см²·с·стер при плотности СВ $9,2$ см⁻³ и $\sim 20 \times 10^3$ электрон/см²·с·стер при плотности 18 см⁻³, при этом дозовые нагрузки (с учётом спектральных характеристик) изменяются \sim в 5 раз.

Полученные результаты отражают сложный баланс процессов ускорения и рассеяния, возникающих при резонансном взаимодействии электронов с ULF- и EMIC-волнами [40 – 45]. При увеличении плотности значительно повышается мощность EMIC-волн, которые, в основном, ответственны за питч-угловую диффузию электронов в конус потерь, эффективность рассеяния увеличивается при увеличении энергии частиц, наиболее значительно для релятивистских частиц (см. табл. 2) [3, 9, 43, 44]. Увеличение влияния плотности при увеличении скорости связано с насыщением потока релятивистских частиц при увеличении скорости > 600 км/с.

Основные результаты

В работе проведён анализ влияния плотности и скорости СВ (как независимых параметров) на формирование потоков электронов ВРПЗ. Рассмотрены 29 возрастных потоков электронов (диапазон энергии 24,1 кэВ – 2 МэВ), зарегистрированных в

2007 г. на GEO при воздействии высокоскоростных потоков СВ. Рассмотрена зависимость максимальных дифференциальных потоков электронов от скорости СВ (диапазон 400 км/с – 700 км/с) для трёх диапазонов плотности СВ: 6 – 9, 9 – 12 и 13 – 21 см³ и зависимость дифференциальных потоков электронов от плотности СВ (диапазон 4 – 22 см³) для трёх диапазонов скорости СВ 440 – 535, 535 – 602 и 602 – 668 км/с. Анализ динамики потоков электронов от параметров СВ (отдельно от скорости и плотности) показал возможность выделения и получения основных характеристик отдельных энергетических групп потоков электронов, определяющих этапы формирования электронов ВРПЗ. На основе статистического анализа были выделены три энергетических диапазона энергий электронов: < 100 , 100 – 500 кэВ и релятивистские электроны (> 625 кэВ), для которых регистрируются значительные отличия динамики потоков при изменении скорости и плотности СВ. В частности, было показано, что потоки электронов ~ 100 – 500 кэВ (зародышевые частицы) практически не зависят от вариаций параметров скорости и плотности СВ. Эта область энергий резко ограничена сверху энергией электронов ~ 500 кэВ. Переход от практической независимости потоков электронов от параметров СВ к значительным вариациям потоков электронов > 625 кэВ от скорости и плотности СВ наблюдается при энергии электронов ~ 500 кэВ (см. рис. 2, 3). Эта величина фактически определяет нижний порог локального резонансного ускорения ULF-волнами зародышевых электронов до релятивистских энергий. Начало формирования потока релятивистских электронов происходит при достижении некоторого минимального потока зародышевых электронов, для исследуемых событий минимальный поток 270 кэВ электронов составил $\sim 1,3 \cdot 10^3$ эл/см²·с·стер·кэВ.

При анализе энергетических спектров электронов были получены количественные оценки влияния скорости и плотности СВ на формирование потоков релятивистских электронов ВРПЗ. Были получены следующие результаты: 1) уменьшение потока электронов при увеличении плотности СВ для постоянной скорости СВ; 2) возрастание влияния плотности при увеличении скорости СВ. Эффект регистрируется при скорости ≤ 650 км/с. Полученные результаты отражают сложный баланс процессов ускорения и рассеяния, возникающих при резонансном взаимодействии электронов с ULF- и EMIC-волнами [41]. При увеличении плотности значительно повышается мощность EMIC-волн, которые, в основном, ответственны за питч-

угловую диффузию электронов в конус потерь, эффективность рассеяния увеличивается при увеличении энергии частиц, наиболее значительно для релятивистских частиц (см. табл. 2) [3, 9, 43, 44]. Наши результаты показывают, что для прогнозирования ожидаемых потоков релятивистских электронов необходимо учитывать локальную величину плотности СВ на переднем крае высокоскоростного потока СВ (в области взаимодействия медленного и быстрого потоков СВ). Например, для скорости СВ 602 км/с при изменении плотности СВ от 9,2 до 18 см⁻³ дозовые нагрузки (с учётом спектральных характеристик) могут измениться ~ в 5 раз.

Литература

1. Quantifying the relative contributions of substorm injections and chorus waves to the rapid outward extension of electron radiation belt / Zhenpeng Su, Hui Zhu, Fuliang Xiao, Huinan Zheng, Yuming Wang, Q.-G. Zong, Zhaoguo He, Chao Shen, Min Zhang, Shui Wang, et al // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2014. – V.119. – Issue 12, 10,023–10,040, doi:10.1002/2014JA020709: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/01JGR2014.pdf>, свободный или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JA020709/pdf>, свободный.
2. Radiation belt electron dynamics driven by adiabatic transport, radial diffusion, and wave-particle interactions / Zhenpeng Su, Fuliang Xiao, Huinan Zheng, and Shui Wang // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2011. – V. 116, A04205, doi:10.1029/2010JA016228: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/02JGR2011.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JA016228/pdf>, свободный.
3. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves / Richard B. Horne, Richard M. Thorne, Sarah A. Glauert, Jay M. Albert, Nigel P. Meredith, Roger R. Anderson // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2005. – V. 110, A03225, doi: 10.1029/2004JA010811: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/03JGR2005.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JA010811/pdf>, свободный.
4. Combined acceleration of electrons by whistler-mode and compressional ULF turbulences near the geosynchronous orbit/ Liuyuan Li, Jinbin Cao, and Guocheng Zhou // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2005. – V. 110. – P. 5105 – 5112, A03203, doi: 10.1029/2004JA010628: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/04JGR2005.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JA010628/pdf>, свободный.
5. Simulation of energy-dependent electron diffusion processes in the Earth's outer radiation belt / Ma Q, Li W., Thorne R. M., Nishimura Y., Zhang X.-J., Reeves G. D., Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Henderson M. G., Spence H. E., Baker D. N., Blake J. B., Fennell J. F., Angelopoulos V. // *J. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – Issue 5, doi: 10.1002/2016JA022507: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/05JGR2016.pdf>, свободный.
6. Formation process of relativistic electron flux through interaction with chorus emissions in the Earth's inner magnetosphere / Yoshiharu Omura, Yu Miyashita, Masato Yoshikawa, Danny Summers, Mitsuru Hikishima, Yusuke Ebihara, Yuko Kubota // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – V. 120. – Issue 11, November 2015. – P. 9545 – 9562, doi: 10.1002/2015JA021563: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/06JGR2015.pdf>, свободный.
7. Van Allen Probes observations linking radiation belt electrons to chorus waves during 2014 multiple storms / Si Liu, Fuliang Xiao, Chang Yang, Yihua He, Qinghua Zhou, Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Spence H. E., Reeves G. D., Funsten H. O., Blake J. B., Baker D. N., J. R. Wygant // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2015. – V. 120. – Issue 2, February 2015. – P. 938 – 948, doi: 10.1002/2014JA020781: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/07JGR2015.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JA020781/pdf>, свободный.
8. Prompt energization of relativistic and highly relativistic electrons during a substorm interval: Van Allen Probes observations / Foster J. C., Erickson P. J., Baker D. N., Claudepierre S. G., Kletzing C. A., Kurth W., Reeves G. D., Thaller S. A., Spence H. E., Shprits Y. Y., and Wygant J. R. // *Geophys. Res. Lett.* 2014. – V. 41. – P. 20 – 25, doi:10.1002/2013GL058438: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/08JGR2015.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013GL058438/pdf>, свободный.
9. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus / Thorne R. M., Li W., Ni B., Ma Q., Bortnik J., Chen L., Baker D. N., Spence H. E., Reeves G. D., Henderson M. G., Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Blake J. B., Fennell J. F., Claudepierre S. G., Kanekal S. G. // *Nature.* – 2013, 504(7480), 411–414, doi:10.1038/nature12889: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/09nature2013.pdf>, свободный.
10. Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit / Wladislaw Lyatsky and George V. Khazanov // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2008. – V. 113, A08224, doi:10.1029/2008JA013048: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/10JGR2008.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JA013048/pdf>, свободный.
11. Dynamic responses of the Earth's radiation belts during periods of solar wind dynamic pressure pulse based on normalized superposed epoch analysis / Ni B., Xiang Z., Gu X., Shprits Y. Y., Zhou C., Zhao Z., Zhang X., and Zuo P. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121, 8523 – 8536, doi:10.1002/2016JA023067: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/11JGR2016.pdf>, свободный.

12. Geomagnetic storms and EMIC waves: Van Allen Probe observations / Dedong Wang, Zhigang Yuan, Xiongdong Yu, Shiyong Huang, Xiaohua Deng, Meng Zhou, Haimeng Li // *J. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – Issue 7, doi:10.1002/2015JA022318: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/12JGR2016.pdf>, свободный.
13. Van Allen Probes observations of electromagnetic ion cyclotron waves triggered by enhanced solar wind dynamic pressure / Lee D.-Y., Noh S.-J., Hwang J., Kim K.-C., Lee J. J., Choi C. R., Thaller S., Skoug R. // *J. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – issue 10, doi:10.1002/2016JA022841: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/13JGR2016.pdf>, свободный.
14. The dependence on geomagnetic conditions and solar wind dynamic pressure of the spatial distributions of EMIC waves observed by the Van Allen Probes / Saikin A. A., Zhang J.-C., Smith C. W., Spence H. E., Torbert R. B., Kletzing C. A. // *J. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – Issue 5, doi: 10.1002/2016JA022523: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/14JGR2016.pdf>, свободный.
15. Solar wind driving of magnetospheric ULF waves: Field line resonances driven by dynamic pressure fluctuations / Claudepierre S. G., Hudson M. K., Lotko W., Lyon J. G., and Denton R. E. // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115, A11202, doi:10.1029/2010JA015399: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/15JGR2010.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JA015399/pdf> свободный.
16. Van Allen Probes observation and modeling of chorus excitation and propagation during weak geomagnetic activities / Yihua He, Fuliang Xiao, Qinghua Zhou, Chang Yang, Si Liu, Baker D. N., Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Spence H. E., Reeves G. D., Funsten H. O., Blake J. B. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2015. – V. 120. – Issue 8, doi: 10.1002/2015JA021376: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/16JGR2015.pdf>, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JA021376/pdf>, свободный.
17. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited / Reeves G. D., Morley S. K., Friedel R. H. W., Henderson M. G., Cayton T. E., Cunningham G., Blake J. B., Christensen R. A., and Thomsen D. // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V. 116, A02213, doi:10.1029/2010JA015735: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/17JGR2011.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JA015735/pdf>, свободный.
18. Long-term variations in solar wind velocity and radiation belt electrons / Reeves Geoff, Morley Steve, and Cunningham Greg // *J. Geophys. Res.* – 2013. – V. 118, 1040 – 1048: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/18JGR2013.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgra.50126/pdf>, свободный.
19. Effect of solar wind density on relativistic electrons at geosynchronous orbit / Lyatsky W., and Khazanov G. V. // *Geophys. Res. Lett.* – 2008, 35(3), L03,109, doi:10.1029/2007GL032524: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/19GRL2008.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GL032524/pdf>, свободный.
20. Responses of relativistic electron fluxes in the outer radiation belt to geomagnetic storms / Xiong Y., Xie L., Pu Z., Fu S., Chen L., Ni B., Li W., Li J., Guo R., and Parks G. K. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2015. – V. 120: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/20JGR2015.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JA021440/pdf>, свободный.
21. Эффективность связи потоков энергичных электронов на геостационарной орбите с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности в 22-м и 23-м солнечных циклах / Дегтярев В. И., Попов Г. В., Чудненко С. Э. // *Солнечно-земная физика.* – Вып. 23 (2013). – С. 64 – 74.
22. On the influence of solar wind conditions on the outer-electron radiation belt / Kellerman A. C. and Shprits Y. Y. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2012. – V. 117, A05217, doi:10.1029/2011JA017253: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/22JGR2012.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JA017253/pdf>, свободный.
23. Evolution of Coronal Holes and Implications for High-Speed Solar Wind During the Minimum Between Cycles 23 and 24 / de Toma G // *Solar Phys.* – 2011. – V. 274. – P. 195 – 217: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/23SolarPhys2011.pdf>.
24. Timing analysis of the relationship between solar wind parameters and geosynchronous Pc5 amplitude / Takahashi Kazue and Ukhorskiy Aleksandr Y. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2008. – V. 113, A12204, doi:10.1029/2008JA013327: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/23JGR2008.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JA013327/pdf>, свободный.
25. Impact of ULF oscillations in solar wind dynamic pressure on the outer radiation belt electrons / Ukhorskiy A. Y., Anderson B. J., Takahashi K., Tsyganenko N. A. // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – V. 33, L06111, doi: 10.1029/2005GL024380: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/24GRL2006.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GL024380/pdf>, свободный.
26. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements / Baker D. N., Li X., Turner N., Allen J. H., Bargatze L. F., Blake J. B., Sheldon R. B., Spence H. E., Belian R. D., Reeves G. D., Kanekal S. G., Klecker B., Leping R. P., Ogilvie K., Mewaldt R. A., Onsager T., Singer H. J., Rostoker G. // *J. Geophys. Res.* – 1997, 102, 14,141 – 14,148, doi:10.1029/97JA00565: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/25JGRbaker1997.pdf>, свободный.
27. Energy limits of electron acceleration in the plasma sheet during substorms: A case study with the Magnetospheric Multiscale (MMS) mission / Turner D. L., Fennell J.

- F., Blake J. B., Clemmons J. H., Mauk B. H., Cohen I. J., Jaynes A. N., Craft J. V., Wilder F. D., Baker D. N., Reeves G. D., Gershman D. J., Avakov L. A., Dorelli J. C., Giles B. L., Pollock C. J., Schmid D., Nakamura R., Strangeway R. J., Russell C. T., Artemyev A. V., Runov A., Angelopoulos V., Spence H. E., Torbert R. B., and Burch J. L. // *Geophys. Res. Lett.* – 2016. – V. 43. – P. 7785 – 7794, doi: 10.1002/2016GL069691: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/26GRL2016.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016GL069691/full>, свободный.
28. Injection region propagation outside of geosynchronous orbit / Spanswick E., Reeves G. D., Donovan E., and Friedel R. H. W. // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115, A11214, doi: 10.1029/2009JA015066: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/27JGRspanswick2010.pdf>, свободный.
29. Prompt enhancement of the Earth's outer radiation belt due to substorm electron injections / Tang C. L., Zhang J.-C., Reeves G. D., Su Z. P., Baker D. N., Spence H. E., Funsten H. O., Blake J. B., Wygant J. R. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121, 11,826–11,838, doi:10.1002/2016JA023550: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/28JGRtang2016.pdf>, свободный.
30. A case study to determine the relationship of relativistic electron events to substorm injections and ULF power / Junga Hwang, Kyoung Wook Min, Ensang Lee, China Lee and Dae Young Lee // *Geophysical Research Letters.* – 2004. – V. 31, L23801, doi:10.1029/2004GL021544: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/29JGRhwang2004.pdf>, свободный.
31. Source and seed populations for relativistic electrons: Their roles in radiation belt changes / Jaynes A. N., Baker D. N., Singer H. J. et al. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2015. – V. 120. – P. 7240 – 7254, doi:10.1002/2015JA021234: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/25JGR2015.pdf>, свободный.
32. Multisatellite determination of the relativistic electron phase space density at geosynchronous orbit: Methodology and results during geomagnetically quiet times / Chen Y., Friedel R. H. W., Reeves G. D., Onsager T. G., and Thomson M. F. // *J. Geophys. Res.* – 2005. – V. 110, A10210, doi:10.1029/2004JA010895: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/31JGRchen2005.pdf>, свободный.
33. Relativistic electrons in the outer radiation belt: Differentiating between acceleration mechanisms // Green Janet C., Kivelson M. G. // *Journal of Geophysical Research.* – 2004. – V. 109, A03213, doi:10.1029/2003JA010153: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/32JPGgreen2004.pdf>, свободный.
34. Radial distributions of equatorial phase space density for outer radiation belt electrons / Turner D. L., Angelopoulos V., Shprits Y., Kellerman A., Cruce P., Larson D. // *Geophysical Research Letters.* – 2012. – V. 39, L09101, doi:10.1029/2012GL051722: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/33GRLturner2012.pdf>, свободный.
35. On the storm-time evolution of relativistic electron phase space density in Earth's outer radiation belt / Turner, D. L., Angelopoulos V., Li W., Hartinger M. D., Usanova M., Mann I. R., Bortnik J., and Shprits Y. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2013. – V. 118, 2196–2212, doi:10.1002/jgra.50151: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/34JGRturner2013.pdf>, свободный.
36. Quantifying the radiation belt seed population in the March 17, 2013 electron acceleration event/ Boyd A. J., Spence H. E., Claudepierre S. G., Fennell J. F., Blake J. B., Baker D. N., Reeves G. D., and Turner D. L. // *Geophys. Res. Lett.* – 2014. – V. 41, 2275–2281, doi:10.1002/2014GL059626: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/35GRLboyd2014.pdf>, свободный.
37. Statistical properties of the radiation belt seed population / Boyd A. J., Spence H. E., Huang C.-L., Reeves G. D., Baker D. N., Turner D. L., Claudepierre S. G., Fennell J. F., Blake J. B., and Shprits Y. Y. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121, 7636–7646, doi:10.1002/2016JA022652: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/36JGRboyd2016.pdf>, свободный.
38. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle Interactions/Richard Mansergh Thorne // *Geophysical Research Letters*, 2010, vol. 37, L22107, doi:10.1029/2010GL044990: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/37GRLthorne2010.pdf>, свободный.
39. Outer zone relativistic electron acceleration associated with substorm-enhanced whistler mode chorus / Nigel P. Meredith, Horne Richard B., Iles Roger H. A., Thorne Richard M., Heynderickx Daniel, Anderson Roger R. // *Journal of Geophysical Research.* – 2002. – V. 107, NO. A7, 1144, doi:10.1029/2001JA900146: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/38JGRmeredith2002.pdf>, свободный.
40. Energy dependent dynamics of keV to MeV electrons in the inner zone, outer zone, and slot regions / Reeves Geoffrey D., Friedel Reiner H. W., Larsen Brian A., Skoug Ruth M., Funsten Herbert O., Claudepierre Seth G., Fennell Joseph F., Turner Drew L., Denton Mick H., Spence Harlan E., Blake J. Bernard, and Baker Daniel N. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121, 397–412, doi:10.1002/2015JA021569: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/27JGR2016.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JA021569/full>, свободный.
41. 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 / Turner D. L., Angelopoulos V., Li W., Bortnik J., Ni B., Ma Q., Thorne R. M., Morley S. K., Henderson M. G., Reeves G. D., Usanova M., Mann I. R., Claudepierre S. G., Blake J. B., Baker D. N., Huang C.-L., Spence H., Kurth W., Kletzing C., Rodriguez J. V. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2014. – V. 119, 1960–1979, doi:10.1002/2014JA019770: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/40JGRturner2014.pdf>, свободный.

42. Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit / Wladislaw Lyatsky and George V. Khazanov // Journal of Geophysical Research. – 2008. – V. 113, A08224, doi:10.1029/2008ja013048: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/41JGRlyatsky2008.pdf>, свободный.
43. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions: 2. Evaluation for VLF chorus, ELF hiss, and electromagnetic ion cyclotron waves / Summers Danny, Ni Binbin, Meredith Nigel P. // Journal of Geophysical Research. – 2007. – V. 112, A04207, doi:10.1029/2006ja011993: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/42JGRsummers2007.pdf>, свободный.
44. Fast dropouts of multi-MeV electrons due to combined effects of EMIC and whistler mode wave / Mourenas D., Artemyev A. V., Ma Q., Agapitov O. V., Li W. // Geophysical Research Letters. – 2016. – 43, 4155–4163. doi:10.1002/2016GL068921: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/43GRLmourenas2016.pdf>, свободный.
45. Characteristic energy range of electron scattering due to plasmaspheric hiss / Ma Q., Li W., Thorne R. M., Bortni J., Reeves G. D., Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Spence H. E., Baker D. N., Blake J. B., Fennell J. F., Claudepierre S. G., Angelopoulos V. // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – V. 121, 11,737–11, 749, doi:10.1002/2016JA023311: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d54x.ru/19/01/44JGRma2016.pdf>, свободный.

Поступила в редакцию 26.06.2017

- Иннокентий Петрович Безродных**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ИКИ РАН, т. (495) 333-38-38, e-mail: d54x@mail.ru.
- Евгения Ивановна Морозова**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ИКИ РАН, т. (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.
- Анатолий Алексеевич Петрукович**, член-корреспондент РАН, заместитель директора, ИКИ РАН, т. (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.
- Мария Николаевна Будяк**, научный сотрудник, т. (495) 366-38-38, e-mail: maboudiak@mail.ru.
- Максим Владимирович Кожухов**, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории, т. (495)366-38-38; e-mail: d18188@mail.ru.
- Владимир Тимофеевич Семёнов**, ведущий специалист, т. (495) 366-38-38, e-mail: d18188@mail.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

EVALUATION OF HIGH-SPEED RECURRENT SOLAR WIND FLUXES EFFECT ON ENERGY SPECTRA STRUCTURE OF ENERGETIC ELECTRONS ON A GEOSTATIONARY ORBIT

I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich, M. N. Budiak, M. V. Kozhukhov, V. T. Semionov

The authors have performed quantitative measurements to evaluate effects of solar wind speed and density on energy spectra structure of electron fluxes in the Earth's outer radiation belt (EORB) shaped in 2007. The research has been conducted considering sufficiently isolated high speed solar wind (SW) fluxes. In 2007, 29 electron flux rises were registered in which fluxes of relativistic electrons of ~ 2 MeV were observed. The study analyzes data obtained from the LANL–GEO Satellite (electron energy range of 24.1–2000 keV) and SW parameters of the OMNI data base. Plasma density at the leading edge of SW high speed flux served as evaluation parameter of the study. For each of 29 electron flux rises, dependence of maximum differential electron fluxes characteristics was separately analyzed vs speed and density of SW. Electron fluxes have been analyzed, considering three SW density ranges (4–6, 6–12 & 13–21 cm⁻³) for electron flux vs SE speed relations, and three SW speed ranges (400–535, 535–602 & 602–668 km/s) for electron flux vs SW density relations. Statistical analysis served as a basis to distinguish three electron energy ranges (< 100 keV, 100–500 keV) and relativistic electrons of (> 625 keV) for which significant changes of electron fluxes dynamics have been registered with changing SW speed and density. And particularly it has been demonstrated that electron fluxes of ~ 100–500 keV (seed particles) scarcely depend on SW speed and density variations. This energy area has a clearly defined top limit of ~ 500 keV electrons energy. Outside GEO, 100–500 keV electrons accelerate to 500 keV on average and form an outer source for GEO. According to our data, electron flux characteristics come over from being nearly independent on SW parameters to abruptly changing (> 625 keV) depending on SW speed and density only at an electron energy of ~ 500 keV. This value defines the actual lower limit of local resonant seed electron accelera-

tion produced by ultralow frequency waves (ULF waves) at $L \sim 5$ (L is McIlwain L -parameter; e.g., magnetic shell $L = 6$ is $6R_3$ away from the Earth's center in the plane of geomagnetic equator, where R_3 is the Earth's radius) to relativistic energies. Results of our study based on the EORB electron fluxes dynamics vs SW speed and density analysis have been proved in many other studies of phase density dynamics in the EORB electron fluxes. Analysis of electron energy spectra provided quantitative estimation of SW speed and density effects on formation of relativistic electron fluxes in the EORB. The analysis provided the following results: 1) reduction of electron flux with increasing of SW plasma density at a constant SW speed; 2) increasing of density effect with increasing of SW speed, the effect can be registered at a speed of ≤ 650 km/s; 3) at geostationary orbit, at SW speed of > 660 km/s and SW plasma density of $CB > 8 \text{ cm}^3$, high energy electron fluxes are virtually independent on SW density. The obtained results demonstrate complex balance between acceleration processes and losses resulting from interaction of electrons with ultralow frequency (ULF) and ion cyclotron (EMIC) waves. Increasing of SW plasma density causes significant power rise of EMIC-waves, which basically define speed of electron pitch-angle diffusion into the loss cone, being the maximum for relativistic electrons.

Key words: solar wind, Earth's magnetosphere, particles of radiation belts.

List of References

1. Quantifying the relative contributions of substorm injections and chorus waves to the rapid outward extension of electron radiation belt / Zhenpeng Su, Hui Zhu, Fuliang Xiao, Huinan Zheng, Yuming Wang, Q.-G. Zong, Zhaoguo He, Chao Shen, Min Zhang, Shui Wang, et al // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2014. – V.119. – Issue 12, 10,023–10,040, doi:10.1002/2014JA020709: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/01JGR2014.pdf> – open access, or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JA020709/pdf>, open access.
2. Radiation belt electron dynamics driven by adiabatic transport, radial diffusion, and wave-particle interactions / Zhenpeng Su, Fuliang Xiao, Huinan Zheng, and Shui Wang // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2011. – V. 116, A04205, doi:10.1029/2010JA016228: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/02JGR2011.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JA016228/pdf>, open access.
3. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves / Richard B. Horne, Richard M. Thorne, Sarah A. Glauert, Jay M. Albert, Nigel P. Meredith, Roger R. Anderson // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2005. – V. 110, A03225, doi: 10.1029/2004JA010811: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/03JGR2005.pdf> or at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JA010811/pdf>, open access.
4. Combined acceleration of electrons by whistler-mode and compressional ULF turbulences near the geosynchronous orbit/ Liuyuan Li, Jinbin Cao, and Guocheng Zhou // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2005. – V. 110. – P. 5105 – 5112, A03203, doi: 10.1029/2004JA010628: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/04JGR2005.pdf> or at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JA010628/pdf>, open access.
5. Simulation of energy-dependent electron diffusion processes in the Earth's outer radiation belt /. Ma Q, Li W., Thorne R. M., Nishimura Y., Zhang X.-J., Reeves G. D., Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Henderson M. G., Spence H. E., Baker D. N., Blake J. B., Fennell J. F., Angelopoulos V. // *J. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – Issue 5, doi: 10.1002/2016JA022507: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/05JGR2016.pdf>, open access.
6. Formation process of relativistic electron flux through interaction with chorus emissions in the Earth's inner magnetosphere / Yoshiharu Omura, Yu Miyashita, Masato Yoshikawa, Danny Summers, Mitsuru Hikishima, Yusuke Ebihara, Yuko Kubota//*J. Geophys. Res. Space Physics.* – V. 120. – Issue 11, November 2015. – P. 9545 – 9562, doi: 10.1002/2015JA021563: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/06JGR2015.pdf>, open access.
7. Van Allen Probes observations linking radiation belt electrons to chorus waves during 2014 multiple storms / Si Liu, Fuliang Xiao, Chang Yang, Yihua He, Qinghua Zhou, Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Spence H. E., Reeves G. D., Funsten H. O, Blake J. B., Baker D. N., J. R. Wygant // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2015. – V. 120. – Issue 2, February 2015. – P. 938 – 948, doi: 10.1002/2014JA020781: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/07JGR2015.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JA020781/pdf>, open access.
8. Prompt energization of relativistic and highly relativistic electrons during a substorm interval: Van Allen Probes observations / Foster J. C., Erickson P. J., Baker D. N., Claudepierre S. G., Kletzing C. A., Kurth W., Reeves G. D., Thaller S. A., Spence H. E., Shprits Y. Y., and Wygant J. R. // *Geophys. Res. Lett.* 2014. – V. 41. – P. 20 – 25, doi:10.1002/2013GL058438: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/08JGR2015.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013GL058438/pdf>, open access.
9. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus / Thorne R. M., Li W., Ni B., Ma Q., Bortnik J., Chen L., Baker D. N., Spence H. E., Reeves G. D., Henderson M. G., Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Blake J. B., Fennell J. F., Claudepierre S. G., Kanekal S. G. // *Nature.* – 2013, 504(7480), 411–414, doi:10.1038/nature12889: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/09nature2013.pdf>, open access.
10. Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit / Wladislaw Lyatskyl and George V. Khazanov // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2008. – V. 113, A08224, doi:10.1029/2008JA013048: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/10JGR2008.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JA013048/pdf>, open access.
11. Dynamic responses of the Earth's radiation belts during periods of solar wind dynamic pressure pulse based on normalized superposed epoch analysis / Ni B., Xiang Z., Gu X., Shprits Y. Y., Zhou C., Zhao Z., Zhang X., and Zuo P. // *J. Ge-*

ophys. Res. Space Physics. – 2016. – V. 121, 8523 – 8536, doi:10.1002/2016JA023067: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/11JGR2016.pdf>, open access.

12. Geomagnetic storms and EMIC waves: Van Allen Probe observations / Dedong Wang, Zhigang Yuan, Xiongdong Yu, Shiyong Huang, Xiaohua Deng, Meng Zhou, Haimeng Li // *J. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – Issue 7, doi:10.1002/2015JA022318: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/12JGR2016.pdf>, open access.

13. Van Allen Probes observations of electromagnetic ion cyclotron waves triggered by enhanced solar wind dynamic pressure / Lee D.-Y., Noh S.-J., Hwang J., Kim K.-C., Lee J. J., Choi C. R., Thaller S., Skoug R. // *J. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – issue 10, doi:10.1002/2016JA022841: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/13JGR2016.pdf>, open access.

14. The dependence on geomagnetic conditions and solar wind dynamic pressure of the spatial distributions of EMIC waves observed by the Van Allen Probes / Saikin A. A., Zhang J.-C., Smith C. W., Spence H. E., Torbert R. B., Kletzing C. A. // *J. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – Issue 5, doi: 10.1002/2016JA022523: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/14JGR2016.pdf>, open access.

15. Solar wind driving of magnetospheric ULF waves: Field line resonances driven by dynamic pressure fluctuations / Claudepierre S. G., Hudson M. K., Lotko W., Lyon J. G., and Denton R. E. // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115, A11202, doi:10.1029/2010JA015399: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/15JGR2010.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JA015399/pdf>, open access.

16. Van Allen Probes observation and modeling of chorus excitation and propagation during weak geomagnetic activities / Yihua He, Fuliang Xiao, Qinghua Zhou, Chang Yang, Si Liu, Baker D. N., Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Spence H. E., Reeves G. D., Funsten H. O., Blake J. B. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2015. – V. 120. – Issue 8, doi: 10.1002/2015JA021376: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/16JGR2015.pdf>, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JA021376/pdf>, open access.

17. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited / Reeves G. D., Morley S. K., Friedel R. H. W., Henderson M. G., Cayton T. E., Cunningham G., Blake J. B., Christensen R. A., and Thomsen D. // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V. 116, A02213, doi:10.1029/2010JA015735: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/17JGR2011.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JA015735/pdf>, open access.

18. Long-term variations in solar wind velocity and radiation belt electrons / Reeves Geoff, Morley Steve, and Cunningham Greg // *J. Geophys. Res.* – 2013. – V. 118, 1040 – 1048: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/18JGR2013.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgra.50126/pdf>, open access.

19. Effect of solar wind density on relativistic electrons at geosynchronous orbit / Lyatsky W., and Khazanov G. V. // *Geophys. Res. Lett.* – 2008, 35(3), L03,109, doi:10.1029/2007GL032524: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/19GRL2008.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GL032524/pdf>, open access.

20. Responses of relativistic electron fluxes in the outer radiation belt to geomagnetic storms / Xiong Y., Xie L., Pu Z., Fu S., Chen L., Ni B., Li W., Li J., Guo R., and Parks G. K. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2015. – V. 120: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/20JGR2015.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JA021440/pdf>, open access.

21. Analysis of dependence effect of energetic electron fluxes at geostationary orbit on solar wind parameters & geomagnetic activity indexes in solar cycles 22 and 23. / V. I. Degtiariov, G. V. Popov, S. E. Chudnenko // *Solar-terrestrial physics.* – Issue 23 (2013). – Pp. 64 – 74.

22. On the influence of solar wind conditions on the outer-electron radiation belt / Kellerman A. C. and Shprits Y. Y. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2012. – V. 117, A05217, doi:10.1029/2011JA017253: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/22JGR2012.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JA017253/pdf>, open access.

23. Evolution of Coronal Holes and Implications for High-Speed Solar Wind During the Minimum Between Cycles 23 and 24 / de Toma G // *Solar Phys.* – 2011. – V. 274. – P. 195 – 217: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/23SolarPhys2011.pdf>.

24. Timing analysis of the relationship between solar wind parameters and geosynchronous Pc5 amplitude / Takahashi Kazue and Ukhorskiy Aleksandr Y. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2008. – V. 113, A12204, doi:10.1029/2008JA013327: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/23JGR2008.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JA013327/pdf>, open access.

25. Impact of ULF oscillations in solar wind dynamic pressure on the outer radiation belt electrons / Ukhorskiy A. Y., Anderson B. J., Takahashi K., Tsyganenko N. A. // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – V. 33, L06111, doi: 10.1029/2005GL024380: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/24GRL2006.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GL024380/pdf>, open access.

26. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements / Baker D. N., Li X., Turner N., Allen J. H., Bargatze L. F., Blake J. B., Sheldon R. B., Spence H. E., Belian R. D., Reeves G. D., Kanekal S. G., Klecker B., Lepping R. P., Ogilvie K., Mewaldt R. A., Onsager T., Singer H. J., Rostoker G. // *J. Geophys. Res.* – 1997, 102, 14,141 – 14,148, doi:10.1029/97JA00565: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/25JGRbaker1997.pdf>, open access.

27. Energy limits of electron acceleration in the plasma sheet during substorms: A case study with the Magnetospheric Multiscale (MMS) mission / Turner D. L., Fennell J. F., Blake J. B., Clemmons J. H., Mauk B. H., Cohen I. J., Jaynes A. N., Craft J. V., Wilder F. D., Baker D. N., Reeves G. D., Gershman D. J., Avanzo L. A., Dorelli J. C., Giles B. L., Pollock C. J., Schmid D., Nakamura R., Strangeway R. J., Russell C. T., Artemyev A. V., Runov A., Angelopoulos V., Spence H. E., Torbert R. B., and Burch J. L. // *Geophys. Res. Lett.* – 2016. – V. 43. – P. 7785 – 7794, doi: 10.1002/2016GL069691: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/26GRL2016.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016GL069691/full>, open access.
28. Injection region propagation outside of geosynchronous orbit / Spanswick E., Reeves G. D., Donovan E., and Friedel R. H. W. // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115, A11214, doi: 10.1029/2009JA015066: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/27JGRspanswick2010.pdf>, open access.
29. Prompt enhancement of the Earth's outer radiation belt due to substorm electron injections / Tang C. L., Zhang J.-C., Reeves G. D., Su Z. P., Baker D. N., Spence H. E., Funsten H. O., Blake J. B., Wygant J. R. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121, 11,826–11,838, doi:10.1002/2016JA023550: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/28JGRtang2016.pdf>, open access.
30. A case study to determine the relationship of relativistic electron events to substorm injections and ULF power / Junga Hwang, Kyoung Wook Min, Ensang Lee, China Lee and Dae Young Lee // *Geophysical Research Letters.* – 2004. – V. 31, L23801, doi:10.1029/2004GL021544: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/29JGRhwang2004.pdf>, open access.
31. Source and seed populations for relativistic electrons: Their roles in radiation belt changes / Jaynes A. N., Baker D. N., Singer H. J. et al. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2015. – V. 120. – P. 7240 – 7254, doi:10.1002/2015JA021234: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/25JGR2015.pdf>, open access.
32. Multisatellite determination of the relativistic electron phase space density at geosynchronous orbit: Methodology and results during geomagnetically quiet times / Chen Y., Friedel R. H. W., Reeves G. D., Onsager T. G., and Thomsen M. F. // *J. Geophys. Res.* – 2005. – V. 110, A10210, doi:10.1029/2004JA010895: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/31JGRchen2005.pdf>, open access.
33. Relativistic electrons in the outer radiation belt: Differentiating between acceleration mechanisms // Green Janet C., Kivelson M. G. // *Journal of Geophysical Research.* – 2004. – V. 109, A03213, doi:10.1029/2003JA010153: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/32JPGgreen2004.pdf>, open access.
34. Radial distributions of equatorial phase space density for outer radiation belt electrons / Turner D. L., Angelopoulos V., Shprits Y., Kellerman A., Cruce P., Larson D. // *Geophysical Research Letters.* – 2012. – V. 39, L09101, doi:10.1029/2012GL051722: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/33GRLturner2012.pdf>, open access.
35. On the storm-time evolution of relativistic electron phase space density in Earth's outer radiation belt / Turner, D. L., Angelopoulos V., Li W., Hartinger M. D., Usanova M., Mann I. R., Bortnik J., and Shprits Y. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2013. – V. 118, 2196–2212, doi:10.1002/jgra.50151: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/34JGRturner2013.pdf>, open access.
36. Quantifying the radiation belt seed population in the March 17, 2013 electron acceleration event / Boyd A. J., Spence H. E., Claudepierre S. G., Fennell J. F., Blake J. B., Baker D. N., Reeves G. D., and Turner D. L. // *Geophys. Res. Lett.* – 2014. – V. 41, 2275 – 2281, doi:10.1002/2014GL059626: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/35GRLboyd2014.pdf>, open access.
37. Statistical properties of the radiation belt seed population / Boyd A. J., Spence H. E., Huang C.-L., Reeves G. D., Baker D. N., Turner D. L., Claudepierre S. G., Fennell J. F., Blake J. B., and Shprits Y. Y. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121, 7636–7646, doi:10.1002/2016JA022652: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/36JGRboyd2016.pdf>, open access.
38. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle Interactions/Richard Mansergh Thorne // *Geophysical Research Letters*, 2010, vol. 37, L22107, doi:10.1029/2010GL044990: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/37GRLthorne2010.pdf>, open access.
39. Outer zone relativistic electron acceleration associated with substorm-enhanced whistler mode chorus / Nigel P. Meredith, Horne Richard B., Iles Roger H. A., Thorne Richard M., Heynderickx Daniel, Anderson Roger R. // *Journal of Geophysical Research.* – 2002. – V. 107, NO. A7, 1144, doi:10.1029/2001JA900146: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/38JGRmeredith2002.pdf>, open access.
40. Energy dependent dynamics of keV to MeV electrons in the inner zone, outer zone, and slot regions / Reeves Geoffrey D., Friedel Reiner H. W., Larsen Brian A., Skoug Ruth M., Funsten Herbert O., Claudepierre Seth G., Fennell Joseph F., Turner Drew L., Denton Mick H., Spence Harlan E., Blake J. Bernard, and Baker Daniel N. // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121, 397 – 412, doi:10.1002/2015JA021569: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/27JGR2016.pdf> or at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JA021569/full>, open access.
41. 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 / Turner D. L., Angelopoulos V., Li W., Bortnik J., Ni B., Ma Q., Thorne R. M., Morley S. K., Henderson M. G., Reeves G. D., Usanova M., Mann I. R., Claudepierre S. G., Blake J. B., Baker D.

N., Huang C.-L., Spence H., Kurth W., Kletzing C., Rodriguez J. V. // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2014. – V. 119, 1960 – 1979, doi:10.1002/2014JA019770: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/40JGRturner2014.pdf>, open access.

42. Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit / Wladislaw Lyatsky and George V. Khazanov // Journal of Geophysical Research. – 2008. – V. 113, A08224, doi:10.1029/2008ja013048: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/41JGRlyatsky2008.pdf>, open access.

43. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions: 2. Evaluation for VLF chorus, ELF hiss, and electromagnetic ion cyclotron waves / Summers Danny, Ni Binbin, Meredith Nigel P. // Journal of Geophysical Research. – 2007. – V. 112, A04207, doi:10.1029/2006ja011993: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/42JGRsummers2007.pdf>, open access.

44. Fast dropouts of multi-MeV electrons due to combined effects of EMIC and whistler mode wave / Mourenas D., Artemyev A. V., Ma Q., Agapitov O. V., Li W. // Geophysical Research Letters. – 2016. – 43, 4155 – 4163. doi:10.1002/2016GL068921: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/43GRLmourenas2016.pdf>, open access.

45. Characteristic energy range of electron scattering due to plasmaspheric hiss / Ma Q., Li W., Thorne R. M., Bortni J., Reeves G. D., Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B., Spence H. E., Baker D. N., Blake J. B., Fennell J. F., Claud-epierre S. G., Angelopoulos V. // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – V. 121, 11,737 – 11, 749, doi: 10.1002/2016JA023311: [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/19/01/44JGRma2016.pdf>, open access.

Innokentii Petrovich Bezrodnykh,

Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D. (Phys.-Math.)),

Senior Researcher,

IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences),

tel.: (495)333-38-38,

e-mail: d54x@mail.ru.

Evgeniia Ivanovna Morozova,

Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D. (Phys.-Math.)),

Senior Researcher,

IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences),

tel.: +7(495)333-20-00,

e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.

Anatolii Alexeevich Petrukovich,

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,

Deputy Director General,

IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences),

tel.: (495) 333-32-67,

e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.

Maria Nikolaevna Budiak,

Researcher,

tel.: (495) 366-38-38,

e-mail: maboudiak@mail.ru.

Maxim Vladimirovich Kozhukhov,

Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D. (Phys.-Math.)),

Head of Laboratory,

tel.: (495)366-38-3800,

e-mail: d18188@mail.ru.

Vladimir Timofeevich Semionov,

Leading Specialist,

tel.: (495)366-38-38,

e-mail: d18188@mail.ru

(JC «VNIEM Corporation»).