

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 537.591

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ И ПЛОТНОСТИ РЕКУРРЕНТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ИНДЕКСОВ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ (Kp- И DST-ИНДЕКСОВ) НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович

*Динамические вариации потоков электронов отражают сложный баланс конкурирующих механизмов ускорения и потерь частиц, эффективность которых определяется как параметрами солнечного ветра (СВ), так и параметрами магнитосферы, определяющими геомагнитную активность (индексами геомагнитной активности, в частности, Kp- и Dst-индексами). Работа посвящена исследованию связи динамики потоков электронов с вариациями параметров СВ и Kp- и Dst-индексов. В работе рассматриваются 29 возрастаний потоков электронов ВРПЗ, сформированных в 2007 г. при воздействии высокоскоростных рекуррентных потоков СВ, использованы данные спутника LANL-GEO, база данных OMNI для параметров солнечного ветра и геомагнитной активности (Kp- и Dst-индексы). В работе проведён анализ и получены количественные оценки влияния вариаций скорости V и плотности N солнечного ветра и Kp- и Dst-индексов геомагнитной активности на формирование интенсивности максимальных потоков электронов 31,7 кэВ (электроны источника), 270 кэВ («зародышевые» электроны) и 925 кэВ (релятивистские электроны). Диапазоны вариаций параметров: скорость СВ – 400 – 670 км/с; плотность СВ – 6 – 20 см<sup>-3</sup>; Kp-индекс – 15 – 30 единиц; |Dst|-индекс – 3 – 32 нТ. Для анализа выделены следующие пять пар параметров: скорость V и Kp-индекс, скорость V и Dst-индекс, скорость V и плотность N, плотность N и Kp-индекс, плотность N и Dst-индекс. Для каждой выделенной пары анализируется изменение интенсивности потока электронов при изменении одного из параметров при постоянной величине другого. В работе показана связь изменений интенсивности с изменением соотношения абсолютных величин выделенных параметров. Результаты получены в численном виде. В частности, при анализе вариаций потоков электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ показано, что при увеличении скорости V при постоянной плотности N (увеличение интенсивности ~ 80% для электронов 31,7 кэВ и ~ 260% для 925 кэВ для N = 14 см<sup>-3</sup>) вариации потоков электронов значительно превышают вариации потоков при увеличении плотности при постоянной скорости (уменьшение интенсивности ~ 30% для электронов 31,7 кэВ и ~ 45% для 925 кэВ для V = 540 км/с). При увеличении скорости V и Dst-индекса потоки электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ увеличиваются. Вариации потоков при увеличении Dst-индекса при постоянной скорости превышают ~ в 2 раза вариации потоков при увеличении скорости при постоянных величинах Dst-индекса. Анализ показал близкое подобие (функциональное, но не численное) динамики потоков электронов 31,7 кэВ (электронов источника) и релятивистских электронов при изменении скорости и плотности СВ и геомагнитных индексов, но для всех соотношений параметров для электронов 925 кэВ вариации интенсивности больше. Потоки электронов 270 кэВ увеличиваются при увеличении плотности и достигают максимальной величины ~ 2,9·10<sup>3</sup> эл·см<sup>-2</sup>·с·стер при N ~ 12 – 18 см<sup>-3</sup> и далее при увеличении плотности эта величина не меняется (в пределах 10%) и не зависит от вариаций скорости СВ (400 – 640 км/с), Kp-индекса (15 – 30 единиц) и |Dst|-индекса (3 – 20 нТ). Фактически, это отражает тот факт, что основное увеличение потока «зародышевых» электронов происходит в области источника.*  
**Ключевые слова:** солнечный ветер, внешний радиационный пояс Земли, индексы геомагнитной активности, дифференциальные потоки релятивистских электронов на геостационарной орбите.

### Введение

Структура потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) формируется под влиянием целого ряда конкурирующих процессов ускорения и потерь частиц, которые возникают внутри магнитосферы и на её границах при воздействии солнечного ветра (СВ). Целью нашей работы является анализ и получение количественных оценок влияния скорости и плотности солнечного ветра (СВ) и индексов геомагнитной активности (Kp- и Dst-индексов) на формирование основных составляющих структуры энергетических спектров потоков электронов ВРПЗ: электронов источника (энергия <50 кэВ), зародышевых электронов (энергия 150 – 500 кэВ) и релятивистских электронов. Такое деление достаточно условно и определяется типами и

последовательностью (три этапа) основных физических механизмов, ответственных за формирование данной группы частиц [1]. Электроны источника – это электроны плазменного слоя, которые возникают при суббуревой инжекции и повышенной глобальной магнитосферной конвекции и ускоряются в диполяризационных процессах – первый этап [2 – 7].

Электроны источника с энергиями <10 кэВ имеют анизотропное угловое распределение и генерируют электромагнитные волны с частотами  $0,1f_{Гч} < f < 0,8f_{Гч}$  ( $f_{Гч}$  – гирочастота электронов) [8, 9, 10]. Это дискретная когерентная вистлеровская мода волн, так называемые волны хоров (chorus waves – СН-волны), регистрируемые в магнитосфере Земли в диапазоне частот ~ от 0,1 Гц до нескольких кГц. СН-волны резонансно взаимодействуют с высоко-

энергичными электронами источника (30 – 300 кэВ), которые также инжектируются в суббури [11, 12, 13]. Ускоренные СН-волнами электроны источника образуют популяцию «зародышевых» (seed) электронов (150 – 500 кэВ). В процессе радиальной диффузии зародышевые электроны плазменного слоя заполняют внутреннюю магнитосферу ( $L \sim 3 - 8$ ) и формируют внешний источник для ВРПЗ [14, 15, 16] – это второй этап. Для обозначения номера магнитной оболочки, мы использовали параметр  $L$  – это параметр Мак-Илвейна, например, магнитная оболочка  $L = 3$  удалена в плоскости геомагнитного экватора от центра Земли на 3 радиуса Земли.

Заключительный (третий) этап формирования потоков релятивистских электронов ВРПЗ определяется локальным резонансным ускорением зародышевых электронов СН-волнами в ВРПЗ (на  $L \approx 4 - 5$ ) [17, 18, 19]. Далее радиальная диффузия (результат рассеяния электронов при дрейфовом резонансе с ULF (Ultra Low Frequency) волнами – частоты  $10^{-3} - 10^{-4}$  Гц) перераспределяет электроны по  $L$ -оболочкам [20 – 24].

Структура потоков электронов ВРПЗ формируется, когда в магнитосфере Земли при воздействии потоков СВ возникает сложный комплекс физических процессов – магнитные бури (длительная суббуревая активность), генерация электромагнитных волн достаточной мощности (СН-волны, ULF-волны), ускорение зародышевых электронов [25, 26]. Скорость и плотность СВ, а также направление межпланетного магнитного поля (ММП) являются основными параметрами, определяющими вероятность возникновения и эффективность этих процессов. Перестройка структуры магнитосферы при воздействии высокоскоростных потоков СВ сопровождается значительным изменением крупномасштабной конвекции магнитосферной плазмы и изменением и усилением внутримангнитосферных токовых систем, что, в свою очередь, вызывает значительные вариации магнитосферного магнитного поля. Для анализа динамики магнитосферного магнитного поля используются индексы геомагнитной активности (как правило, это  $Kp$ -,  $Dst$ -,  $AE$ - и  $SIM-H$ -индексы), которые дают численную информацию (с разным временным разрешением) о долготно-широтных и временных (утро – вечер) о вариациях магнитного поля внутри магнитосферы [27, 28, 29]. Индексы геомагнитной активности отражают некоторую среднюю опосредованную картину влияния параметров СВ на систему магнитосферных токов и течений плазмы в магнитосфере. Поэтому формирование структуры потоков частиц

в радиационных поясах может рассматриваться в терминах корреляционных связей с геомагнитными индексами, при этом уровень геомагнитной активности задается величинами геомагнитных индексов. Минимум  $SIM-H$ -индекса часто используется как мера мощности магнитной бури, максимум величины  $AE$ -индекса (минимум  $Dst$ -индекса) характеризует интенсивность суббури. Динамика  $Kp$ -индекса характеризует общую динамику глобального магнитосферного магнитного поля. Подробный анализ влияния минимума  $Dst$  на распределение потоков релятивистских электронов (электронов с энергиями более 600 кэВ) по  $L$ -оболочкам проведён в работах [30, 31]. Зависимость потоков высыпающихся электронов  $>30$  кэВ и  $>300$  кэВ от динамики  $Dst$ -индекса рассмотрена в работе [32]. Радиальная диффузия является основным физическим механизмом, ответственным за распределение по  $L$ -оболочкам ускоренных в ВРПЗ электронов. В работах [21 – 24] показано, что средняя спектральная мощность ULF (частоты волн  $10^{-3} - 10^{-4}$  Гц) определяет величины коэффициентов диффузии и с хорошей точностью коэффициенты диффузии частиц можно связать с вариациями магнитосферного магнитного поля на частотах  $10^{-3} - 10^{-4}$  Гц, т. е. с величиной  $Kp$ -индекса. Вопрос об использовании  $Kp$ -индекса в качестве основного параметра для описания радиальной диффузии рассмотрен в работе [21]. Была проведена оценка вклада отдельных параметров в общую мощность ULF-волн. Для  $Kp$ - и  $Dst$ -индексов он равен соответственно  $\sim 0,82\%$  и  $0,75\%$  от общей мощности на  $L = 5$ , суммарный вклад скорости СВ и динамического давления составляет  $< 50\%$  мощности и падает при увеличении  $L$ . Как результат, предлагается включить  $Dst$ -индекс в качестве дополнительного параметра для оценки мощности ULF-волн и, соответственно, при вычислении коэффициентов диффузии. Статистический анализ корреляции между геомагнитными индексами  $SIM-H_{\min}$  и  $AE_{\max}$  и фазовой плотностью потоков релятивистских электронов ( $\mu = 630, 1096, 2290, 3311$  МэВ/Гаусс,  $\mu$  – первый адиабатический инвариант) для  $L^* = 4,0, 4,5$  и  $5$  проведён в работе [33]. Средний (по всем событиям) для всех  $\mu$  коэффициент корреляции максимума фазовой плотности на  $L^* = 4,0$  и  $SIM-H$  индекса равен  $\approx 0,69$ . При увеличении  $\mu$  и увеличении  $L^*$  коэффициент корреляции уменьшается. В работе показано, что коэффициент корреляции между фазовой плотностью и  $SIM-H$ -индексом увеличивается (до значений  $>0,8$ ) при увеличении значения  $AE$ -индекса, т. е. зависит от уровня суббуревой активности. Сравнительный анализ влия-

ния скорости СВ, плотности СВ,  $B_z$ -компоненты ММП и геомагнитных индексов  $SIM-H$  и  $AL$  на структуру потоков электронов проведён в работе [34]. Для всех параметров рассчитаны коэффициенты корреляции с фазовой плотностью электронов, показано, что коэффициенты корреляции зависят от величины первого адиабатического инварианта (диапазон  $\mu \approx 10 - 10000$  МэВ/Гс) и  $L^*$ -оболочки (диапазон  $L^* \approx 3 - 6$ ). Среди параметров СВ скорость имеет максимальный коэффициент корреляции с фазовой плотностью электронов. Коэффициенты корреляции геомагнитных индексов  $SIM-H$  и  $AL$  выше, чем у параметров СВ. Это означает, что геомагнитная активность определяет структуру потоков электронов в большей степени, чем параметры СВ. Динамика потоков частиц в радиационных поясах тесно связана с вариациями параметров потоков СВ (скорости, плотности, направления ММП). Статистический анализ связи вариаций потоков релятивистских электронов (диапазон энергии 1,8 – 3,5 МэВ, период 1980 – 2010 гг.) со скоростью проведён в работах [35, 36]. Высокая скорость СВ является необходимым, но недостаточным условием увеличения потоков электронов. Долговременные тренды в зависимости наиболее вероятных величин потоков от скорости достаточно линейны и могут быть связаны с числом наиболее вероятных структур в потоках СВ. Сделан вывод, что для отдельных событий эта зависимость не линейна и требует привлечения дополнительных параметров для анализа влияния процессов ускорения и потерь частиц. Тот же набор данных, что и в работах [35, 36], но с использованием методов информационной теории был проанализирован в работе [37]. Показано, что информационный вклад в динамику электронов, в основном, определяется скоростью СВ (~36%), для модуля ММП и для плотности СВ он меньше: ~18% и ~13%. Для объяснения сложной и часто неоднозначной связи структуры потоков релятивистских электронов ВРПЗ со скоростью СВ многими авторами проводился анализ влияния плотности СВ на динамику потоков электронов ВРПЗ. В работе [38] при изучении данных спутников GOES-8 и GOES-10 было показано, что плотность СВ эффективно контролирует величину потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите (определяет потери частиц) и самые большие потоки электронов регистрируются в условиях низкой плотности СВ. 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 [39] (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 ~ для 60% случаев, плотность СВ ~ 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 [40]. Для анализа использовалась база данных (~ 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 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. Зависимость динамики фазовой плотности релятивистских электронов >1 МэВ (период 2012 – 2015 гг., данные двух спутников Van Allen) от параметров СВ рассмотрена в работе [41]. Самые эффективные условия для ускорения релятивистских электронов наблюдаются, когда одновременно реализуются – высокая скорость и низкая плотность СВ при продолжительном периоде южной компоненты ММП. В работе [42] проведён анализ влияния плотности и скорости СВ (как независимых параметров) на структуру потоков электронов ВРПЗ, сформированных при воздействии высокоскоростных рекуррентных потоков СВ (данные спутника LAN-GEO). Было показано, что три энергетических группы электронов: электроны источника (энергия <50 кэВ), «зародышевые» электроны (энергия 100 – 500 кэВ) и релятивистские электроны различаются по типу зависимости от плотности и скорости СВ. Потоки электронов ~ 100 – 500 кэВ практически не зависят от вариаций параметров скорости и плотности СВ. 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. При анализе энергетических спектров электронов были получены количественные оценки вариаций скорости и плотности СВ на формирование энерге-

тических спектров 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  $\leq 650$  км/с.

В данной работе мы рассматриваем влияние скорости и плотности СВ и геомагнитных индексов на формирование основных составляющих структуры энергетических спектров потоков электронов ВРПЗ: электронов источника (энергия  $< 50$  кэВ), «зародышевых» электронов (энергия 150 – 500 кэВ) и релятивистских электронов. В работе проведён анализ энергетических спектров для 29 возрастных потоков электронов ВРПЗ, зарегистрированных в 2007 г. при воздействии рекуррентных потоков СВ [43].

### Экспериментальные данные

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]), база данных OMNI для параметров солнечного ветра (сайт [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html]), база данных по геомагнитной активности (сайт [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html]). Для всех параметров использованы среднесуточные значения. Для трёх дифференциальных каналов (31,7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ) проведён анализ динамики потоков электронов при изменении четырёх управляющих параметров: скорости и плотности СВ и геомагнитных индексов  $Kp$  и  $Dst$ . Выбор электронов этих энергий основан на результатах, полученных в работах [40, 42]. Исследования показали, что имеется три группы электронов, для которых регистрируются значительные отличия в динамике потоков при изменении параметров СВ:  $< 100$  кэВ, 100 – 407,5 кэВ и  $> 625$  кэВ (релятивистские электроны). Анализ показал, что внутри каждой группы отличия в динамике потоков незначительны. Электроны 31,7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ можно рассматривать как типичных представителей (по типу зависимости от параметров СВ) каждой группы частиц – электронов источника, зародышевых частиц и релятивистских электронов. Мы рассмотрели связь максимальных дифференциальных потоков электронов 31,7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ с максимальными величинами скорости и плотности СВ и максимальными величинами  $Kp$ - и  $Dst$ -индексов, зарегистрированными в каждом событии. На рис. 1 для трёх дифференциальных каналов электронов 31,7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ (25 событий) представ-

лены зависимости интенсивности потоков электронов от плотности  $N$  см<sup>-3</sup> (рис.1, а),  $Kp$ -индекса (рис.1, б), скорости  $V$  км/с (рис. 1, в) и модуля  $|Dst|$ -индекса (рис. 1, г) и для каждой кривой указаны коэффициенты корреляции. Для каждого параметра максимальный коэффициент корреляции зарегистрирован для потоков электронов 925 кэВ, минимальный – для потоков электронов 270 кэВ. Важно оценить вклад каждого параметра или их комбинации в формирование структуры энергетических спектров электронов ВРПЗ. Для выделения влияния отдельных параметров мы разделили все события на 12 подгрупп: три диапазона для скорости СВ (400 – 535 км/с, 535 – 602 км/с, 602 – 670 км/с, средние значения скорости равны, соответственно, 470 км/с, 570 км/с, 640 км/с); три диапазона для  $Kp$ -индекса (15 – 20, 21 – 25, 26 – 30, средние в диапазонах значения  $Kp$ -индекса, соответственно, равны 18, 23, 28); три диапазона для плотности СВ ( $6 - 9$  см<sup>-3</sup>,  $9 - 12$  см<sup>-3</sup>,  $13 - 20$  см<sup>-3</sup>, средние в диапазонах значения плотности, соответственно, равны  $7,5$  см<sup>-3</sup>,  $10,5$  см<sup>-3</sup>,  $16,5$  см<sup>-3</sup>) и три диапазона для модуля  $Dst$ -индекса (3 – 12 нТ, 14 – 20 нТ, 24 – 32 нТ, средние в диапазонах величины модуля  $Dst$ -индекса, соответственно, равны 7,5 нТ, 10,5 нТ, 16,5 нТ).

Для каждой выделенной подгруппы были построены графики, показывающие динамику дифференциальных потоков электронов 31,7, 270 и 925 МэВ при изменении трёх остальных параметров. На рис. 2 представлена зависимость потоков электронов от  $Kp$ -индекса (рис. 2, а, б и в), плотности  $N$  см<sup>-3</sup> (рис. 2, г, д и е) и модуля  $Dst$ -индекса (рис. 2, ж, з и и) для трёх подгрупп скорости  $V$  (400 – 535 км/с, 535 – 602 км/с, 602 – 670 км/с). На рис. 3 представлена зависимость потоков электронов от скорости  $V$  км/с (рис. 3, а, б, в), плотности  $N$  см<sup>-3</sup> (рис. 3, г, д, е) и модуля  $Dst$ -индекса (рис. 3, ж, з, и) для трёх подгрупп  $Kp$ -индекса (15 – 20, 21 – 25, 26 – 30). На рис. 4 представлена зависимость потоков электронов от  $Kp$ -индекса (рис. 4, а, б, в), скорости  $V$  км/с (рис. 4, г, д, е) и модуля  $Dst$ -индекса (рис. 4, ж, з, и) для трёх подгрупп плотности ( $6 - 9$  см<sup>-3</sup>,  $9 - 12$  см<sup>-3</sup>,  $13 - 20$  см<sup>-3</sup>). На рис. 5 представлена зависимость потоков электронов от плотности  $N$  см<sup>-3</sup> (рис. 5, а, б, в), скорости  $V$  км/с (рис. 5 г, д, е) и  $Kp$ -индекса (рис. 5, ж, з, и) для трёх подгрупп  $Dst$ -индекса ((3 – 12, 14 – 20, 24 – 32). В качестве примера использования полученных зависимостей рассмотрим связь динамики потоков электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ с вариациями скорости и  $Kp$ -индекса. Влияние  $Kp$ -индекса на изменение зависимости потоков от скорости можно получить из рис. 2, а, б и в.

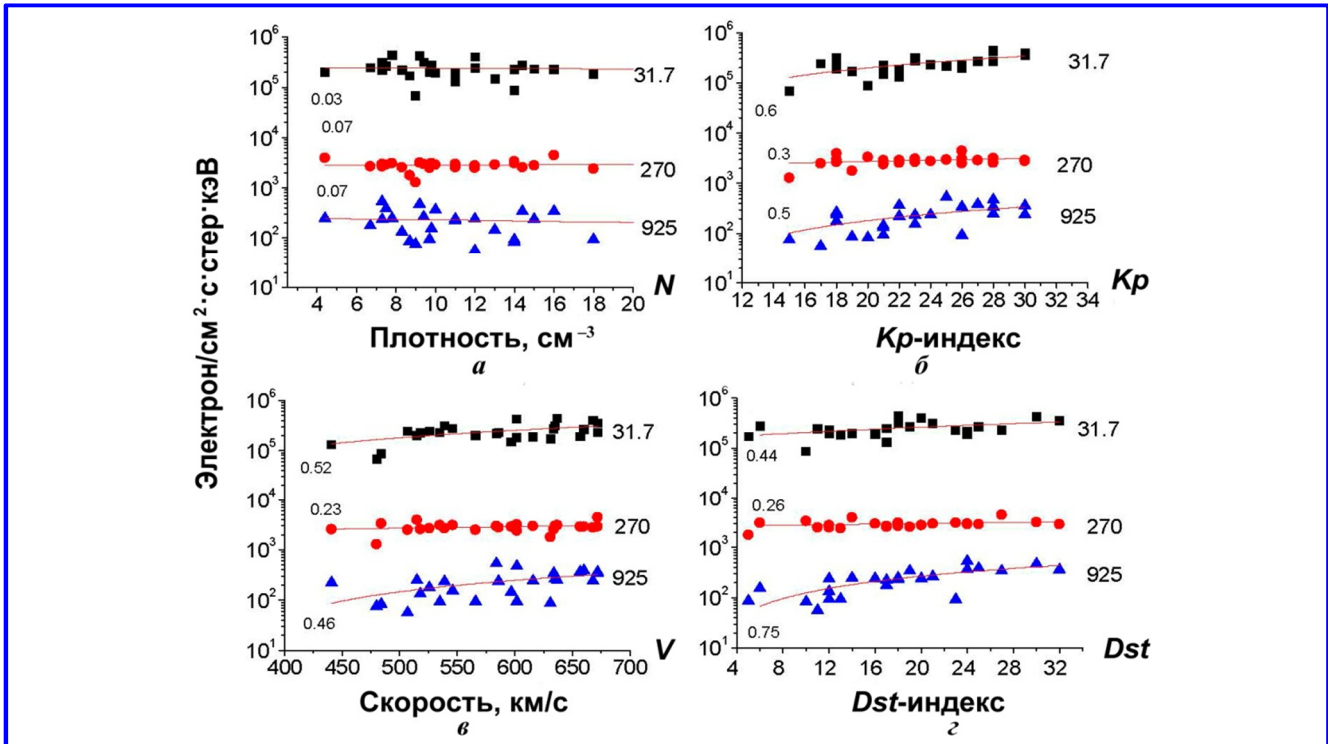


Рис. 1. Динамика дифференциальных потоков электронов при изменении плотности  $N$ , см<sup>-3</sup> (рис. 1, а),  $Kp$ -индекса (рис. 1, б), скорости  $V$ , км/с (рис. 1, в) и модуля  $Dst$ -индекса (рис. 1, г). Для каждой кривой справа указаны энергии электронов в кэВ, слева коэффициенты линейной корреляции

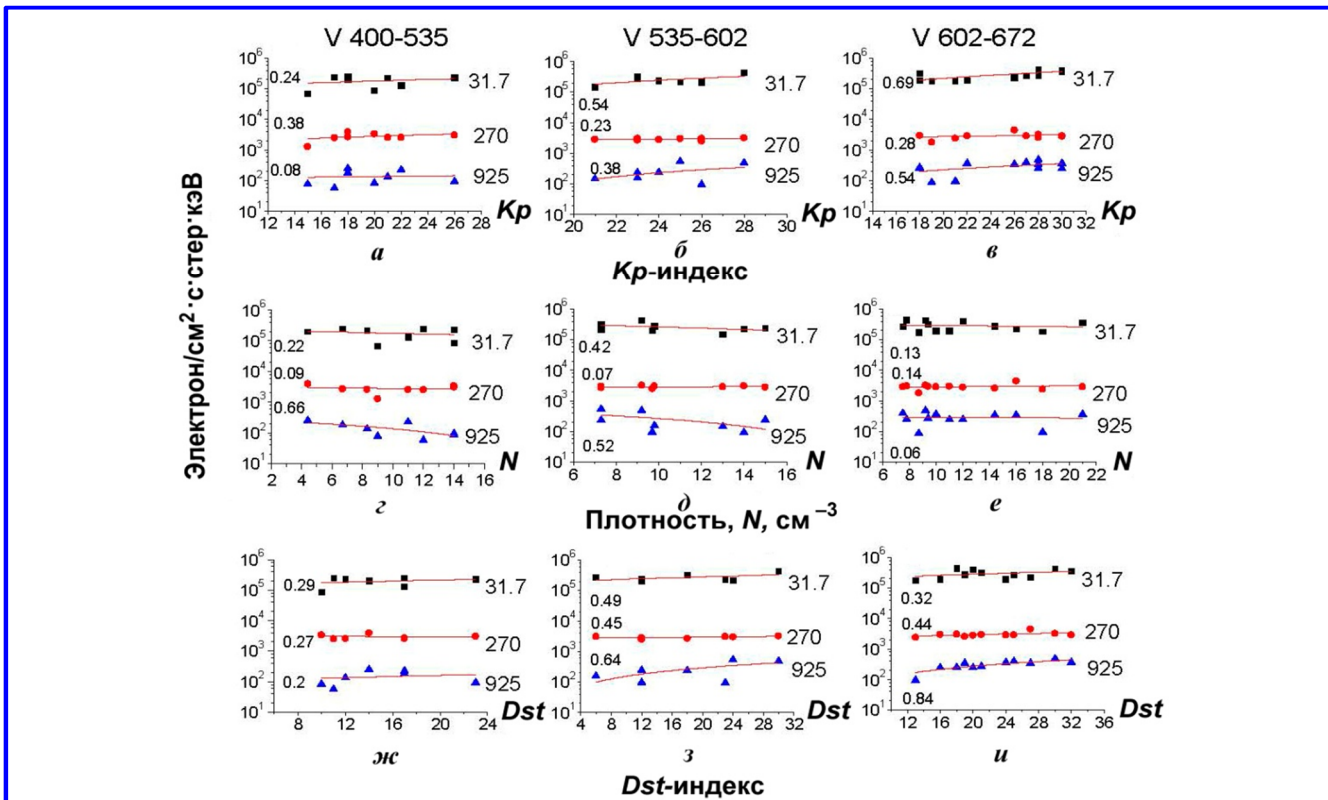


Рис. 2. Зависимость дифференциальных потоков электронов от  $Kp$ -индекса (рис. 2, а, б и в), плотности СВ в см<sup>-3</sup> (рис. 2, г, д и е) и модуля  $Dst$ -индекса (рис. 2, ж, з, и) для трёх подгрупп скорости СВ (400 – 535 км/с, 535 – 602 км/с и 602 – 670 км/с). Для каждой кривой справа указаны энергии электронов в кэВ, слева коэффициенты линейной корреляции

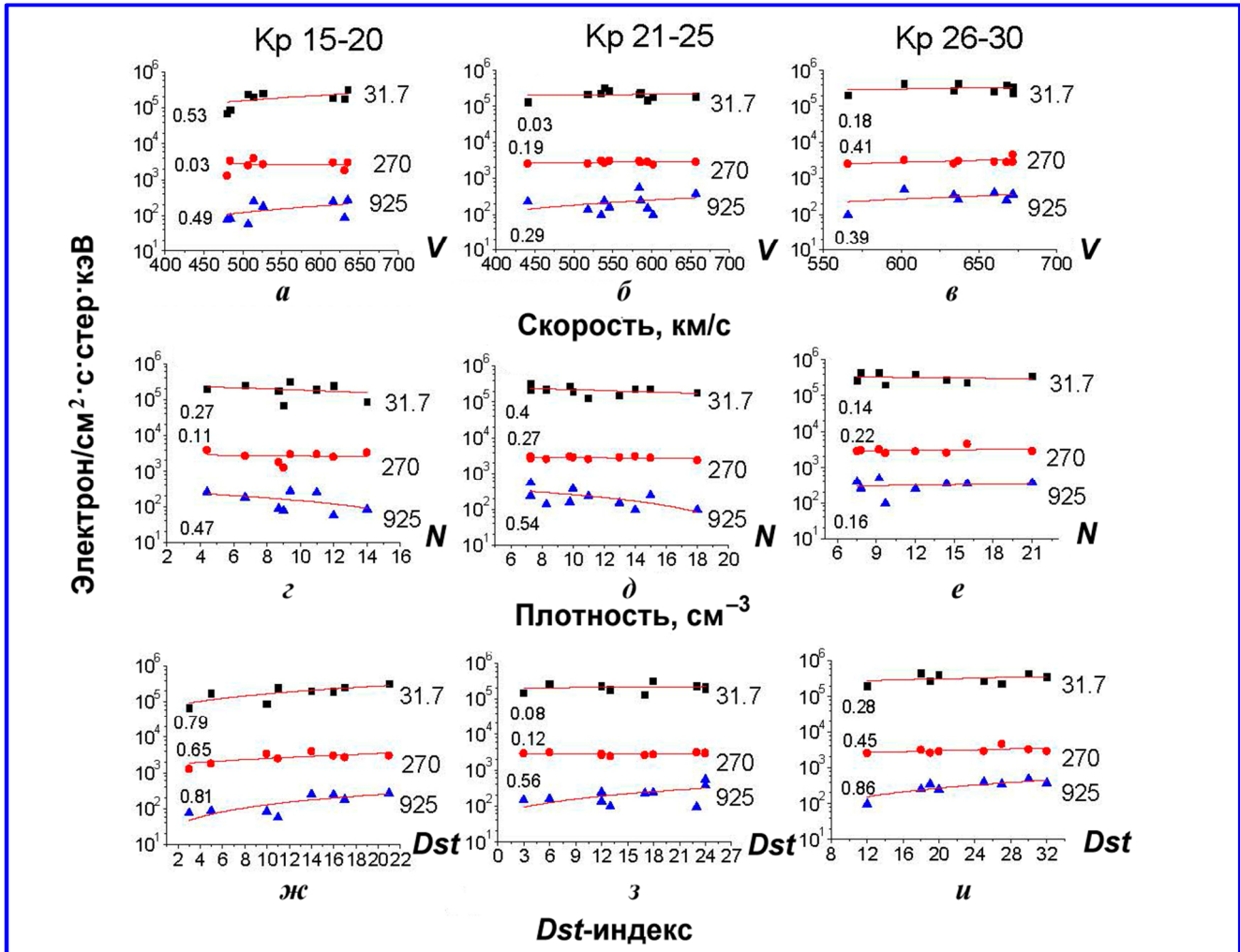


Рис. 3. Зависимость дифференциальных потоков электронов от скорости  $V$  км/с (рис. 3, а, б, в), плотности  $\text{см}^{-3}$  (рис. 3, з, д, е) и модуля  $Dst$ -индекса (рис. 3, ж, з, и) для трёх подгрупп  $Kp$ -индекса (15 – 20, 21 – 25, 26 – 30). Для каждой кривой справа указаны энергии электронов в кэВ, слева коэффициенты линейной корреляции

В частности получено, что при увеличении скорости СВ от 400 км/с до 670 км/с интенсивность потоков электронов 31,7 кэВ увеличивается на 25% при  $Kp = 21$  и на 40% для  $Kp = 26$ , соответствующие величины для электронов 925 кэВ равны 70% и 110%. Вклад увеличения  $Kp$  от 21 до 26 единиц в увеличение потоков электронов составляет ~15% для электронов 31,7 кэВ и ~40% для электронов 925 кэВ. Влияние скорости на изменение зависимости интенсивности электронов от  $Kp$  получено при анализе рис. 3, а, б, в. При увеличении  $Kp$ -индекса от 15 до 28 единиц интенсивность электронов 31,7 кэВ увеличивается ~ на 45% для скорости  $V = 570$  км/с и на 30% для  $V = 640$  км/с, соответствующие величины для электронов 925 кэВ равны ~35% и ~45%. Аналогичным способом при сравнении рисунков были выделены и другие зависимости: скорость  $V$  и плотность  $N$  – рис. 2, з, д, е и 4, з, д, е;

скорость  $V$  и  $Dst$ -индекс – рис. 2, ж, з, и и 5, з, д, е; плотность  $N$  и  $Kp$ -индекс – рис. 3, з, д, е и 4, з, д, е; плотность  $N$  и  $Dst$ -индекс – рис. 4, ж, з, и и 5, а, б, в.

**Динамика потоков электронов 31,7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ.** При анализе влияния на структуру энергетических спектров электронов ВРПЗ вариаций скорости СВ (диапазон 400 – 670 км/с), плотности СВ (диапазон 6 – 20  $\text{см}^{-3}$ ),  $Kp$ -индекса (диапазон 15 – 30 единиц) и  $Dst$ -индекса (диапазон по модулю |3-32|нТ, далее в тексте для удобства обозначение модуля не используется) получены следующие результаты.

**Скорость  $V$  и  $Kp$ -индекс.** Анализ связи динамики потоков электронов 31,7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ с динамикой скорости СВ и  $Kp$ -индекса сделан на основе данных, представленных на рис. 2, а, б, в и 3, а, б, в.

**Электроны 31,7 кэВ и 925 кэВ.** Потоки электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ увеличиваются при

увеличении обоих параметров, в среднем для электронов 31,7 кэВ влияние  $Kp$ -индекса превышает влияние скорости СВ, в среднем для электронов 925 кэВ влияние скорости значительно превышает влияние  $Kp$ -индекса. Динамика потоков электронов при изменении скорости и  $Kp$ -индекса определяется изменением соотношения абсолютных величин этих параметров. При увеличении скорости для  $V < 550$  км/с и увеличении  $Kp$  для  $Kp < 23$  увеличение потоков электронов 31,7 кэВ (~35%) и электронов 925 кэВ (~50%) связано с увеличением  $Kp$ -индекса и не зависит от скорости. При увеличении  $Kp$ -индекса (диапазон 18 – 28 единиц) максимальные вариации интенсивности электронов регистрируются при скорости  $V = 500$  км/с и для электронов 31,7 кэВ равны ~60%, для электронов 925 кэВ ~ 45%. При увеличении скорости (диапазон 470 – 640 км/с) максимальные вариации интенсивности регистрируются при  $Kp = 26$  и для элек-

тронов 31,7 кэВ равны ~40%, для электронов 925 кэВ ~ 100%. Для  $Kp > 28$  и  $V > 660$  км/с потоки электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ не зависят от  $Kp$ -индекса и скорости СВ. Максимальные потоки электронов 31,7 кэВ равны  $\approx 3,5 \cdot 10^5$  эл/см<sup>2</sup>·с·стер·кэВ, электронов 925 кэВ равны  $\approx 3,4 \cdot 10^2$  эл/см<sup>2</sup>·с·стер·кэВ.

**Электроны 270 кэВ.** Потоки электронов 270 кэВ практически не меняются при изменении  $Kp$ -индекса (диапазон 15 – 30 единиц) и скорости СВ (диапазон 400 – 670 км/с) и в пределах 10% равны  $\sim 2,9 \cdot 10^3$  эл/см<sup>2</sup>·с·стер·кэВ.

**Скорость  $V$  и  $Dst$ -индекс.** Анализ связи динамики потоков электронов 31,7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ с динамикой скорости СВ (диапазон 400 – 670 км/с) и  $Dst$ -индекса (диапазон напряжённости магнитного поля по модулю 3 – 32 нТ) сделан на основе данных, представленных на рис. 2, ж, з, и и 5, з, д, е.

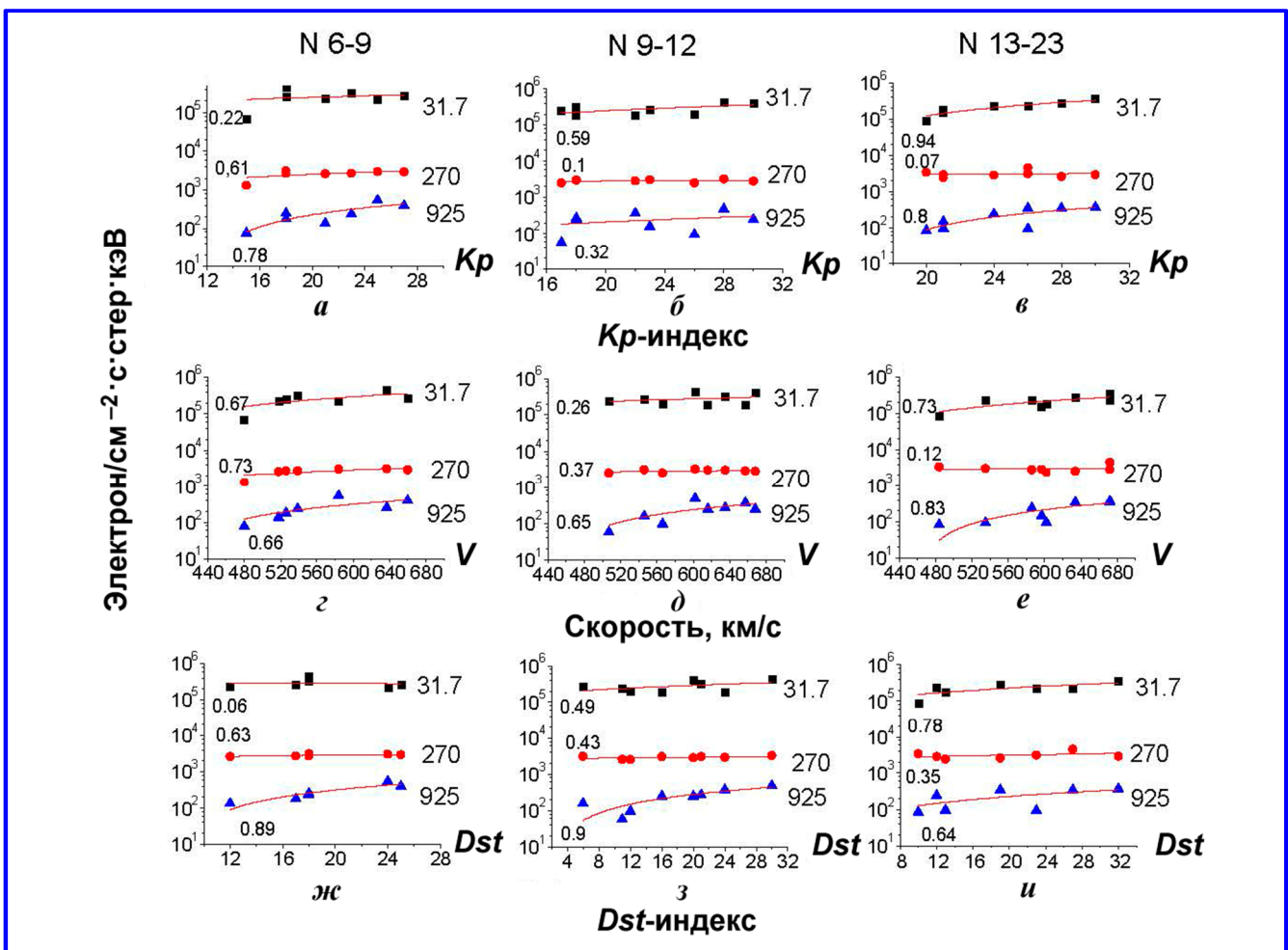


Рис. 4. Зависимость дифференциальных потоков электронов от  $Kp$ -индекса (рис. 4, а, б, в), скорости  $V$  км/с (рис. 4, з, д, е) и модуля  $Dst$ -индекса (рис. 4, ж, з, и) для трёх подгрупп плотности ( $6 - 9 \text{ см}^{-3}$ ,  $9 - 12 \text{ см}^{-3}$ ,  $13 - 20 \text{ см}^{-3}$ ). Для каждой кривой справа указаны энергии электронов в кэВ, слева коэффициенты линейной корреляции

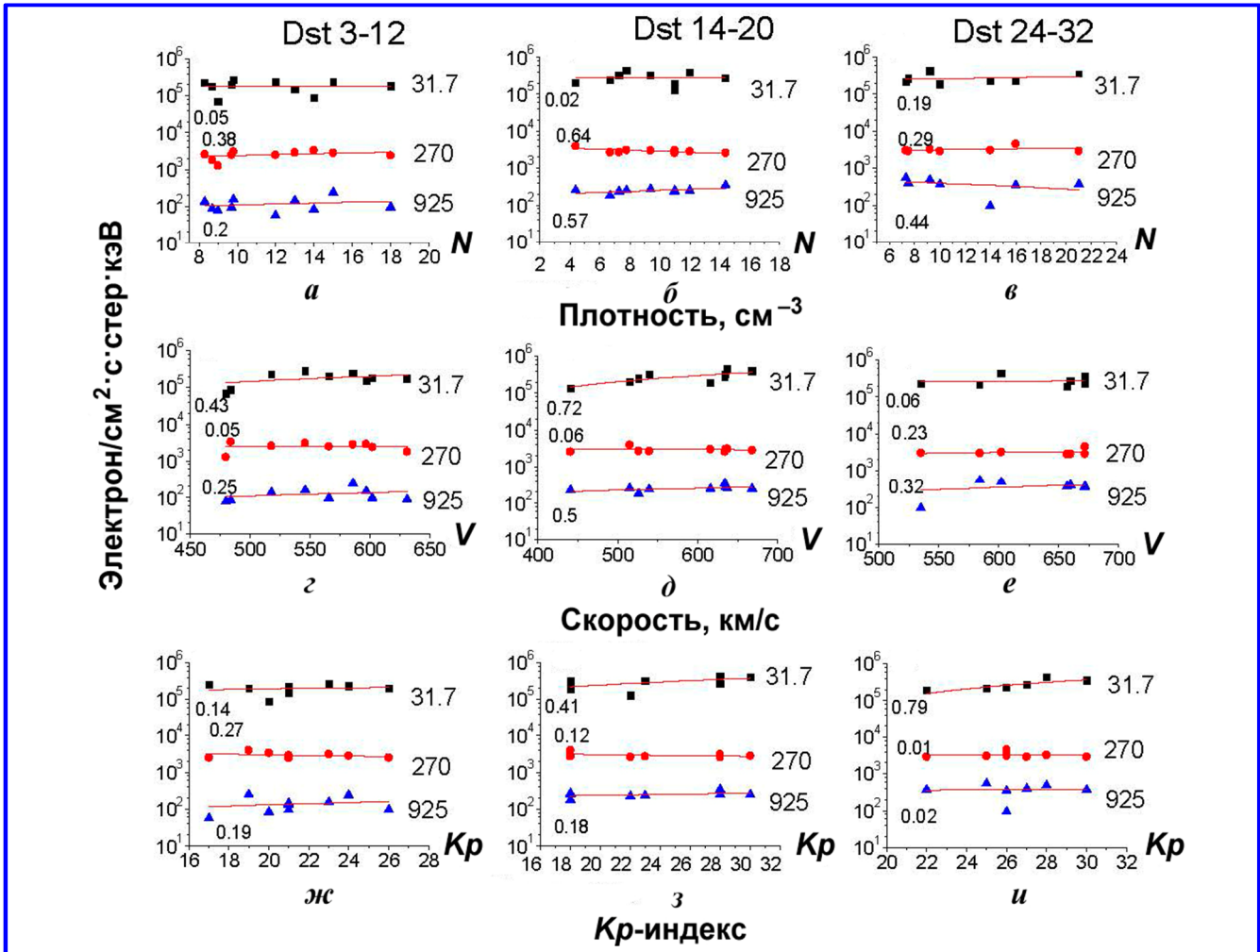


Рис. 5. Зависимость дифференциальных потоков электронов от плотности  $N \text{ см}^{-3}$  (рис. 5, а, б, в), скорости  $V \text{ км/с}$  (рис. 5, г, д, е) и  $Kp$ -индекса (рис. 5, ж, з, и) для трёх подгрупп  $Dst$ -индекса (3 – 12, 14 – 20, 24 – 32). Для каждой кривой справа указаны энергии электронов в кэВ, слева коэффициенты линейной корреляции

**Электроны 31,7 кэВ и 925 кэВ.** Потоки электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ увеличиваются при увеличении обоих параметров, в среднем вариации интенсивности при изменении  $Dst$  превышают вариации при изменении скорости. Следует отметить, что при скоростях  $V < 500 \text{ км/с}$  и  $Dst < 20$  увеличение потока электронов 31,7 кэВ (~30%) связано с увеличением скорости и не зависит от  $Dst$ -индекса, увеличение потока электронов 925 кэВ в основном связано с увеличением  $Dst$ -индекса и в среднем равно ~55%. При увеличении  $|Dst| < 20$  при постоянной скорости  $V > 550 \text{ км/с}$  потоки электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ увеличиваются, соответственно, на ~ 30% и ~ 90% и практически не зависят от скорости. При увеличении  $Dst$ -индекса (диапазон 7 – 28 нТ) максимальные вариации интенсивности регистрируются при скорости  $V = 550 \text{ км/с}$  и для электронов 31,7 кэВ равны ~65%, для элек-

тронов 925 кэВ ~ 165%. При увеличении скорости (диапазон 470 – 570 км/с) максимальные вариации интенсивности регистрируются при  $Dst = 22$  и для электронов 31,7 кэВ равны ~35%, для электронов 925 кэВ равны ~ 95%. Следует отметить, что вариации потоков при увеличении  $Dst$ -индекса при постоянной скорости значительно превышают вариации потоков при увеличении скорости при постоянных величинах  $Dst$ -индекса, в обоих случаях для электронов 925 кэВ вариации интенсивности больше.

**Электроны 270 кэВ.** Потоки электронов 270 кэВ практически не меняются при изменении  $Dst$ -индекса (диапазон 3 – 30 нТ) и скорости СВ (диапазон 400 – 670 км/с) и в пределах 10% равны  $\sim 2,9 \cdot 10^3 \text{ эл/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{кэВ}$ .

**Скорость  $V$  и плотность  $N$ .** Анализ связи динамики потоков электронов 31,7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ



с динамикой скорости СВ (диапазон 400 – 670 км/с) и плотности (диапазон 6 – 21 см<sup>-3</sup>) сделан на основе данных, представленных на рис. 2, в, з, д и 4, в, з, д.

**Электроны 31,7 кэВ и 925 кэВ.** При увеличении скорости в диапазоне 400 – 670 км/с при постоянной плотности потоки увеличиваются: при плотности  $N = 14 \text{ см}^{-3}$  потоки электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ увеличиваются на 80% и 260%. В среднем при увеличении плотности потоки уменьшаются. Для электронов 31,7 кэВ основное уменьшение интенсивности происходит при увеличении плотности  $N > 10 \text{ см}^{-3}$  (~ на 50% при  $V = 500 \text{ км/с}$ ), для электронов 925 кэВ основное уменьшение интенсивности (~на 45% при  $V = 500 \text{ км/с}$ ) происходит при увеличении плотности для  $N < 10 \text{ см}^{-3}$ . С увеличением скорости глубина спада уменьшается. В среднем при увеличении плотности  $N$  (диапазон 6 – 2 см<sup>-3</sup>) и при увеличении скорости  $V$  (диапазон 470 – 640 км/с) потоки уменьшаются ~ на 30% для электронов 31,7 кэВ и ~на 45% для электронов 925 кэВ. Следует отметить, что вариации потоков при увеличении скорости при постоянной плотности значительно превышают вариации потоков при увеличении плотности при постоянной скорости, в обоих случаях для электронов 925 кэВ вариации интенсивности больше.

**Электроны 270 кэВ.** При увеличении плотности (диапазон 6 – 20 см<sup>-3</sup>) для постоянной скорости  $V < 600 \text{ км/с}$  потоки электронов 270 кэВ увеличиваются (~ на 35% для  $V = 500 \text{ км/с}$ ) и практически не зависят от скорости. Максимальная величина интенсивности равна ~  $2,9 \cdot 10^3 \text{ эл/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{кэВ}$  для  $N \sim 18 \text{ см}^{-3}$  и далее не изменяется при изменении плотности. Потоки электронов 270 кэВ при изменении скорости (диапазон 400 – 670 км/с) при постоянной плотности при  $N > 6 \text{ см}^{-3}$  не зависят от скорости и плотности и в пределах 10% равны ~  $2,9 \cdot 10^3 \text{ эл/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{кэВ}$ .

**Плотность  $N$  и  $Kp$ -индекс.** Анализ связи динамики потоков электронов 31,7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ с динамикой  $Kp$ -индекса (диапазон 15 – 30) и плотности  $N$  (диапазон 6 – 21 см<sup>-3</sup>) сделан на основе данных, представленных на рис. 3, з, д, е и 4 а, б, в.

**Электроны 31,7 кэВ и 925 кэВ.** При увеличении  $Kp$ -индекса диапазон (18 – 28) при постоянных величинах плотности для  $N < 18 \text{ см}^{-3}$  потоки электронов увеличиваются (для электронов 31,7 кэВ ~ на 100% для  $N = 14 \text{ см}^{-3}$ , для электронов 925 кэВ ~ на 260% для  $N = 14 \text{ см}^{-3}$ ). В среднем при увеличении плотности интенсивность снижается. При постоянных величинах  $Kp > 18$  основное уменьшение интенсивности регистрируется при увеличении плотности (диапазон 12 – 20 см<sup>-3</sup>), при  $Kp = 20$  для

электронов 31,7 кэВ уменьшение интенсивности равно ~50%, для электронов 925 кэВ равно ~60%. Следует отметить, что вариации потоков при увеличении  $Kp$ -индекса при постоянной плотности значительно превышают вариации потоков при увеличении плотности при постоянной величине  $Kp$ -индекса, в обоих случаях для электронов 925 кэВ вариации интенсивности больше.

**Электроны 270 кэВ.** При увеличении плотности от 6 до 12 см<sup>-3</sup> при постоянных величинах  $Kp < 23$  потоки электронов увеличиваются ~ на 22% и не зависят от  $Kp$ . Максимальная величина интенсивности равна ~  $2,9 \cdot 10^3 \text{ эл/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{кэВ}$  для  $N \sim 12 \text{ см}^{-3}$  и далее не изменяется при увеличении плотности. При увеличении  $Kp$ -индекса (диапазон 15 – 30) для постоянной плотности  $N < 23 \text{ см}^{-3}$  интенсивность не зависит от плотности и  $Kp$ -индекса.

**Плотность  $N$  и  $Dst$ -индекс.** Анализ связи динамики потоков электронов 31,7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ с динамикой  $Dst$ -индекса (диапазон 3 – 32 нТ) и плотности  $N$  (диапазон 6 – 21 см<sup>-3</sup>) сделан на основе данных, представленных на рис. 5, а, б, в и 4, ж, з, и.

**Электроны 31,7 кэВ и 925 кэВ.** При увеличении  $|Dst|$ -индекса (диапазон 7 – 28 нТ) при постоянных величинах плотности для  $N < 17 \text{ см}^{-3}$  потоки электронов увеличиваются, при плотности  $N = 14 \text{ см}^{-3}$  потоки электронов 31,7 кэВ увеличиваются ~ на 55%, потоки электронов 925 кэВ ~ на 170%. При увеличении плотности от 6 до 20 см<sup>-3</sup> при постоянных величинах  $Dst$ -индекса для  $Dst \geq 12$  потоки электронов уменьшаются, при плотности  $N = 24 \text{ см}^{-3}$  потоки электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ уменьшаются соответственно ~ на ~10% и ~ на 35%. Следует отметить, что вариации потоков при увеличении  $Dst$ -индекса при постоянной плотности значительно превышают вариации потоков при увеличении плотности при постоянной величине  $Dst$ -индекса, в обоих случаях для электронов 925 кэВ вариации интенсивности больше.

**Электроны 270 кэВ.** При увеличении  $Dst$  (диапазон 3 – 20 нТ) для постоянной плотности  $N < 14 \text{ см}^{-3}$  потоки электронов 270 кэВ увеличивается (~ на 35% для  $N = 8 \text{ см}^{-3}$ ). Максимальная величина интенсивности составляет ~  $2,9 \cdot 10^3 \text{ эл/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер}$  для  $Dst \approx 20 \text{ нТ}$  и  $N = 8 \text{ см}^{-3}$ . Потоки электронов 270 кэВ при изменении плотности (диапазон 6 – 20 см<sup>-3</sup>) при постоянных величинах  $Dst$ -индекса  $< 28 \text{ нТ}$  не зависят от плотности и  $Dst$ -индекса и равны ~  $2,9 \cdot 10^3 \text{ эл/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{кэВ}$ .

### Основные результаты

При воздействии высокоскоростных потоков СВ в магнитосфере Земли возникает целый ряд физиче-

ских процессов, вероятность возникновения которых напрямую определяется параметрами СВ (скорость, плотность, давление) и межпланетного магнитного поля. Динамические вариации потоков электронов отражают сложный баланс конкурирующих механизмов ускорения и потерь частиц, эффективность которых определяется как параметрами СВ, так и параметрами магнитосферы, определяющими геомагнитную активность (индексами геомагнитной активности, в частности  $Kp$ - и  $Dst$ -индексами). В работе проведён анализ и получены количественные оценки влияния вариаций скорости  $V$  и плотности  $N$  солнечного ветра и  $Kp$ - и  $Dst$ -индексов геомагнитной активности на формирование интенсивности максимальных потоков электронов 31,7 кэВ (электроны источника), 270 кэВ («зародышевые» электроны) и 925 кэВ (релятивистские электроны). Диапазоны вариаций параметров: скорость СВ — 400 – 670 км/с; плотность СВ – 6 – 20 см<sup>-3</sup>;  $Kp$ -индекс – 15 – 30 единиц;  $|Dst|$ -индекс – 3 – 32 нТ. Для анализа выделены следующие пять пар параметров: скорость  $V$  и  $Kp$ -индекс, скорость  $V$  и  $Dst$ -индекс, скорость  $V$  и плотность  $N$ , плотность  $N$  и  $Kp$ -индекс, плотность  $N$  и  $Dst$ -индекс. Для каждой выделенной пары анализируется изменение интенсивности потока электронов при изменении одного из параметров при постоянной величине другого. В работе показана связь изменений интенсивности с изменением соотношения абсолютных величин выделенных параметров и получены следующие результаты.

**Электроны 31,7 кэВ и 925 кэВ. Параметры скорость  $V$  и  $Kp$ -индекс.** Потоки электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ увеличиваются при увеличении обоих параметров, в среднем для электронов 31,7 кэВ влияние  $Kp$ -индекса превышает влияние скорости СВ, в среднем для электронов 925 кэВ влияние скорости значительно превышает влияние  $Kp$ -индекса. При увеличении  $Kp$ -индекса максимальные вариации интенсивности при постоянной плотности для электронов 31,7 кэВ равны ~60%, для электронов 925 кэВ ~45%. При увеличении скорости максимальные вариации интенсивности для постоянных величин  $Kp$  для электронов 31,7 кэВ равны ~40%, для электронов 925 кэВ ~ 100%. Интересно, что при скорости  $V < 550$  км/с увеличение потоков электронов 31,7 кэВ (~35%) и электронов 925 кэВ (~50%) связано с увеличением  $Kp$ -индекса для  $Kp < 23$  и не зависит от скорости. Для  $Kp > 28$  и  $V > 660$  км/с потоки электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ не зависят от  $Kp$ -индекса и скорости СВ. Максимальные потоки электронов 31,7 кэВ равны  $\approx 3,5 \cdot 10^5$  эл/см<sup>2</sup>·с·стер·кэВ, электронов 925 кэВ равны  $\approx 3,4 \cdot 10^2$  эл/см<sup>2</sup>·с·стер·кэВ.

**Параметры скорость  $V$  и  $|Dst|$ -индекс.** Потоки электронов 31,7 кэВ и 925 кэВ увеличиваются при увеличении обоих параметров. Вариации потоков (увеличение интенсивности) при увеличении  $Dst$ -индекса при постоянной скорости (~65% для электронов 31,7 кэВ и ~165% для 925 кэВ) значительно превышают вариации потоков при увеличении скорости при постоянных величинах  $Dst$ -индекса (~35% для электронов 31,7 кэВ и ~95% для 925 кэВ).

**Параметры скорость  $V$  и плотность  $N$ .** Вариации потоков при увеличении скорости при постоянной плотности (увеличение интенсивности ~ 80% для электронов 31,7 кэВ и ~260% для 925 кэВ для  $N = 14$  см<sup>-3</sup>) значительно превышают вариации потоков при увеличении плотности при постоянной скорости (уменьшение интенсивности ~30% для электронов 31,7 кэВ и ~45% для 925 кэВ для  $V = 540$  км/с).

**Параметры плотность  $N$  и  $Kp$ -индекс.** Вариации потоков при увеличении  $Kp$ -индекса при постоянной плотности (увеличение интенсивности ~100% для электронов 31,7 кэВ и ~260% для 925 кэВ) значительно превышают вариации потоков при увеличении плотности при постоянной величине  $Kp$ -индекса (уменьшение интенсивности ~50% для электронов 31,7 кэВ и ~60% для 925 кэВ).

**Параметры плотность  $N$  и  $|Dst|$ -индекс.** Вариации потоков при увеличении  $Dst$ -индекса при постоянной плотности (увеличение интенсивности ~65% для электронов 31,7 кэВ и ~170% для 925 кэВ) значительно превышают вариации потоков при увеличении плотности при постоянной величине  $Dst$ -индекса (уменьшение интенсивности ~10% для электронов 31,7 кэВ и ~35% для 925 кэВ).

Полученные результаты показывают близкое подобие (функциональное, но не численное) динамики потоков электронов 31,7 кэВ (электронов источника) и релятивистских электронов при изменении скорости и плотности СВ и геомагнитных индексов, но для всех соотношений параметров для электронов 925 кэВ вариации интенсивности больше.

**Электроны 270 кэВ.** Потоки электронов 270 кэВ увеличиваются при увеличении плотности и достигают максимальной величины ~2,9·10<sup>3</sup> эл/см<sup>2</sup>·с·стер·кэВ при  $N \sim 12 - 18$  см<sup>-3</sup> и далее при увеличении плотности эта величина не меняется (в пределах 10%) и не зависит от вариаций скорости СВ (400 – 640 км/с),  $Kp$ -индекса (15 – 30 единиц) и  $|Dst|$ -индекса (3 – 20 нТ). Фактически это отражает тот факт, что основное увеличение потока «зародышевых» электронов происходит в области источника.

## Литература

1. Source and seed populations for relativistic electrons: Their roles in radiation belt changes / A. N. Jaynes, D. N. Baker, H. J. Singer, et al. // *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2015. – V. 120. – P. 7240 – 7254. – doi:10.1002/2015JA021234.
2. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements / D. N. Baker, X. Li, N. Turner, J. H. Allen, L. F. Bargatze, J. B. Blake, R. B. Sheldon, H. E. Spence, R. D. Belian, G. D. Reeves, S. G. Kanekal, B. Klecker, R. P. Lepping, K. Ogilvie, R. A. Mewaldt, T. Onsager, H. J. Singer, G. Rostoker // *J. Geophys. Res.* – 1997. – V. 102. – P. 14141 – 14148. – doi:10.1029/97JA00565.
3. Transport of the plasma sheet electrons to the geostationary distances / N. Y. Ganushkina, O. A. Amariutei, Y. Y. Shprits, and M. W. Liemohn // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2013. – V. 118. – P. 82 – 98. – doi:10.1029/2012JA017923.
4. Low-energy electrons (5 – 50 keV) in the inner magnetosphere / Ganushkina, N. Y., M. W. Liemohn, O. A. Amariutei, and D. Pitchford // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2014. – V. 119. – P. 246 – 259. – doi:10.1002/2013JA019304.
5. Prompt enhancement of the Earth's outer radiation belt due to substorm electron injections / C. L. Tang, J.-C. Zhang, G. D. Reeves, Z. P. Su, D. N. Baker, H. E. Spence, H. O. Funsten, J. B. Blake, J. R. Wygant // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2016. – V. 121. – P. 11826 – 11838. – doi:10.1002/2016JA023550.
6. Near-Earth injection of MeV electrons associated with intense depolarization electric fields: Van Allen Probes observations / Lei Dai, Chi Wang, Suping Duan, Zhaohai He, John R. Wygant, Cynthia A. Cattell, Xin Tao, Zhenpeng Su, Craig Kletzing, Daniel N. Baker, Xinlin Li, David Malaspina, J. Bernard Blake, Joseph Fennell, Seth Claudepierre, Drew L. Turner, Geoffrey D. Reeves, Herbert O. Funsten, Harlan E. Spence, Vassilis Angelopoulos, Dennis Fruehauff, Lunjin Chen, Scott Thaller, Aaron Breneman and Xiangwei Tang // *Geophys. Res. Lett.* – 2015. – V. 42. – P. 6170 – 6179. – doi:10.1002/2015GL064955.
7. Energy limits of electron acceleration in the plasma sheet during substorms: A case study with the Magnetospheric Multiscale (MMS) mission / D. L. Turner, J. F. Fennell, J. B. Blake, J. H. Clemmons, B. H. Mauk, I. J. Cohen, A. N. Jaynes, J. V. Craft, F. D. Wilder, D. N. Baker, G. D. Reeves, D. J. Gershman, L. A. Avanov, J. C. Dorelli, B. L. Giles, C. J. Pollock, D. Schmid, R. Nakamura, R. J. Strangeway, C. T. Russell, A. V. Artemyev, A. Runov, V. Angelopoulos, H. E. Spence, R. B. Torbert, and J. L. Burch // *Geophys. Res. Lett.* – 2016. – V. 43. – P. 7785 – 7794. – doi:10.1002/2016GL069691.
8. Global model of lower band and upper band chorus from multiple satellite observations / N. P. Meredith, R. B. Horne, A. Sicard-Piet, D. Boscher, K. H. Yearby, W. Li, and R. M. Thorne // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117. – A10225. – doi:10.1029/2012JA017978.
9. Global distribution of whistler-mode chorus waves observed on the THEMIS spacecraft / Li, W., R. M. Thorne, V. Angelopoulos, J. Bortnik, C. M. Cully, B. Ni, O. LeContel, A. Roux, U. Auster, and W. Magnes // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – V. 36. – L09104. – doi:10.1029/2009GL037595.
10. Substorm dependence of chorus amplitudes. Implications for the acceleration of electrons to relativistic energies / Nigel P. Meredith, Richard B. Horne, Roger R. Anderson // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2001. – V. 106. – A7 13165.
11. Evolution of chorus waves and their source electrons during storms driven by corotating interaction regions / Li, W., R. Thorne, J. Bortnik, R. McPherron, Y. Nishimura, V. Angelopoulos, and I. G. Richardson // *J. Geophys. Res.*, 2012. – V. 117. – A08209. – doi:10.1029/2012JA017797.
12. Outer zone relativistic electron acceleration associated with substorm-enhanced whistler mode chorus / Nigel P. Meredith, Richard B. Horne, Roger H. A. Iles, Richard M. Thorne, Daniel Heynderickx, and Roger R. Anderson // *J. Geophys. Res.*, 2002. – V. 107. – A7, 1144, 10.1029 / 2001JA900146.
13. 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.
14. Radial distributions of equatorial phase space density for outer radiation belt electrons / D. L. Turner, V. Angelopoulos, Y. Shprits, A. Kellerman, P. Cruce, and D. Larson // *Geophys. Res. Lett.*, 2012. – V. 39. – L09101, doi:10.1029/2012GL051722, 2012.
15. On the storm-time evolution of relativistic electron phase space density in Earth's outer radiation belt / Turner, D. L., V. Angelopoulos, W. Li, M. D. Hartinger, M. Usanova, I. R. Mann, J. Bortnik, and Y. Shprits // *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2013. – V. 118. – P. 2196 – 2212, doi:10.1002/jgra.50151.
16. Statistical properties of the radiation belt seed population / Boyd, A. J., H. E. Spence, C.-L. Huang / G. D. Reeves, D. N. Baker, D. L. Turner, S. G. Claudepierre, J. F. Fennell, J. B. Blake, and Y. Y. Shprits // *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2016. – V. 121. – P. 7636 – 7646. – doi:10.1002/2016JA022652.
17. Electron acceleration in the heart of the Van Allen radiation belts / Reeves, G. D. et al. // *Science*. – 2013. – V. 341. – P. 991 – 994.
18. Radiation belt seed population and its association with the relativistic electron dynamics: A statistical study / Tang, C. L., Y. X. Wang, B. Ni, J.-C. Zhang, G. D. Reeves, Z. P. Su, D. N. Baker, H. E. Spence, H. O. Funsten, and J. B. Blake // *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2017. – V. 122. – P. 5261 – 5276. – doi:10.1002/2017JA023905.
19. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus / R. M. Thorne, W. Li, B. Ni, Q. Ma, J. Bortnik, L. Chen, D. N. Baker, H. E. Spence, G. D. Reeves, M. G. Henderson, C. A. Kletzing, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, J. B. Blake, J. F. Fennell, S. G. Claudepierre & S. G. Kanekal // *Nature*, December 2013. – doi: 10.1038/nature12889.
20. Effects of ULF waves on local and global energetic particles: Particle energy and species dependences / Li, L. Y., J. Yu, J. B. Cao, Z. Q. Wang, Y. Q. Yu, G. D. Reeves, and

- X. Li // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121. – 11007 – 11020. – doi:10.1002/2016JA023149.
21. Accurately specifying storm-time ULF wave radial diffusion in the radiation Belts / Dimitrakoudis, S., I. R. Mann, G. Balasis, C. Papadimitriou, A. Anastasiadis and I. A. Daglis (2015) // *Geophys. Res. Lett.* – 2015. – V. 42, P. 5711 – 5718, doi:10.1002/2015GL064707.
22. Modeling radiation belt radial diffusion in ULF wave fields: 2. Estimating rates of radial diffusion using combined MHD and particle codes / Chia-Lin Huang, Harlan E. Spence, Mary K. Hudson, and Scot R. Elkington // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115. – A06216. – doi:10.1029/2009JA014918.
23. Simulation of energy-dependent electron diffusion processes in the Earth's outer radiation belt / Q. Ma, W. Li, R. M. Thorne, Y. Nishimura, X.-J. Zhang, G. D. Reeves, C. A. Kletzing, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, M. G. Henderson, H. E. Spence, D. N. Baker, J. B. Blake, J. F. Fennell, V. Angelopoulos // *J. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – issue 5.
24. 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, 10023 – 10040. – doi:10.1002/2014JA020709.
25. Statistical roles of storms and substorms in changing the entire outer zone relativistic electron population / L. Y. Li, J. B. Cao, G. C. Zhou, and X. Li // *J. Geophys. Res.* 2009. – V. 114. – A12214, doi:10.1029/2009JA014333.
26. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions/ Thorne, R. M. // *Geophys. Res. Lett.* – 2010. – V. 37. – L22107. – doi:10.1029/2010GL044990.
27. Systems science of the magnetosphere: Creating indices of substorm activity, of the substorm-injected electron population, and of the electron radiation belt / J. E. Borovsky and K. Yakymenko // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2017. – V. 122. – doi:10.1002/2017JA024250.
28. Thomsen M. F. (2004) Why  $K_p$  is such a good measure of magnetospheric convection? // *Space Weather* / M. F. Thomsen // *Space Weather.* – 2004. – V. 2. – S11004. – doi:10.1029/2004SW000089.
29. SuperMAG-based partial ring current indices/ P. T. Newell and J. W. Gjerloev // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117. – A05215. – doi:10.1029/2012JA017586.
30. Predicting the  $L$ -position of the storm-injected relativistic electron belt/ Tverskaya, L. V., N. N. Pavlov, J. B. Blake, R. S. Selesnick, and J. F. Fennell // *Adv. Space Res.* – 2003. – V. 31(4). – Pp. 1039 – 1044. – doi:10.1016/S0273-1177(02)00785-8.
31. Inward shift of outer radiation belt electrons as a function of Dst index and the influence of the solar wind on electron injections into the slot region / Zhao, H., and X. Li // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2013. – V. 118. – Pp. 756 – 764. – doi:10.1029/2012JA018179.
32. Characteristics of precipitating energetic electron fluxes relative to the plasmapause during geomagnetic storms/ Whitaker, I. C., M. A. Clilverd, and C. J. Rodger (2014) // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2014. – V. 119. – Pp. 8784 – 8800. – doi:10.1002/2014JA020446.
33. The effects of magnetospheric processes on relativistic electron dynamics in the Earth's outer radiation belt / C. L. Tang, Y. X. Wang, B. Ni, Z. P. Su, G. D. Reeves, J.-C. Zhang, D. N. Baker, H. E. Spence, H. O. Funsten, and J. B. Blake // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2017. – V. 122. – Pp. 9952 – 9968. – doi:10.1002/2017JA024407.
34. On the relation between radiation belt electrons and solar wind parameters/geomagnetic indices: Dependence on the first adiabatic invariant and  $L^*$  / H. Zhao, D. N. Baker, A. N. Jaynes, X. Li, S. R. Elkington, S. G. Kanekal, H. E. Spence, A. J. Boyd, C.-L. Huang, and C. Forsyth // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2017. – V. 122. – Pp. 1624 – 1642. – doi:10.1002/2016JA023658.
35. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited / G. D. Reeves, S. K. Morley, R. H. W. Friedel, M. G. Henderson, T. E. Cayton, G. Cunningham, J. B. Blake, R. A. Christensen and D. Thomsen // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V. 116. – A02213. – doi:10.1029/2010JA015735.
36. Long-term variations in solar wind velocity and radiation belt electrons/Geoff Reeves, Steve Morley, and Greg Cunningham / *J. Geophys. Res.* – 2013. – V. 118. – Pp. 1040 – 1048. – doi:10.1002/jgra.50126.
37. Information theoretical approach to discovering solar wind drivers of the outer radiation belt / S. Wing, J. R. Johnson, E. Camporeale, and G. D. Reeves // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121. – Pp. 9378 – 9399. – doi:10.1002/2016JA022711.
38. 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.
39. Эффективность связи потоков энергичных электронов на геостационарной орбите с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности в 22-м и 23-м солнечных циклах / В. И. Дегтярев, Г. В. Попов, С. Э. Чудненко // *Солнечно-земная физика.* – Вып. 23 (2013). – С. 64 – 74.
40. On the influence of solar wind conditions on the outer-electron radiation belt/ A. C. Kellerman and Y. Y. Shprits// *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2012. – V. 117. – A05217. – doi:10.1029/2011JA017253 (jgra21738).
41. Solar wind conditions leading to efficient radiation belt electron acceleration: A superposed epoch analysis/ W. Li, R. M. Thorne, J. Bortnik, D. N. Baker, G. D. Reeves, S. G. Kanekal, H. E. Spence, and J. C. Green // *Geophys. Res. Lett.* – 2015. – V. 42. – Pp. 6906 – 6915. – doi:10.1002/2015GL065342.
42. Безродных И. П., Морозова Е. И., Петрукович А. А. 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 // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.* – М. :

- АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 156. – № 1. – С. 33 – 49. – URL : <http://www.cosmic-rays.ru/articles/02/201703pdf>. – [Электронный ресурс].
43. Evolution of Coronal Holes and Implications for High-Speed Solar Wind During the Minimum Between Cycles 23 and 24 / G. de Toma // Solar Phys. – 2011. – V. 274. – Pp. 195 – 217.

Поступила в редакцию 13.03.2018

**Иннокентий Петрович Безродных**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. +7 (495) 333-20-00, e-mail: [d54x@mail.ru](mailto:d54x@mail.ru).

**Евгения Ивановна Морозова**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. +7 (495) 333-20-00, e-mail: [morozova.evgeniya2014@yandex.ru](mailto:morozova.evgeniya2014@yandex.ru).

**Анатолий Алексеевич Петрукович**, член-корреспондент РАН, директор ИКИ РАН, т. +7 (495) 333-32-67, e-mail: [apetruko@iki.rssi.ru](mailto:apetruko@iki.rssi.ru). (ИКИ РАН).

## INFLUENCE OF RATE AND DENSITY OF RECURRENT SOLAR WIND FLOWS AND GEOMAGNETIC ACTIVITY INDICES (Kp AND DST) ON THE STRUCTURE OF ELECTRON FLOWS GENERATED IN THE EARTH'S OUTER RADIATION BELT AT GEOSTATIONARY ORBIT

I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich

The dynamic variations of electron flows reflect a complex balance between competitive acceleration mechanisms and losses of particles, the efficiency of which is determined both by solar wind parameters, and by parameters of magnetosphere defining the geomagnetic activity (i.e. by geomagnetic indices, Kp and Dst in particular). The article is devoted to a study of correlation between the dynamics of electron flows with variation of solar wind parameters and Kp- and Dst-indices. The article considers 29 cases of electron flow enhancement in the Earth's outer radiation belt variations generated in 2007 under the influence of high-rate recurrent solar wind flows. The data received from the LANL-GEO satellite and the OMNI database has been used for parameters of solar wind and geomagnetic activity (Kp- and Dst-indices). The article contains analysis and quantitative assessment of the influence of solar wind rate V and density N variations and Kp- and Dst-indices of geomagnetic activity on the intensity of maximum electron flows of 31.7 keV (source electrons), 270 keV ('embryonic' electrons) and 925 keV (relativistic electrons). The ranges of parameters variation are as follows: solar wind rate is from 400 to 670 km/s; solar wind density is from 6 to 20 cm<sup>-3</sup>; Kp-index is from 15 to 30 units; |Dst| index is from 3 to 32 nT. The following five pairs of parameters were selected for analysis: rate V and Kp-index, rate V and Dst-index, rate V and density N, density N and Kp-index, density N and Dst-index. The variation of electron flow intensity is analyzed for each selected pair, with variation of one parameter and constant value of the other. The article shows the correlation between intensity variation and variation of relation between the absolute values of the selected parameters. The results are provided in the form of numerical values. In particular, during the analysis of variations of 31.7 keV and 925 keV electron flows, when rate V is increased at constant density N (increase of intensity of ~ 80% for 31.7 keV and of ~ 260% for 925 keV, for N = 14 cm<sup>-3</sup>) the electron flux variations are considerably greater than the flow variations at the increase of density with constant rate (reduction of ~ 30% for 31.7 keV and of ~ 45% for 925 keV, for V = 540 km/s). When rate V and Dst-index increase, the electron fluxes of 31.7 keV and 925 keV electrons are enhanced, also. The variations of fluxes at the increase of Dst-index at constant rate are approximately twice as much as the variations of fluxes at the increase of rate with constant values of Dst-index. The analysis has shown close similarity (functional, but not numeric) in the dynamics of 31.7 keV electrons (source electrons) and relativistic electrons at variation of solar wind rate and density and geomagnetic indices, however, intensity variations are greater for all 925 keV electron parameter relations. 270 keV electron flows enhance when density is increased, and reach the maximum value of ~ 2.9 · 10<sup>3</sup> el·cm<sup>-2</sup>·s·ster at N of ~ 12 – 18 cm<sup>-3</sup>, and after that when density is increased, this value remains unchanged (within the limits of 10%) and does not depend on variation of solar wind (400 – 640 km/s), Kp index (15 – 30 units) and |Dst|-index (3 – 20 nT). In fact, it demonstrates the fact that 'embryonic' electrons flow is mainly enhanced in the area of the source.

**Key words:** solar wind, Earth's outer radiation belt, geomagnetic activity indices, differential flows of relativistic electrons at geostationary orbit.

### References

1. Source and seed populations for relativistic electrons: Their roles in radiation belt changes / A. N. Jaynes, D. N. Baker, H. J. Singer, et al. // J. Geophys. Res. Space Physics, 2015. – V. 120. – P. 7240 – 7254. – doi:10.1002/2015JA021234.
2. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements / D. N. Baker, X. Li, N. Turner, J. H. Allen, L. F. Bargatze, J. B. Blake, R. B. Sheldon, H. E. Spence, R. D. Belian, G. D. Reeves, S. G. Kanekal, B. Klecker, R. P. Lepping, K. Ogilvie, R. A. Mewaldt, T. Onsager, H. J. Singer, G. Rostoker // J. Geophys. Res. – 1997. – V. 102. – P. 14141 – 14148. – doi:10.1029/97JA00565.
3. Transport of the plasma sheet electrons to the geostationary distances/ N. Y. Ganushkina, O. A. Amariutei, Y. Y. Shprits, and M. W. Liemohn // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2013. – V. 118. – P. 82 – 98. – doi:10.1029/2012JA017923.
4. Low-energy electrons (5 – 50 keV) in the inner magnetosphere/ Ganushkina, N. Y., M. W. Liemohn, O. A. Amariutei, and D. Pitchford // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2014. – V. 119. – P. 246 – 259. – doi:10.1002/2013JA019304.

5. Prompt enhancement of the Earth's outer radiation belt due to substorm electron injections / C. L. Tang, J.-C. Zhang, G. D. Reeves, Z. P. Su, D. N. Baker, H. E. Spence, H. O. Funsten, J. B. Blake, J. R. Wygant // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121. – P. 11826 – 11838. – doi:10.1002/2016JA023550.
6. Near-Earth injection of MeV electrons associated with intense depolarization electric fields: Van Allen Probes observations / Lei Dai, Chi Wang, Suping Duan, Zhaohai He, John R. Wygant, Cynthia A. Cattell, Xin Tao, Zhenpeng Su, Craig Kletzing, Daniel N. Baker, Xinlin Li, David Malaspina, J. Bernard Blake, Joseph Fennell, Seth Claudepierre, Drew L. Turner, Geoffrey D. Reeves, Herbert O. Funsten, Harlan E. Spence, Vassilis Angelopoulos, Dennis Fruehauff, Lunjin Chen, Scott Thaller, Aaron Breneman and Xiangwei Tang // *Geophys. Res. Lett.* – 2015. – V. 42. – P. 6170 – 6179. – doi:10.1002/2015GL064955.
7. Energy limits of electron acceleration in the plasma sheet during substorms: A case study with the Magnetospheric Multiscale (MMS) mission / D. L. Turner, J. F. Fennell, J. B. Blake, J. H. Clemmons, B. H. Mauk, I. J. Cohen, A. N. Jaynes, J. V. Craft, F. D. Wilder, D. N. Baker, G. D. Reeves, D. J. Gershman, L. A. Avano, J. C. Dorelli, B. L. Giles, C. J. Pollock, D. Schmid, R. Nakamura, R. J. Strangeway, C. T. Russell, A. V. Artemyev, A. Runov, V. Angelopoulos, H. E. Spence, R. B. Torbert, and J. L. Burch // *Geophys. Res. Lett.* – 2016. – V. 43. – P. 7785 – 7794. – doi:10.1002/2016GL069691.
8. Global model of lower band and upper band chorus from multiple satellite observations / N. P. Meredith, R. B. Horne, A. Sicard-Piet, D. Boscher, K. H. Yearby, W. Li, and R. M. Thorne // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117. – A10225. – doi:10.1029/2012JA017978.
9. Global distribution of whistler-mode chorus waves observed on the THEMIS spacecraft / Li, W., R. M. Thorne, V. Angelopoulos, J. Bortnik, C. M. Cully, B. Ni, O. LeContel, A. Roux, U. Auster, and W. Magnes // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – V. 36. – L09104. – doi:10.1029/2009GL037595.
10. Substorm dependence of chorus amplitudes. Implications for the acceleration of electrons to relativistic energies / Nigel P. Meredith, Richard B. Horne, Roger R. Anderson // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2001. – V. 106. – A7 13165.
11. Evolution of chorus waves and their source electrons during storms driven by corotating interaction regions / Li, W., R. Thorne, J. Bortnik, R. McPherron, Y. Nishimura, V. Angelopoulos, and I. G. Richardson // *J. Geophys. Res.*, 2012. – V. 117. – A08209. – doi:10.1029/2012JA017797.
12. Outer zone relativistic electron acceleration associated with substorm-enhanced whistler mode chorus / Nigel P. Meredith, Richard B. Horne, Roger H. A. Iles, Richard M. Thorne, Daniel Heynderickx, and Roger R. Anderson // *J. Geophys. Res.*, 2002. – V. 107. – A7, 1144, 10.1029/2001JA900146.
13. 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.
14. Radial distributions of equatorial phase space density for outer radiation belt electrons / D. L. Turner, V. Angelopoulos, Y. Shprits, A. Kellerman, P. Cruce, and D. Larson // *Geophys. Res. Lett.*, 2012. – V. 39. – L09101. – doi:10.1029/2012GL051722, 2012.
15. On the storm-time evolution of relativistic electron phase space density in Earth's outer radiation belt / Turner, D. L., V. Angelopoulos, W. Li, M. D. Hartinger, M. Usanova, I. R. Mann, J. Bortnik, and Y. Shprits // *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2013. – V. 118. – P. 2196 – 2212, doi:10.1002/jgra.50151.
16. Statistical properties of the radiation belt seed population / Boyd, A. J., H. E. Spence, C.-L. Huang / G. D. Reeves, D. N. Baker, D. L. Turner, S. G. Claudepierre, J. F. Fennell, J. B. Blake, and Y. Y. Shprits // *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2016. – V. 121. – P. 7636 – 7646. – doi:10.1002/2016JA022652.
17. Electron acceleration in the heart of the Van Allen radiation belts / Reeves, G. D. et al. // *Science.* – 2013. – V. 341. – P. 991 – 994.
18. Radiation belt seed population and its association with the relativistic electron dynamics: A statistical study / Tang, C. L., Y. X. Wang, B. Ni, J.-C. Zhang, G. D. Reeves, Z. P. Su, D. N. Baker, H. E. Spence, H. O. Funsten, and J. B. Blake // *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2017. – V. 122. – P. 5261 – 5276. – doi:10.1002/2017JA023905.
19. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus / R. M. Thorne, W. Li, B. Ni, Q. Ma, J. Bortnik, L. Chen, D. N. Baker, H. E. Spence, G. D. Reeves, M. G. Henderson, C. A. Kletzing, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, J. B. Blake, J. F. Fennell, S. G. Claudepierre & S. G. Kanekal // *Nature*, December 2013. – doi: 10.1038/nature12889.
20. Effects of ULF waves on local and global energetic particles: Particle energy and species dependences / Li, L. Y., J. Yu, J. B. Cao, Z. Q. Wang, Y. Q. Yu, G. D. Reeves, and X. Li // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121. – 11007 – 11020. – doi:10.1002/2016JA023149.
21. Accurately specifying storm-time ULF wave radial diffusion in the radiation Belts / Dimitrakoudis, S., I. R. Mann, G. Balasis, C. Papadimitriou, A. Anastasiadis and I. A. Daglis (2015) // *Geophys. Res. Lett.* – 2015. – V. 42. – P. 5711 – 5718, doi:10.1002/2015GL064707.
22. Modeling radiation belt radial diffusion in ULF wave fields: 2. Estimating rates of radial diffusion using combined MHD and particle codes / Chia-Lin Huang, Harlan E. Spence, Mary K. Hudson, and Scot R. Elkington // *J. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115. – A06216. – doi:10.1029/2009JA014918.

23. Simulation of energy-dependent electron diffusion processes in the Earth's outer radiation belt / Q. Ma, W. Li, R. M. Thorne, Y. Nishimura, X.-J. Zhang, G. D. Reeves, C. A. Kletzing, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, M. G. Henderson, H. E. Spence, D. N. Baker, J. B. Blake, J. F. Fennell, V. Angelopoulos // *J. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – issue 5.
24. 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, 10023 – 10040. – doi:10.1002/2014JA020709.
25. Statistical roles of storms and substorms in changing the entire outer zone relativistic electron population / L. Y. Li, J. B. Cao, G. C. Zhou, and X. Li // *J. Geophys. Res.* 2009. – V. 114. – A12214, doi:10.1029/2009JA014333.
26. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions / Thorne, R. M. // *Geophys. Res. Lett.* – 2010. – V. 37. – L22107. – doi:10.1029/2010GL044990.
27. Systems science of the magnetosphere: Creating indices of substorm activity, of the substorm-injected electron population, and of the electron radiation belt / J. E. Borovsky and K. Yakymenko // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2017. – V. 122. – doi:10.1002/2017JA024250.
28. Thomsen M. F. (2004) Why  $Kp$  is such a good measure of magnetospheric convection? / *Space Weather* / M. F. Thomsen // *Space Weather.* – 2004. – V. 2. – S11004. – doi:10.1029/2004SW000089.
29. SuperMAG-based partial ring current indices/ P. T. Newell and J. W. Gjerloev // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117. – A05215. – doi:10.1029/2012JA017586.
30. Predicting the  $L$ -position of the storm-injected relativistic electron belt/ Tverskaya, L. V., N. N. Pavlov, J. B. Blake, R. S. Selesnick, and J. F. Fennell // *Adv. Space Res.* – 2003. – V. 31(4). – Pp. 1039 – 1044. – doi:10.1016/S0273-1177(02)00785-8.
31. Inward shift of outer radiation belt electrons as a function of Dst index and the influence of the solar wind on electron injections into the slot region / Zhao, H., and X. Li // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2013. – V. 118. – Pp. 756 – 764. – doi:10.1029/2012JA018179.
32. Characteristics of precipitating energetic electron fluxes relative to the plasmapause during geomagnetic storms/ I. C. Whitaker, M. A. Clilverd, and C. J. Rodger (2014) // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2014. – V. 119. – Pp. 8784 – 8800. – doi:10.1002/2014JA020446.
33. The effects of magnetospheric processes on relativistic electron dynamics in the Earth's outer radiation belt / C. L. Tang, Y. X. Wang, B. Ni, Z. P. Su, G. D. Reeves, J.-C. Zhang, D. N. Baker, H. E. Spence, H. O. Funsten, and J. B. Blake // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2017. – V. 122. – Pp. 9952 – 9968. – doi:10.1002/2017JA024407.
34. On the relation between radiation belt electrons and solar wind parameters/geomagnetic indices: Dependence on the first adiabatic invariant and  $L^*$  / H. Zhao, D. N. Baker, A. N. Jaynes, X. Li, S. R. Elkington, S. G. Kanekal, H. E. Spence, A. J. Boyd, C.-L. Huang, and C. Forsyth // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2017. – V. 122. – Pp. 1624 – 1642. – doi:10.1002/2016JA023658.
35. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited / G. D. Reeves, S. K. Morley, R. H. W. Friedel, M. G. Henderson, T. E. Cayton, G. Cunningham, J. B. Blake, R. A. Christensen and D. Thomsen // *J. Geophys. Res.* – 2011. – V. 116. – A02213. – doi:10.1029/2010JA015735.
36. Long-term variations in solar wind velocity and radiation belt electrons/Geoff Reeves, Steve Morley, and Greg Cunningham // *J. Geophys. Res.* – 2013. – V. 118. – Pp. 1040 – 1048. – doi:10.1002/jgra.50126.
37. Information theoretical approach to discovering solar wind drivers of the outer radiation belt / S. Wing, J. R. Johnson, E. Camporeale, and G. D. Reeves // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – V. 121. – Pp. 9378 – 9399. – doi:10.1002/2016JA022711.
38. 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.
39. Correlation of energetic electron fluxes at geostationary orbit with solar wind parameters and geomagnetic activity indices during solar cycles 22 and 23 / V. I. Degtyarev, G. V. Popov, S. E. Chudnenko // *Solar-Terrestrial Physics.* – Issue 23 (2013). – Pp. 64 – 74.
40. On the influence of solar wind conditions on the outer-electron radiation belt/ A. C. Kellerman and Y. Y. Shprits // *J. Geophys. Res. Space Physics.* – 2012. – V. 117. – A05217. – doi:10.1029/2011JA017253 (jgra21738).
41. Solar wind conditions leading to efficient radiation belt electron acceleration: A superposed epoch analysis/ W. Li, R. M. Thorne, J. Bortnik, D. N. Baker, G. D. Reeves, S. G. Kanekal, H. E. Spence, and J. C. Green // *Geophys. Res. Lett.* – 2015. – V. 42. – Pp. 6906 – 6915. – doi:10.1002/2015GL065342.
42. 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. Semenov // *Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings.* – M. : 'VNIIEEM Corporation' JC, 2017. – V. 156. – No. 1. – Pp. 33 – 49. – URL : <http://www.cosmic-rays.ru/articles/02/201703pdf>. – [Electronic source].

43. Evolution of Coronal Holes and Implications for High-Speed Solar Wind During the Minimum Between Cycles 23 and 24 / G. de Toma // Solar Phys. – 2011. – V. 274. – Pp. 195 – 217.

**Innokentii Petrovich Bezrodnykh**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,  
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.

IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).  
(JC «VNIEM Corporation»).

**Evgeniia Ivanovna Morozova**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,  
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 of IKI RAN, tel.: + 7 (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.  
IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).