

## **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

ИКИ РАН, г.Москва, Россия, [morozova.evgeniya2014@yandex.ru](mailto:morozova.evgeniya2014@yandex.ru)

### **Введение**

Структура потоков электронов ВРПЗ формируется под влиянием целого ряда конкурирующих процессов ускорения и потерь частиц, которые возникают внутри магнитосферы и на ее 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 высокоэнергичными электронами источника (30 – 300 кэВ), которые также инжектируются в суббурих [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. Заключительный (третий) этап формирования потоков релятивистских электронов ВРПЗ определяется локальным резонансным ускорением зародышевых электронов СН волнами в «сердце» ВРПЗ (на  $L \approx 4-5$ ) [17, 18, 19]. Далее радиальная диффузия (результат рассеяния электронов при дрейфовом резонансе с ULF волнами — частоты  $10^{-3} - 10^{-4}$  Гц) перераспределяет электроны по L-оболочкам [20-24].

Структура потоков электронов ВРПЗ формируется, когда в МФ 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 МФ при воздействии высокоскоростных потоков СВ сопровождается значительным изменением крупномасштабной конвекции магнитосферной плазмы и изменением и усилением внутримангитосферных токовых систем, что, в свою очередь, вызывает значительные вариации магнитосферного магнитного поля (МФМП). Для анализа динамики МФМП используются индексы геомагнитной активности (как правило, это Kp-, Dst-, AE- и SYM-H индексы), которые дают численную информацию (с разным временным разрешением) о долготно-широтных и временных (утро-вечер) о вариациях МФМП [27, 28, 29]. Индексы геомагнитной активности отражают некоторую среднюю опосредованную картину влияния параметров СВ на систему магнитосферных токов и течений плазмы в МФ. 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 МФМП. Подробный анализ влияния минимума Dst на распределение потоков релятивистских электронов по L оболочками проведен в работах [30,31]. Зависимость потоков высыпавшихся 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 «сердце» ВРП 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 МФМП на частотах  $10^{-3}$ -  $10^{-4}$ , 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<sub>min</sub> и AE<sub>max</sub> и фазовой плотностью потоков релятивистских электронов ( $\mu = 630, 1096, 2290, \text{ and } 3311 \text{ MeV/G}$ ,  $\mu$  первый адиабатический инвариант) для L\* = 4.0, 4.5 и 5 проведен 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, 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 влияния скорости СВ, плотности СВ, Vz компоненты ММП и геомагнитных индексов SIM-H и AL на структуру потоков электронов проведен в работе [34]. Для всех параметров рассчитаны коэффициенты корреляции с фазовой плотностью электронов, показано, что коэффициенты корреляции зависят от величины первого адиабатического инварианта (диапазон  $\mu \approx 10 - 10000 \text{ МэВ/Гс}$ ) 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 г.) со скоростью проведен 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 ( $\sim 36\%$ ), для модуля ММП и для плотности СВ он меньше:  $\sim 18\%$  и  $\sim 13\%$ . 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  $> 2 \text{ МэВ}$ ) с параметрами СВ и

индексами геомагнитной активности проведен в работе [39] (данные спутников LANL и GOES, 1986— 2009 г). При анализе больших временных периодов (более года) показано, что скорость СВ является наилучшим индикатором появления потоков релятивистских электронов. Для трехмесячных 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 г., 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] проведен 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 типом зависимости от плотности и скорости СВ. Потоки электронов  $\sim 100 - 500$  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  $\sim 500$  кэВ. При анализе энергетических спектров электронов были получены количественные оценки вариаций скорости и плотности СВ на формирование энергетических 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 проведен 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 трех дифференциальных каналов (31.7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ) проведен анализ динамики потоков электронов при изменении четырех управляющих параметров: скорости и плотности СВ и геомагнитных индексов  $K_p$  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 Кр и Dst индексов, зарегистрированными в каждом событии. На рис.1 для трех дифференциальных каналов электронов 31.7 кэВ, 270 кэВ и 925 кэВ (25 событий) представлены зависимости интенсивности потоков электронов от плотности  $N$  см<sup>-3</sup> (рис.1.1), Кр индекса (рис.1.2), скорости  $V$  км/с (рис. 1.3) и модуля  $|Dst|$  индекса (рис. 1.4) 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 влияние 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); три диапазона для Кр индекса (15-20, 21-25, 26-30); три диапазона для плотности СВ (6-9 см<sup>-3</sup>, 9-12 см<sup>-3</sup>, 13-20 см<sup>-3</sup>) и три диапазона для модуля Dst индекса (3-12, 14-20, 24-32). Для каждой выделенной подгруппы были построены графики, показывающие динамику дифференциальных потоков электронов 31.7, 270 и 925 МэВ при изменении трех остальных параметров. На рис. 2 представлена зависимость потоков электронов от Кр индекса (рис. 2.1, 2.2 и 2.3), плотности  $N$  см<sup>-3</sup> (рис.2.4, 2.5 и 2.6) и модуля Dst индекса (рис. 2.7, 2.8 и 2.9) для трех 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. 3.1, 3.2 и 3.3), плотности  $N$  см<sup>-3</sup> (рис. 3.4, 3.5 и 3.6) и модуля Dst индекса (рис.3.7, 3.8 и 3.9) для трех подгрупп Кр индекса (15-20, 21-25, 26-30). На рис. 4 представлена зависимость потоков электронов от Кр индекса (рис. 4.1, 4.2 и 4.3), скорости  $V$  км/с (рис 4.4, 4.5 и 4.6) и модуля Dst индекса (рис.4.7, 4.8 и 4.9) для трех 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. 5.1, рис. 5.2 и рис. 5.3), скорости  $V$  км/с (рис. 5.4, 5.5 и 5.6) и Кр индекса (рис. 5.7, 5.8 и 5.9) для трех 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 Кр индекса. Влияние Кр индекса на изменение зависимости потоков от скорости можно получить из рис.2.1, 2.2 и 2.3. 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 Кр=21 и на 40% для Кр =26, соответствующие величины для электронов 925 кэВ равны 71% и 110%. Вклад увеличения Кр 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 Кр получено при анализе рис. 3.1, 3.2 и 3.3. При увеличении Кр индекса от 15 до 28 единиц интенсивность электронов 31.7 кэВ увеличивается ~ на 43% для скорости  $V=570$  км/с и на 26 % для  $V=660$  км/с, соответствующие величины для электронов 925 кэВ равны ~34% и ~ 50%. Таким образом, для выбранного диапазона Кр индекса вклад скорости в уменьшение интенсивности электронов 31.7кэВ и увеличение интенсивности электронов 925 кэВ составляет ~ 15 % . Аналогичным способом при сравнении рисунков были выделены и другие зависимости: скорость  $V$  и плотность  $N$  — рисунки

2.4-2.6 и 4.4-4.6; скорость  $V$  и Dst индекс — рисунки 2.7-2.9 и 5.4-5.6; плотность  $N$  и  $K_p$  индекс—рисунки 3.4-3.6 и 4.4-4.6; плотность  $N$  и Dst индекс— рисунки 4.7-4.9 и 5.1-5.3.

### Основные результаты.

При анализе влияния на структуру энергетических спектров электронов ВРПЗ вариаций скорости СВ (диапазон 400-670 км/с), плотности СВ (диапазон 6-20 см<sup>-3</sup>),  $K_p$ -индекса (диапазон 15-30 величин) и Dst -индекса (диапазон по модулю |3-32|) получены следующие результаты. Используемые обозначения:  $\Delta J(N6-20)$  — разница в процентах величины интенсивности электронов при плотности  $N=6$  см<sup>-3</sup> и при плотности  $N=20$  см<sup>-3</sup>;  $\Delta J(V570-640)$  — разница в процентах величины интенсивности при скорости 570 км/с и при скорости 640 км/с;  $\Delta J(Dst22-30)$  — разница в процентах величины интенсивности электронов при значении  $|Dst|=22$  и при  $|Dst|=30$ ,  $\Delta J(Kp18-23)$  — разница в процентах величины интенсивности электронов при значении  $K_p=18$  и  $K_p=23$ .

Связь вариаций потоков электронов с динамикой скорости и плотности СВ и величинами  $K_p$  и Dst геомагнитными индексами.

#### *Скорость $V$ и $K_p$ индекс.*

При увеличении скорости СВ (диапазон 400-670 км/с) потоки электронов **31.7 кэВ** увеличиваются на ~25% для  $K_p=21$  и на ~40% для  $K_p=26$ . Для электронов 925 кэВ эти величины равны ~46% для  $K_p=18$ , на ~70% для  $K_p=21$  и на ~110% для  $K_p=26$ . При  $K_p < 18$  потоки не зависят от скорости. Увеличение  $K_p$  индекса от 21 до 26 единиц увеличивает потоки электронов 31.7 кэВ и 925 кэВ соответственно на ~15% и ~40%. При увеличении  $K_p$  индекса (диапазон 15-30) потоки электронов 31.7 кэВ увеличиваются на ~43% для 570 км/с, на ~32% для  $V=625$  км/с и на ~26% для  $V=660$  км/с. Для электронов 925 кэВ эти величины равны ~34% для  $V=570$  км/с, на ~43% для  $V=625$  км/с и ~50% для  $V=660$  км/с. Таким образом, для выбранного диапазона  $K_p$  индекса вклад скорости в уменьшение интенсивности электронов 31.7 кэВ и увеличение интенсивности электронов 925 кэВ составляют ~15%.

#### *Скорость $V$ и плотность $N$*

При увеличении скорости СВ (диапазон 400-670 км/с) интенсивность электронов **31.7 кэВ** увеличивается на ~60% для плотности  $N=7$  см<sup>-3</sup> и на ~80% для  $N=14$  см<sup>-3</sup>. Для электронов 925 кэВ эти величины равны ~70% для  $N=7$  см<sup>-3</sup> и на ~260% для  $N=14$  см<sup>-3</sup>. Для диапазона скорости (400-670 км/с) увеличение плотности в два раза наиболее значительно для динамики релятивистских электронов: вклад в увеличение интенсивности в среднем составляет ~20% и ~160% для **31.7 кэВ** и **925 кэВ** электронов. При увеличении плотности  $N$  (диапазон 6-20 см<sup>-3</sup>) падение интенсивности электронов **31.7 кэВ** составляет ~30% для  $V=500$  км/с и не зависит от скорости. При увеличении плотности  $N$  (диапазон 6-20 см<sup>-3</sup>) падение интенсивности электронов **925 кэВ** составляет ~64% для  $V=500$  км/с и ~27% для  $V=640$  км/с, т.е. увеличение скорости компенсирует падение интенсивности при увеличении плотности.

#### *Скорость $V$ и Dst индекс~*

При увеличении скорости СВ (диапазон 400 - 600 км/с) потоки электронов **31.7 кэВ** увеличиваются на ~30% для всех величин  $Dst < 22$  единиц. При увеличении скорости СВ (диапазон 400 - 600 км/с) увеличение потоков электронов **925 кэВ** равно ~30% для  $Dst=10$  и ~90% для  $Dst=22$ . Для  $Dst > 22$  и  $V > 600$  км/с интенсивность электронов **31.7 кэВ** и **925 кэВ** не

зависит от скорости, зависит только от величины Dst. При увеличении Dst (диапазон 3-32) увеличение интенсивности электронов **31.7 кэВ** составляет ~65% для  $V=550$  км/с и ~30% для  $V=625$  км/с, увеличение интенсивности электронов **925 кэВ** не зависит от скорости и равняется ~160% для  $V=550$  км/с.

*Плотность N и Kp индекс*

При увеличении плотности (диапазон 6-20 см<sup>-3</sup>) потоки электронов **31.7 кэВ** и **925 кэВ** уменьшаются соответственно на ~52% и ~60% для  $Kp=20$  и на ~12% и ~40% для  $Kp=26$ . Увеличение  $Kp$  снижает влияние плотности, эффект больше для электронов **31.7 кэВ**. При увеличении  $Kp$  индекса (диапазон 15-30) увеличение потоков электронов **31.7 кэВ** и **925 кэВ** составляет соответственно ~62% и ~60% для  $N=7$  см<sup>-3</sup> и ~105% и ~280% для  $N=14$  см<sup>-3</sup>. Для диапазона  $Kp$  15-30 единиц вклад увеличения плотности в два раза в увеличение интенсивности для электронов 31.7 кэВ и 925 кэВ составляет ~40% и более 100%.

*Плотность N и Dst индекс*

При увеличении плотности  $N$  (диапазон 6 - 20 см<sup>-3</sup>) потоки электронов **31.7 кэВ** уменьшаются:  $\Delta J(N3-20)=43\%$  для  $Dst=12$  и  $\Delta J(N3-20)=15\%$  для  $Dst=20$ . При  $N<6$  и  $Dst<9$  интенсивность не зависит от изменений плотности и Dst-индекса. При увеличении плотности  $N$  (диапазон 6-20 см<sup>-3</sup>) потоки электронов **925 кэВ** уменьшаются:  $\Delta J(6-20)=26\%$  для  $Dst=20$  и  $\Delta J(6-20)=35\%$  для  $Dst=24$ . При увеличении плотности  $N$  в диапазоне  $N=6-12$  см<sup>-3</sup> и  $Dst<18$  интенсивность растет:  $\Delta J(N6-12)=40\%$  для  $Dst=12$ , для диапазона  $N$  от 12 см<sup>-3</sup> до 20 см<sup>-3</sup> и для  $Dst=12$  интенсивность не зависит от плотности. При увеличении Dst (диапазон 3 - 32) потоки электронов **31.7 кэВ** увеличиваются:  $\Delta J(Dst3-32)=37\%$  для  $N=8$  и  $\Delta J(Dst3-32)=55\%$  для  $N=14$ . При увеличении Dst (диапазон 3 - 32) потоки электронов **925 кэВ** увеличиваются:  $\Delta J(Dst3-32)=300\%$  для  $N=8$  и  $\Delta J(Dst3-32)=170\%$  для  $N=14$ .

*Скорость V, плотность N, геомагнитные индексы Kp и Dst*

Потоки электронов **270 кэВ** (это средняя энергия «зародышевой» группы электронов) не зависят (в пределах 10% точности) от скорости и плотности СВ и от  $Kp$  и Dst индексов геомагнитной активности.

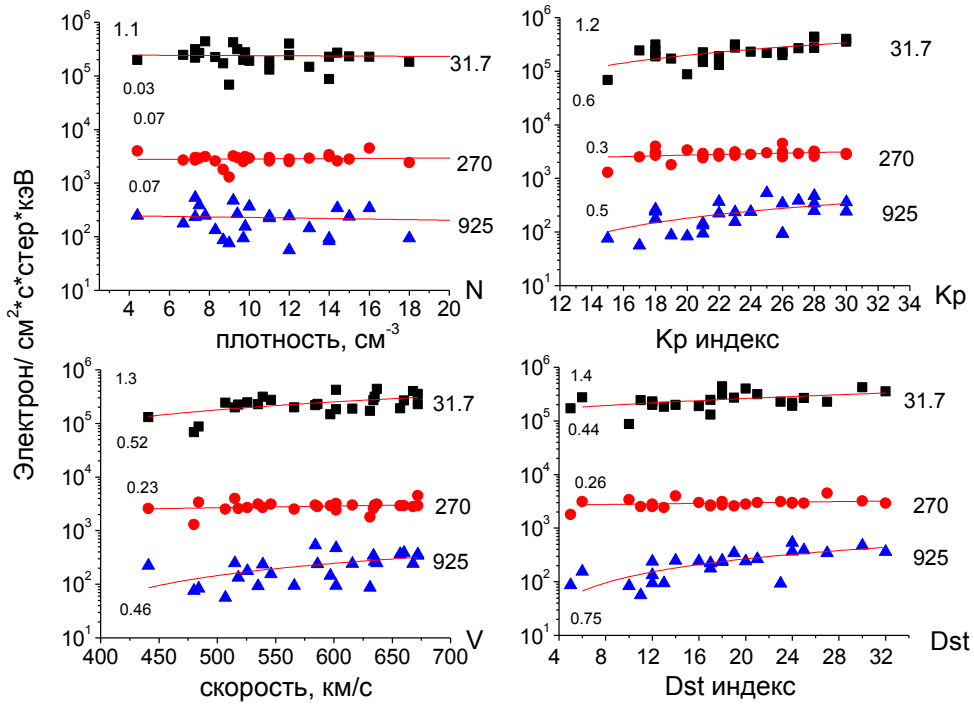


Рис.1 Динамика дифференциальных потоков электронов при изменении плотности  $N \text{ см}^{-3}$  (рис.1.1), Kp индекса (рис.1.2), скорости  $V \text{ км/с}$  (рис. 1.3) и модуля Dst индекса (рис. 1.4). Для каждой кривой справа указаны энергии электронов в кэВ, слева коэффициенты линейной корреляции.

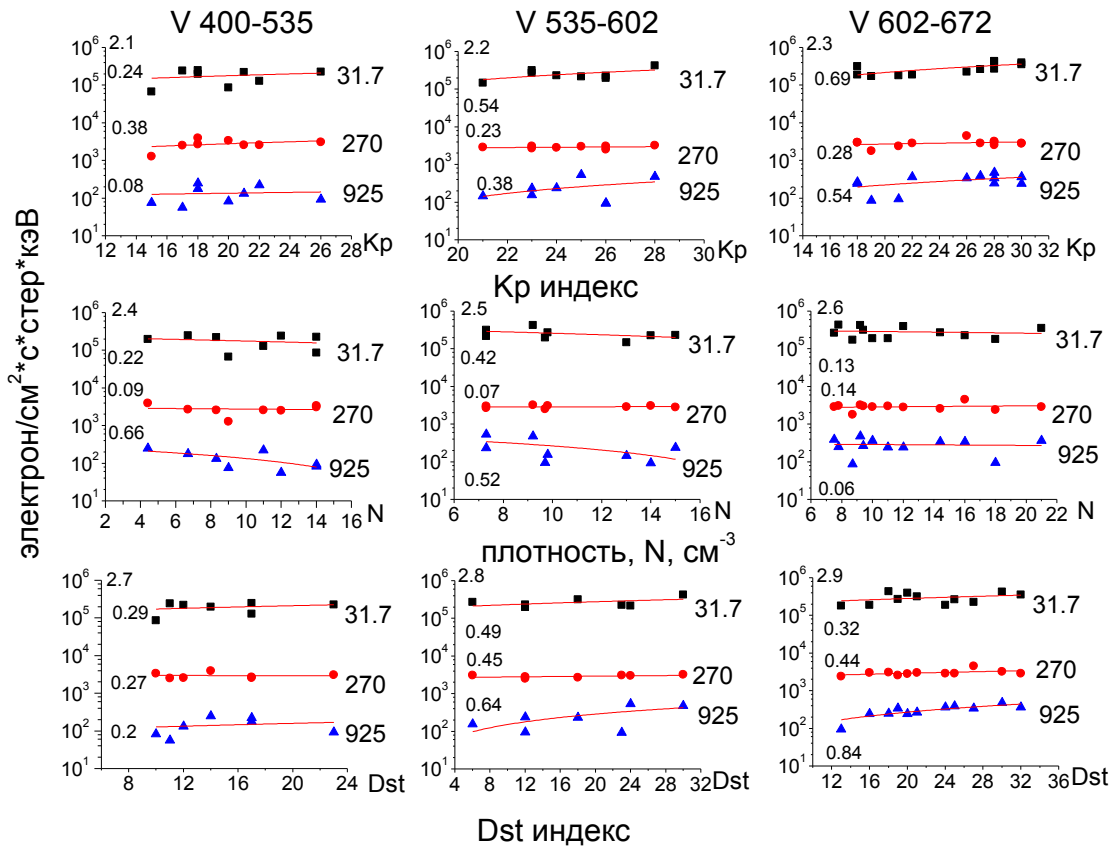


Рис.2 Зависимость дифференциальных потоков электронов от Kp индекса (рис. 2.1, 2.2 и 2.3), плотности СВ в см<sup>-3</sup> (рис.2.4, 2.5 и 2.6) и модуля Dst индекса (рис. 2.7, 2.8 и 2.9) для трех подгрупп скорости СВ (400-535 км/с, 535-602 км/с и 602-670 км/с). Для каждой кривой справа указаны энергии электронов в кэВ, слева коэффициенты линейной корреляции.



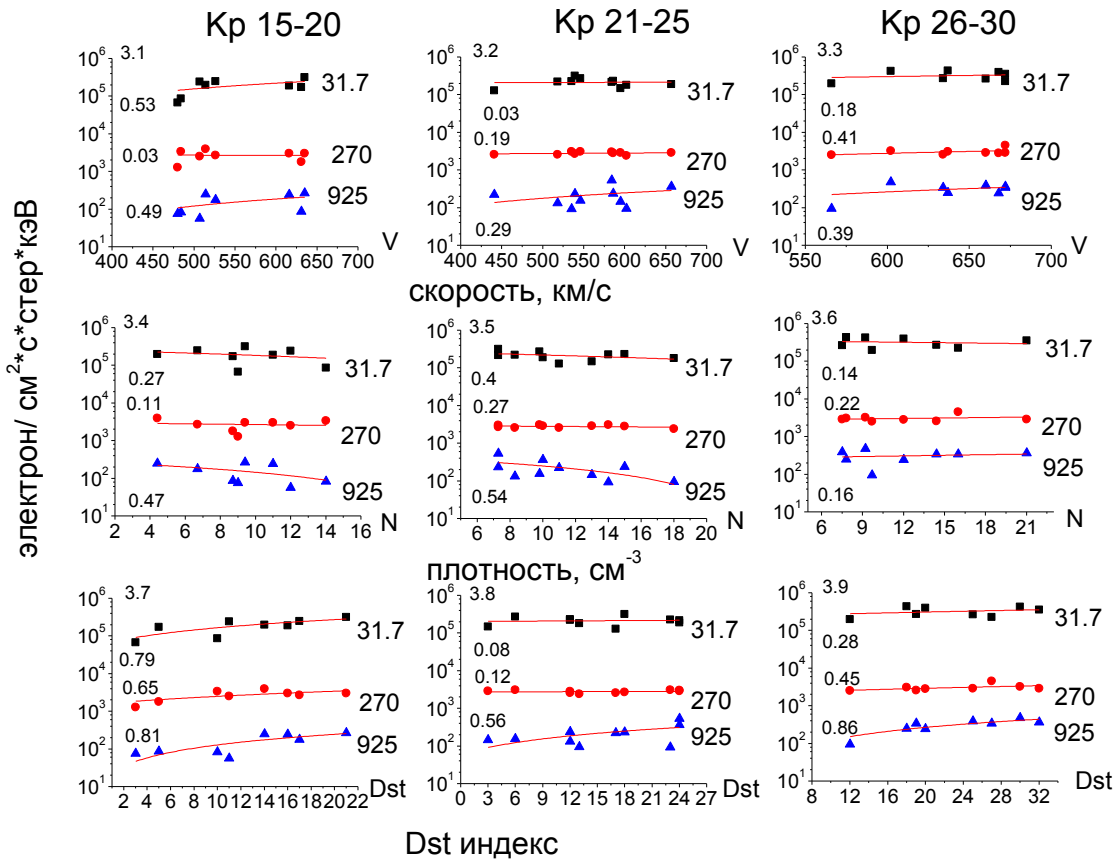


Рис.3 Зависимость дифференциальных потоков электронов от скорости  $V$  км/с (рис. 3.1, 3.2 и 3.3), плотности  $\text{см}^{-3}$  (рис. 3.4, 3.5 и 3.6) и модуля Dst индекса (рис.3.7, 3.8 и 3.9) для трех подгрупп Кр индекса (15-20, 21-25, 26-30). Для каждой кривой справа указаны энергии электронов в кэВ, слева коэффициенты линейной корреляции.

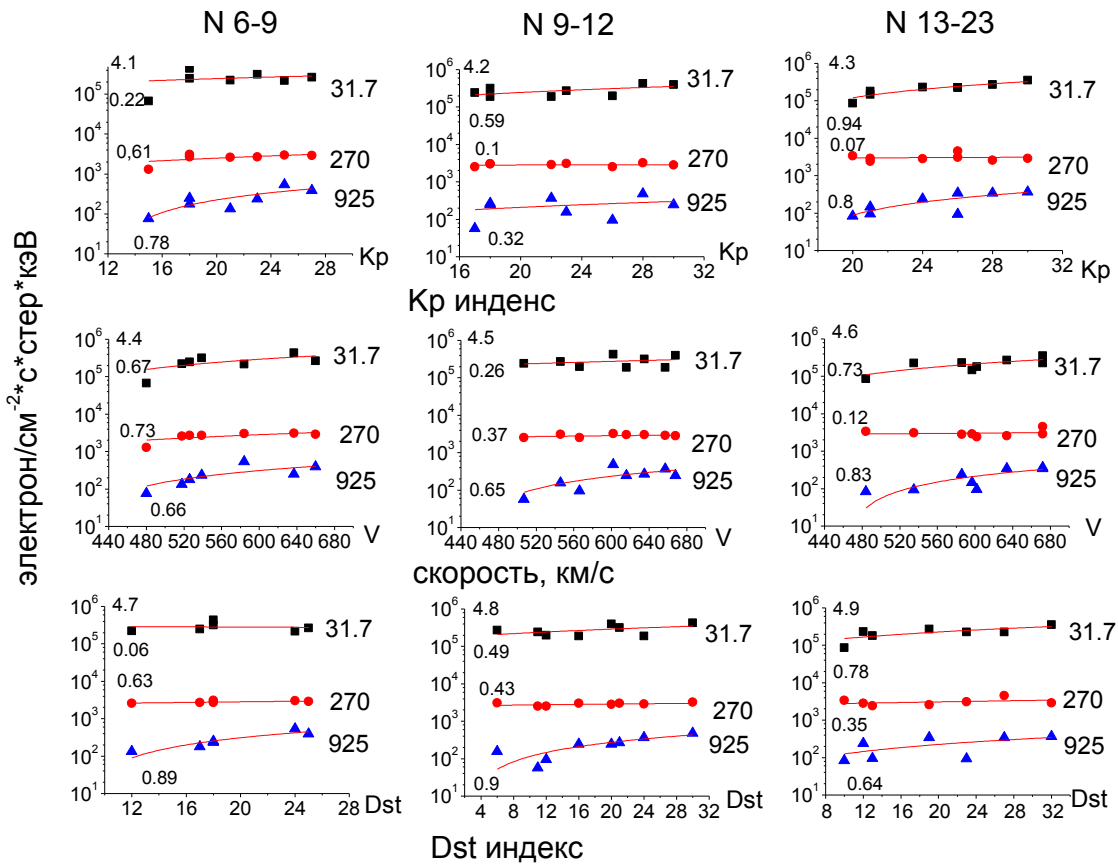


Рис.4 Зависимость дифференциальных потоков электронов от Kp индекса (рис. 4.1, 4.2 и 4.3), скорости V км/с (рис. 4.4, 4.5 и 4.6) и модуля Dst индекса (рис.4.7, 4.8 и 4.9) для трех подгрупп плотности (6-9 см<sup>-3</sup>, 9-12 см<sup>-3</sup>, 13-20 см<sup>-3</sup>). Для каждой кривой справа указаны энергии электронов в кэВ, слева коэффициенты линейной корреляции.

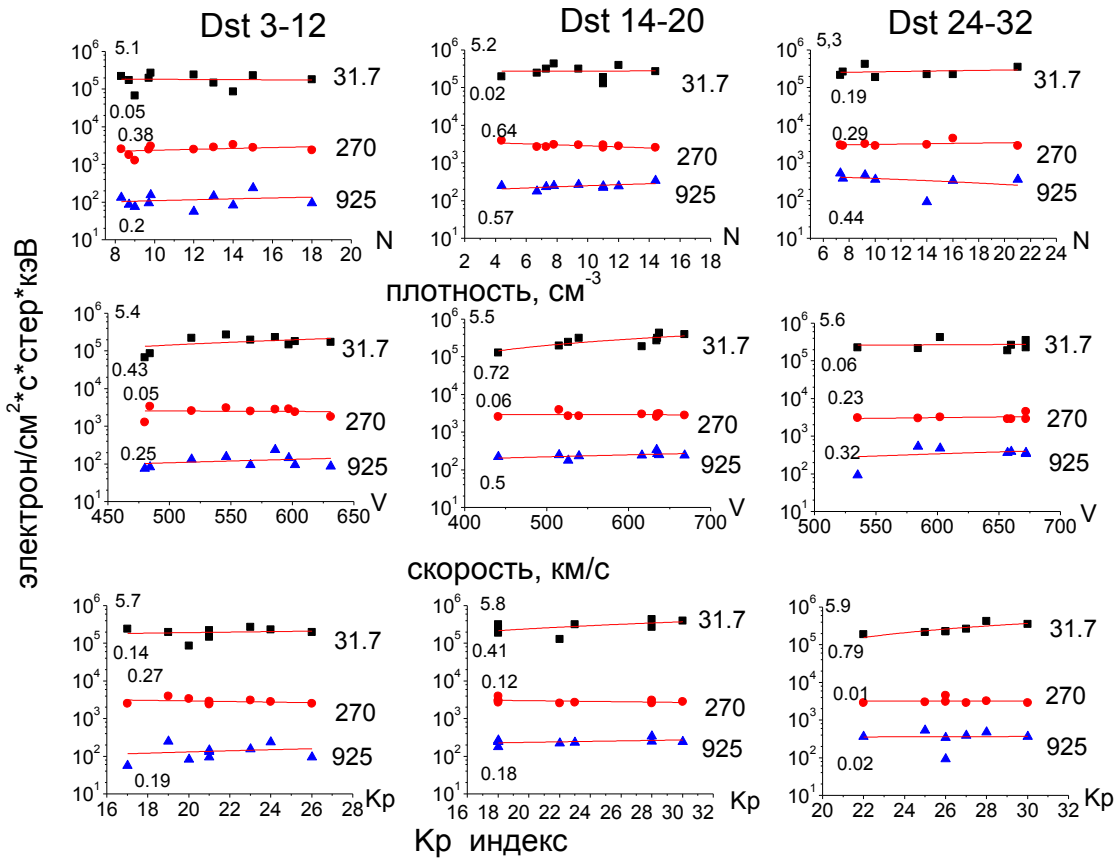


Рис. 5 Зависимость дифференциальных потоков электронов от плотности  $N \text{ см}^{-3}$  (рис. 5.1, рис. 5.2 и рис. 5.3), скорости  $V \text{ км/с}$  (рис. 5.4, 5.5 и 5.6) и Kp индекса (рис. 5.7, 5.8 и 5.9) для трех подгрупп Dst индекса ((3-12, 14-20, 24-32). Для каждой кривой справа указаны энергии электронов в кэВ, слева коэффициенты линейной корреляции.

## 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, 102, 14,141–14,148, doi:10.1029/97JA00565
3. Transport of the plasma sheet electrons to the geostationary distances/ Ganushkina, N. Y., O. A. Amariutei, Y. Y. Shprits, and M. W. Liemohn // J. Geophys. Res. Space Physics, 2013 . vol. 118, 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, vol. 119, 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, 11,826–11,838, doi:10.1002/2016JA023550
6. Near-Earth injection of MeV electrons associated with intense depolarization electric fields: Van Allen Probes observations/Lei Dai1, 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, vol. 42, 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, 7785–7794, doi:10.1002/2016GL069691
- 8.. Global model of lower band and upper band chorus from multiple satellite observations/ Meredith, N. P., R. B. Horne, A. Sicard-Piet, D. Boscher, K. H. Yearby, W. Li, and R. M. Thorne//J. Geophys. Res.,2012, vol. 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, vol. 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, 13.165

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, vol. 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, vol. 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, vol. 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, vol. 118, 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, vol. 121, 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, vol. 341, 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, vol. 122, 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, vol. 121, 11,007–11,020, 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, vol. 42, 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, vol. 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, 10,023–10,040, 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, vol. 114, A12214, doi:10.1029/2009JA014333.

26. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions/ Thorne, R. M.//*Geophys. Res. Lett.*, 2010, vol. 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/ Borovsky, J. E., and K. Yakymenko// *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2017, vol. 122, doi:10.1002/2017JA024250
28. Thomsen, M. F. (2004), Why Kp is such a good measure of magnetospheric convection?/ *Space Weather*/ Thomsen, M. F.// *Space Weather*, 2004, vol. 2, S11004, doi:10.1029/2004SW000089.
29. SuperMAG-based partial ring current indices/ Newell, P. T., and J. W. Gjerloev// *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 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, vol. 31(4), 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. Vol. 118, 756–764, doi:10.1029/2012JA018179.
32. Characteristics of precipitating energetic electron fluxes relative to the plasmopause during geomagnetic storms/ Whittaker, I. C., M. A. Clilverd, and C. J. Rodger (2014)//*J. Geophys. Res. Space Physics*, 2014. Vol. 119, 8784–8800, doi:10.1002/2014JA020446.
33. The effects of magnetospheric processes on relativistic electron dynamics in the Earth's outer radiation belt/ Tang, C. L., 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, vol. 122, 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\*/ Zhao, H., 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. vol. 122, 1624–1642, doi:10.1002/2016JA023658.
35. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited/ Reeves, G. D., 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, 1040–1048, doi:10.1002/jgra.50126
37. Information theoretical approach to discovering solar wind drivers of the outer radiation belt/ Wing, S., J. R. Johnson, E. Camporeale, and G. D. Reeves //*J. Geophys. Res. Space Physics*, 2016, vol, 121, 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 ,vol. 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/ Li, W., 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, vol. 42, 6906–6915, doi:10.1002/2015GL065342.
42. 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// М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». - 2017. Том. 156, № 1, с.33-49  
<http://www.cosmic-rays.ru/articles/02/201703pdf>.
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, p. 195–217