

Формирование структуры энергетических спектров электронов на геостационарной орбите рекуррентными потоками солнечного ветра

И.П. Безродных, Е.И. Морозова, А.А. Петрукович (ИКИ РАН)
М.Н. Будяк, В.Т. Семёнов (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Введение

Одной из задач "космической погоды" является прогноз влияния высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ) на динамику потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) и, в частности, выбор параметров СВ, формирующих структуру потока электронов в магнитосфере Земли. В настоящее время достаточно подробно разработаны и экспериментально подтверждены физические процессы, возникающие в магнитосфере Земли при воздействии высокоскоростных потоков СВ. Основные процессы, формирующие структуру потоков электронов ВРПЗ — радиальная диффузия, резонансное взаимодействие электронов с электромагнитными волнами, адиабатическая транспортировка, потери на магнитопаузе и в атмосфере — эти процессы связаны (прямо или косвенно) со структурой пакетов EMIC, VLF и ULF волн [1—5]. Динамические вариации потоков электронов отражают сложный баланс конкурирующих процессов ускорения и потерь частиц. Скорость и плотность СВ, а также направление межпланетного магнитного поля (ММП) являются основными параметрами, определяющими вероятность возникновения и эффективность этих процессов. Резонансное взаимодействие волна-частица [6-9] является одним из основных факторов, формирующих потоки электронов ВРПЗ. Влияние локальных резонансных процессов на формирование структуры потоков электронов ВРПЗ тесно связано со структурой волновых пакетов электромагнитных волн с частотами от десятков кГц до 10^4 Гц, возбуждаемых в магнитосфере при воздействии высокоскоростных потоков СВ. Вариации скорости и плотности СВ определяют диапазон частот и амплитуду волновых пакетов, и соответственно во многом определяют структуру потоков электронов ВРПЗ [10-16].

Для объяснения сложной и часто неоднозначной связи структуры потоков релятивистских электронов ВРПЗ со скоростью СВ [17,18] многими авторами проводился анализ влияния плотности СВ на динамику потоков электронов ВРПЗ. В работе [19] 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. Избирательный характер влияния плотности СВ на энергетические спектры электронов ВРПЗ показан в работе [20] (данные спутников SAMPEX и POES). Высокоплотные потоки СВ провоцируют возбуждение в магнитосфере EMIC волн (в области взаимодействия холодной плазменной плазмы и сверхтепловых ионов из плазменного слоя). Было показано, что EMIC волны эффективно резонируют с релятивистскими электронами > 2.5 МэВ и рассеивают их в атмосферу, что приводит к трансформации спектра электронов ВРПЗ. Статистический анализ связи потоков электронов ВРПЗ (энергии электронов от 24 кэВ и до > 2 МэВ) с параметрами СВ и индексами геомагнитной активности проведен в работе [21] (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 \sim для 60% случаев, плотность СВ \sim для 20% случаев, для остальных 20% — индексы геомагнитной активности. Исследование зависимости величин наиболее вероятных потоков электронов ВРПЗ отдельно от скорости и плотности потоков СВ проведено в работе [22]. Для анализа использовалась база данных (\sim за 20 лет) измерений потоков электронов на спутниках LANL-GEO. В работе построены зависимости величин наиболее вероятных потоков электронов от скорости СВ при постоянной плотности и от плотности при постоянной скорости. Диапазон используемых величин плотности 2-8 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.

Целью нашей работы является анализ и получение количественных оценок влияния скорости и плотности СВ в качестве изолированных параметров (эти величины некоррелированные) на структуру энергетических спектров потоков электронов ВРПЗ, сформированных в 2007 г. при воздействии отдельных достаточно изолированных высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ). Основным источником высокоскоростных потоков солнечного ветра в 2007 г. были низкоширотные корональные дыры. Рекуррентные потоки СВ со скоростью > 500 км/с наблюдались $\sim 30\%$ времени, со скоростью > 400 км/с $\sim 60\%$, $\sim 10\%$ времени регистрировались потоки со скоростью > 600 км/с, средняя скорость медленного ветра составила ~ 344 км/с. В 2007 г. (минимум солнечной активности) структура межпланетного пространства была достаточно однородна. Это дало возможность выделить влияние плотности и скорости при формировании потоков электронов ВРПЗ практически однородных структур СВ.

Результаты обработки экспериментальных данных

В работе использована база данных спутника LANL—GEO за 2007 г. по измерению потоков электронов на геостационарной орбите (сайт [ftp://ftp.agu.org/apend/ja/2010ja015735]) и база данных OMNI для параметров солнечного ветра (сайт [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html]). В работе для всех параметров использованы среднесуточные значения. В 2007 г. было зарегистрировано 29 возрастных потоков электронов, сформированных при воздействии 29 высокоскоростных потоков. На рис. 1 показаны энергетические спектры максимальных потоков электронов для 25 выделенных событий (диапазон энергии 24.1 кэВ - 2 МэВ, 13 энергетических каналов). Для каждого события при вычислении энергетических спектров использовались максимальные в каждом дифференциальном канале потоки электронов. Отметим сильные вариации величин потоков в различных событиях, наиболее значительные для энергий электронов > 1 МэВ.

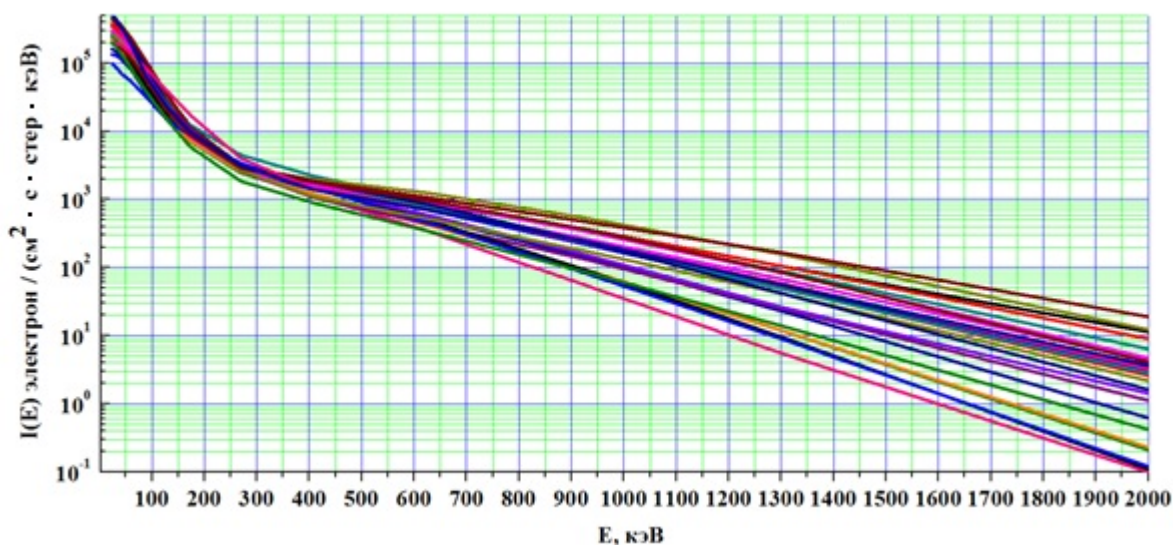


Рис. 1. Спектры максимальных потоков электронов для 25 возрастных потоков электронов, зарегистрированных в 2007 г.

Для выделения влияния плотности и скорости СВ на формирование энергетических спектров, мы разделили все события на 6 подгрупп: три диапазона плотности и три диапазона скорости СВ. Были построены зависимости дифференциальных потоков электронов при изменении скорости СВ от 400 км/с до 700 км/с для трех диапазонов плотности СВ: $6-9$ см $^{-3}$, $9-12$ см $^{-3}$ и $13-21$ см $^{-3}$ (рис. 2) и зависимости дифференциальных потоков электронов при изменении плотности СВ от 4 см $^{-3}$ до 22 см $^{-3}$ для трех диапазонов скорости СВ 440-535 км/с, 535-602 км/с и 602-668 км/с (рис. 3). Для анализа были использованы величины плотности на переднем крае высокоскоростного потока СВ [23]. Вариации давления СВ являются основным параметром для механизма возбуждения магнитосферных ULF-волн, которые, в свою очередь, определяют структуру потоков электронов ВРПЗ [24]. Рассмотрим динамику потоков электронов в зависимости от скорости СВ при постоянных величинах плотности (рис. 2).

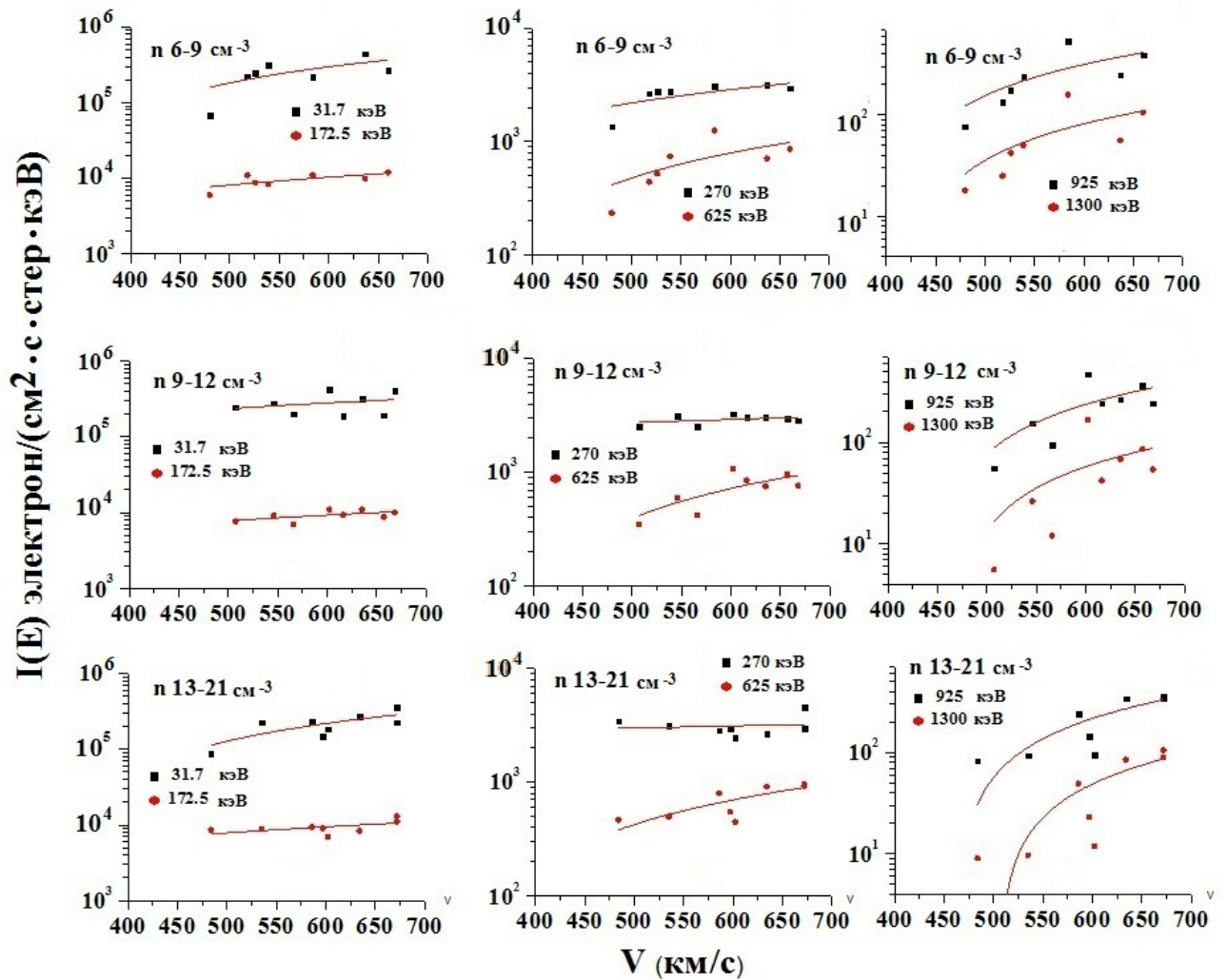


Рис. 2 Зависимость максимальных потоков электронов для 6 диапазонов энергии (31.7 кэВ, 172.5 кэВ, 270 кэВ, 625 кэВ, 925 кэВ и 1300 кэВ) от скорости СВ для трех диапазонов плотности СВ $6-9 \text{ см}^{-3}$, $9-12 \text{ см}^{-3}$ и $13-21 \text{ см}^{-3}$.

Выделим наиболее интересные результаты. Для всех диапазонов плотности с увеличением скорости СВ потоки электронов возрастают, но зависимости от энергии частиц по-разному для каждого диапазона плотности, что указывает на нелинейный характер связи величин потоков электронов со скоростью СВ. Отметим близкое подобие зависимости вариаций потоков электронов, от скорости для трех диапазонов энергии частиц: 31.7 – 90 кэВ, 172.5–407.5 кэВ и ≥ 625 кэВ (на рис. 2 показана только часть кривых). При заданной скорости потоки электронов < 100 кэВ увеличиваются при увеличении плотности для диапазона $6-12 \text{ см}^{-3}$ и уменьшаются для диапазона $9-21 \text{ см}^{-3}$. При увеличении скорости больше 530 км/с для энергий электронов ≤ 407.5 кэВ зависимость от скорости ослабевает, наиболее значительно для высоких плотностей (эффект насыщения). Минимальные вариации потоков электронов при изменении скорости и плотности СВ регистрируются для энергий электронов 172,5—407.5 кэВ. Потоки электронов ≥ 625 кэВ для заданной скорости с увеличением плотности значительно уменьшаются, для энергии 1300 кэВ ~ в 4.5 раза для диапазона плотности $6-12 \text{ см}^{-3}$ и ~ в 16 раз для диапазона плотности $9-21 \text{ см}^{-3}$. Для релятивистских энергий ≥ 925 кэВ влияние скорости при увеличении плотности усиливается (наклоны кривых увеличиваются). Далее рассмотрим влияние плотности СВ на формирование потоков электронов для трех выделенных диапазонов скорости 440-535 км/с, 535-602 км/с и 602-668 км/с (рис.3).

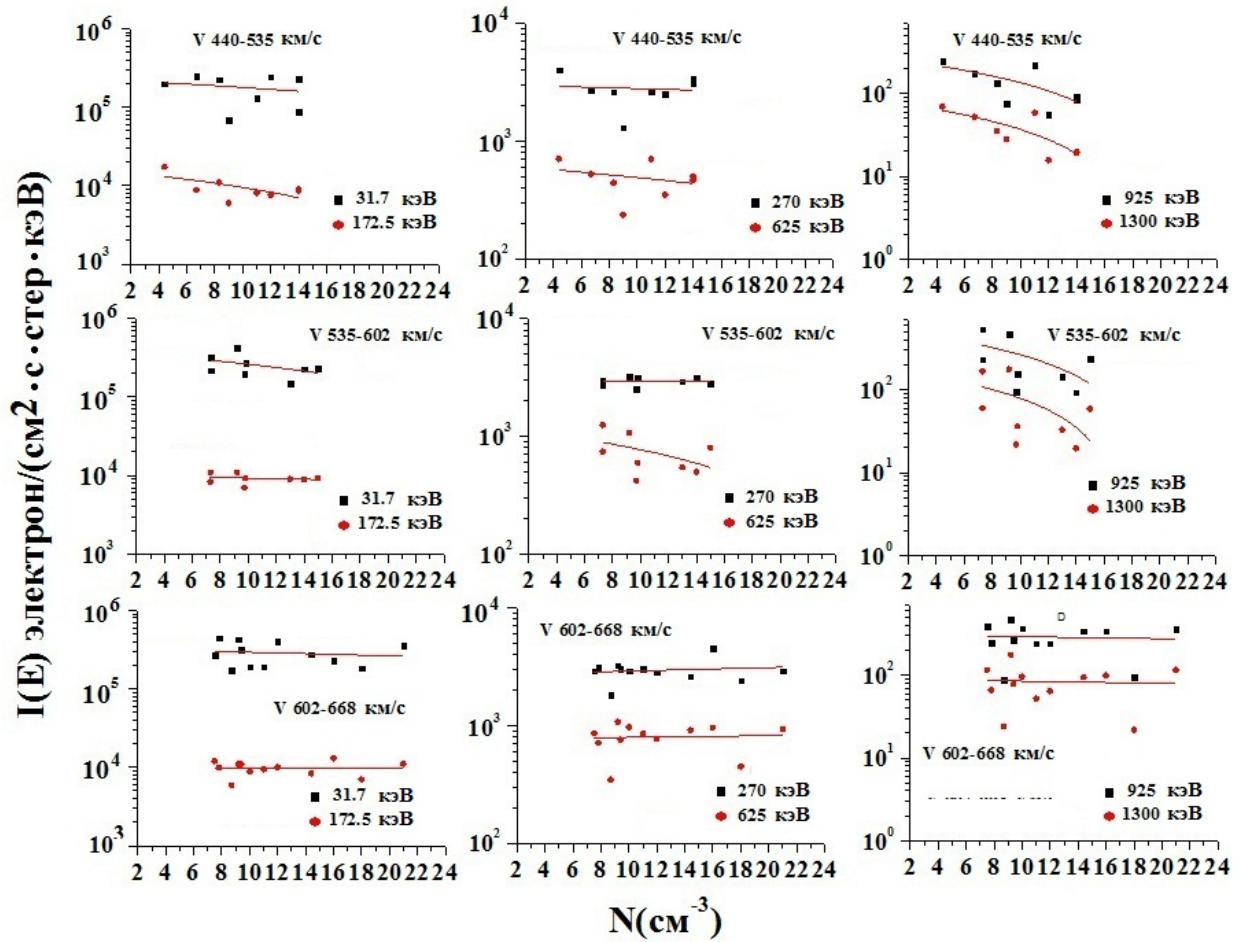


Рис.3 Зависимость максимальных потоков электронов для 6 диапазонов энергии (31.7 кэВ, 172.5 кэВ, 270 кэВ, 625 кэВ, 925 кэВ и 1300 кэВ) от плотности СВ для трех диапазонов скорости СВ 440-535 км/с, 535-602 км/с и 602-668 км/с.

Для всех диапазонов скорости СВ при увеличении плотности СВ потоки электронов уменьшаются, но в зависимости от энергии частиц по-разному для каждого диапазона скорости, что также указывает на нелинейный характер связи величин потоков электронов с плотностью СВ. Выделим наиболее общие результаты. При данной плотности СВ с увеличением скорости СВ для всех энергий потоки электронов возрастают. Для энергий < 200 кэВ и плотности СВ от 4 до 14 см^{-3} потоки электронов уменьшаются незначительно, в среднем на 20-30 %. Отметим, что при плотности < 8 см^{-3} и скорости < 520 км/с потоки электронов ≤ 50 кэВ увеличиваются. Потоки электронов в диапазоне $\sim 270 - 407.5$ кэВ для каждого диапазона скоростей практически не меняются при изменении плотности. При скоростях $\sim 400 - 600$ км/с потоки электронов с энергий ≥ 625 кэВ уменьшаются при увеличении плотности, наиболее значительно для высоких энергий (наклон кривых увеличивается). Например, для диапазона скорости $535 - 602$ км/с при изменении плотности от 7 до 15 см^{-3} потоки электронов уменьшаются в 1.6, 2.5 и 3.7 раз соответственно для энергий 625 кэВ, 925 кэВ и 1300 кэВ. Интересно, что при скоростях > 650 км/с потоки электронов ≥ 625 кэВ в диапазоне плотностей $7 - 21$ см^{-3} практически не зависят от плотности. Для сравнения влияния скорости и плотности СВ были вычислены средние энергетические спектры электронов для трех диапазонов плотности СВ (рис. 4а) и трех диапазонов скорости СВ (рис. 4б).

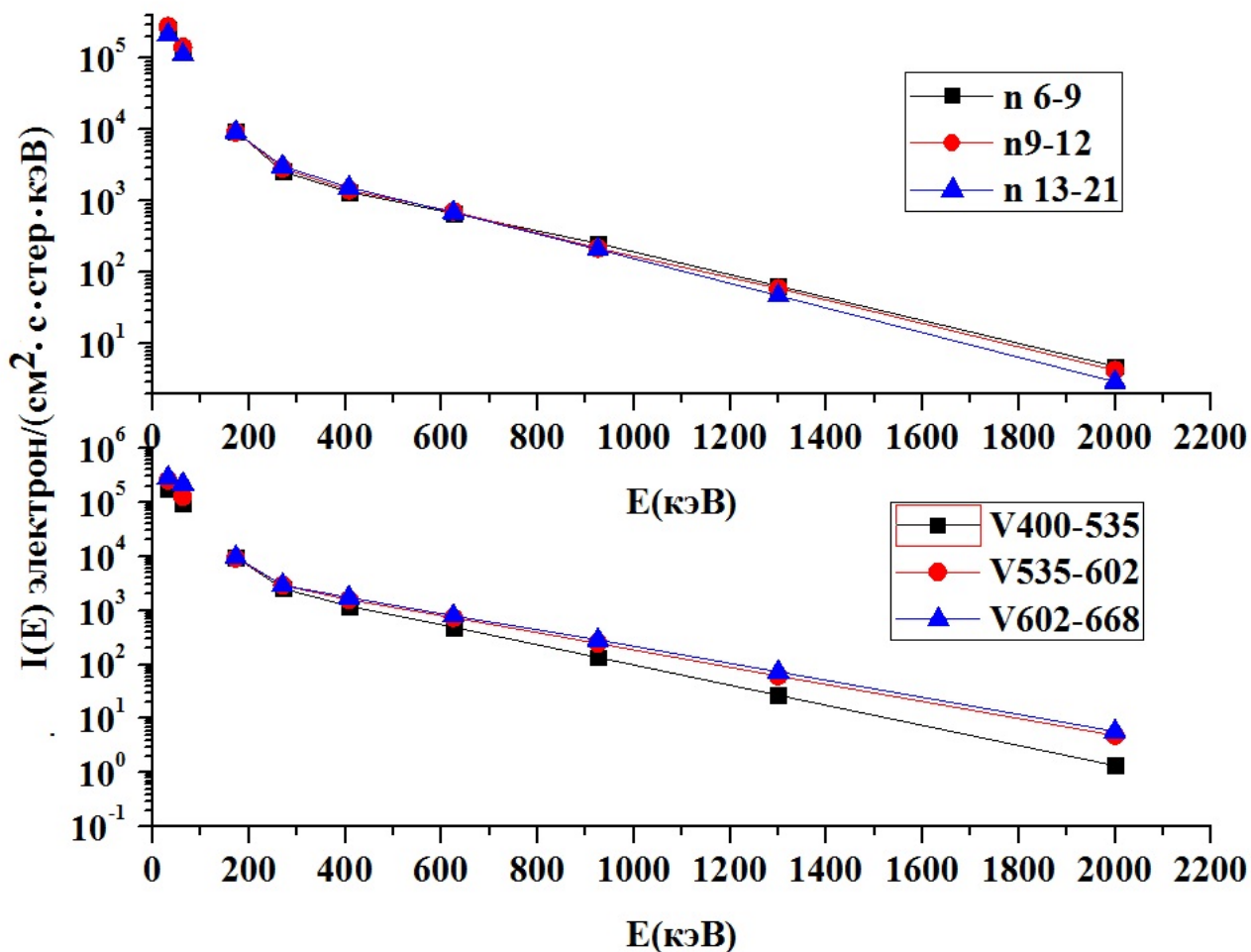


Рис. 4 Средние энергетические спектры электронов для трех диапазонов плотности СВ и трех диапазонов скорости СВ.

При сопоставлении средних спектров для шести выделенных диапазонов плотности и скорости получены следующие зависимости: увеличение потоков электронов при возрастании скорости СВ, наиболее значительное для релятивистских энергий; уменьшение потоков электронов при возрастании плотности СВ, наиболее значительное для релятивистских энергий; в среднем, потоки электронов при высокой скорости СВ выше, чем при высокой плотности; минимальные вариации потоков электронов 172—407 кэВ при изменении плотности и скорости СВ.

Результаты статистического анализа позволяют выделить некоторые общие характеристики в зависимости максимальных потоков электронов ВРПЗ от соотношения величин скорости и плотности в высокоскоростных потоках СВ. При увеличении скорости СВ для всех энергий ((диапазон 31.7 – 2000 кэВ) регистрируется увеличение потоков электронов. При увеличении плотности СВ для всех энергий регистрируется уменьшение потока электронов. Наиболее значительные изменения при изменении скорости и плотности наблюдаются для электронов > 925 кэВ. Эффекты нелинейно зависят от энергии частиц (потоки электронов формируют несколько конкурирующих процессов). Скорость СВ является основным фактором, определяющим возрастание потоков электронов ВРПЗ, для данной плотности с увеличением скорости СВ потоки электронов увеличиваются. Значительные отличия динамики потоков электронов при изменении параметров СВ наблюдаются для трех диапазонов энергии электронов : < 100 кэВ, 100 – 400 кэВ и электроны с энергией > 625 кэВ. Динамика потоков электронов отражает сложный баланс влияния различных физических механизмов, возникающих в магнитосфере Земли при воздействии высокоскоростных потоков СВ. Особенности динамики отдельных групп электронов определяются зависимостью от параметров СВ физического механизма, наиболее эффективного для формирования данной группы частиц [1, 8, 25, 26,27)].

Для получения количественных оценок влияния скорости и плотности СВ был проведен анализ энергетических спектров электронов в отдельных событиях (рис. 5, 6 и 7). При этом для сравнения энергетических спектров были выделены события, сформированные при близких значениях скорости

СВ и разных величинах плотности, а также при близких величинах плотности СВ и разных величинах скорости. На рис.5а приведены энергетические спектры для событий при средней скорости ~ 516 км/с и плотности 4.4 и 8.3 см^{-3} и для события при плотности $\sim 8,7$ см^{-3} и скорости 631 км/с. На рис.5.б приведены спектры для событий при средней скорости ~ 537 км/с и плотности 7.3 и 14 см^{-3} и для события при плотности ~ 14 см^{-3} и скорости 484 км/с

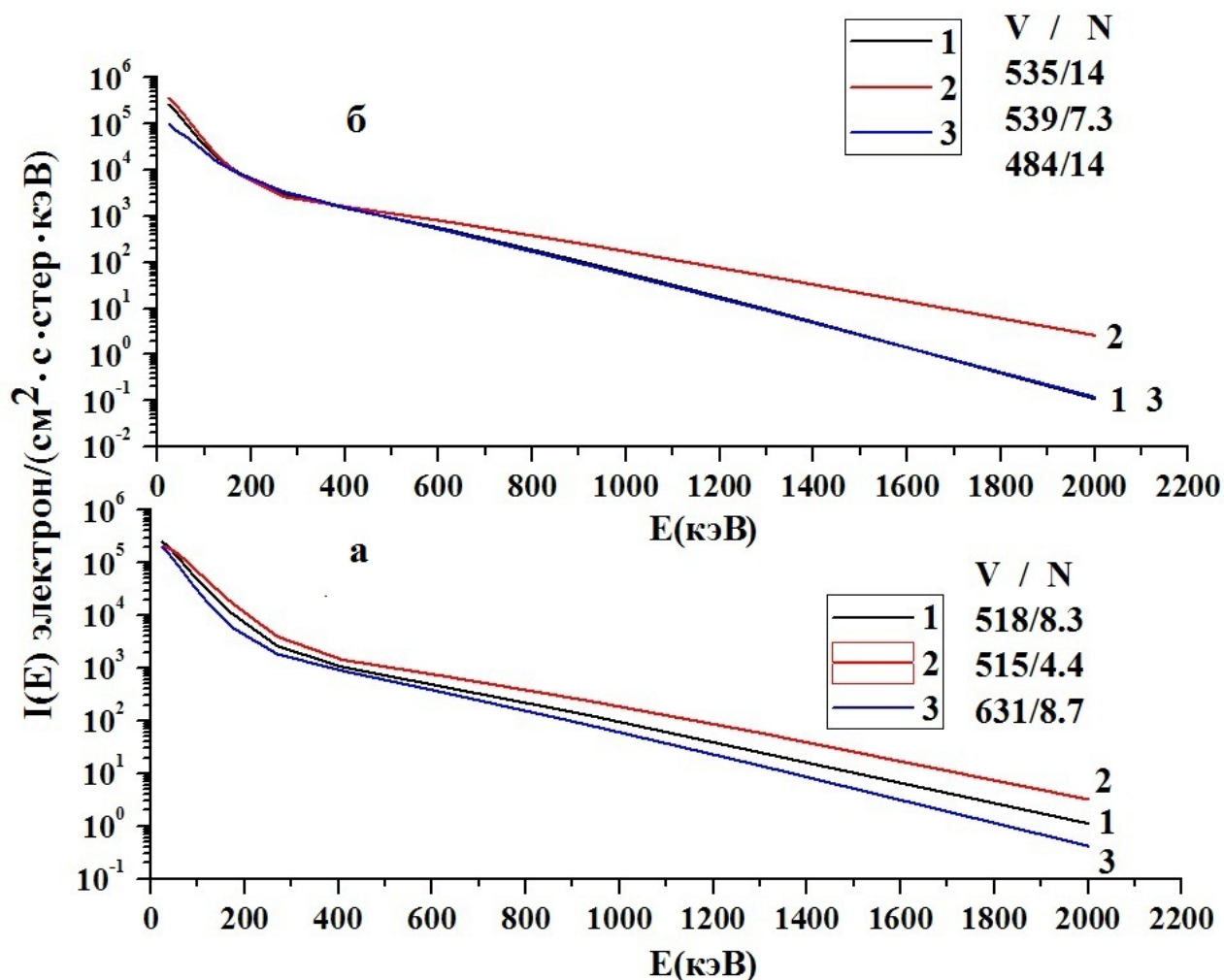


Рис.5. Энергетические спектры электронов, зарегистрированные в событиях при определенных соотношениях плотности и скорости СВ. Соответствующие величины указаны на графике.

На рис.6а приведены энергетические спектры для событий при средней скорости ~ 585 км/с и плотности 7.3 и 15 см^{-3} и для события при плотности ~ 14 см^{-3} и скорости 484 км/с. На рис.6б приведены спектры для событий при скорости ~ 602 км/с и плотности 9.2 и 18 см^{-3} и для события при плотности ~ 9 см^{-3} и скорости 480 км/с

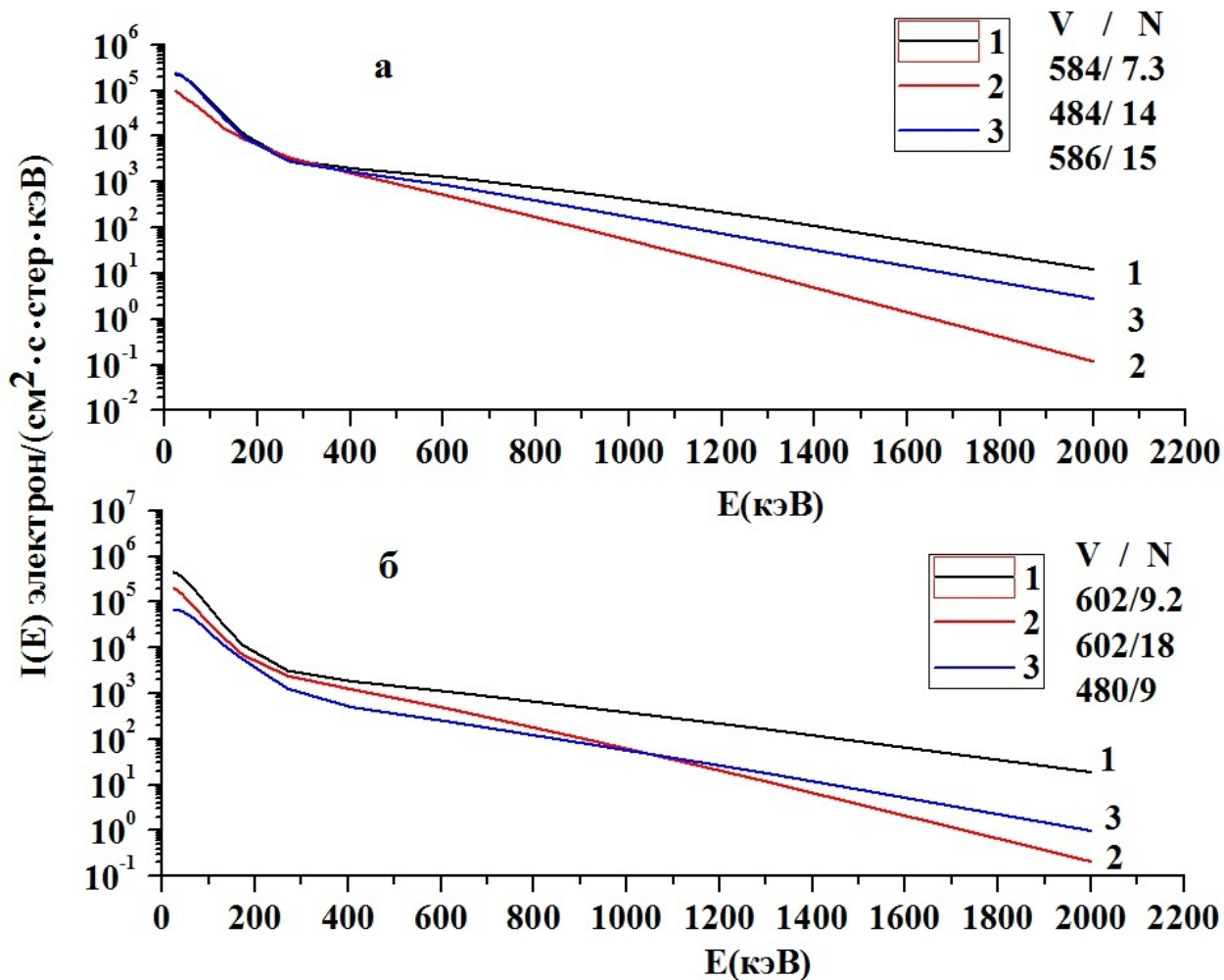


Рис. 6. Энергетические спектры электронов, зарегистрированные в событиях при определенных соотношениях плотности и скорости СВ. Соответствующие величины указаны на графике.

На рис.7а приведены энергетические спектры для событий при средней скорости ~ 658 км/с и плотности 7.5 и 10 см^{-3} и для события при плотности ~ 7.8 см^{-3} и скорости 637 км/с. На рис.7б приведены спектры для событий при средней скорости ~ 670 км/с и плотности 12 и 16 см^{-3} и для события при плотности ~ 11 см^{-3} и скорости 616 км/с.

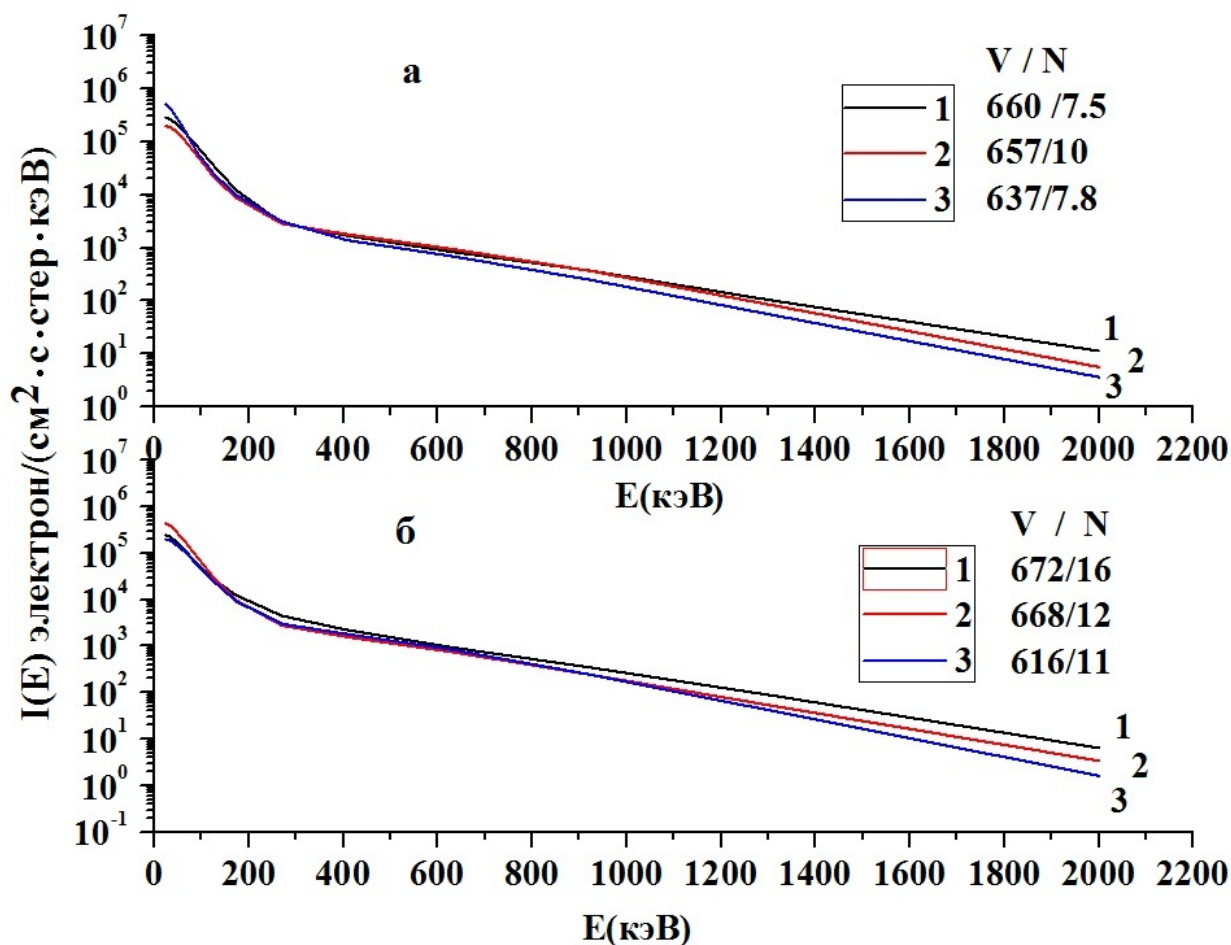


Рис. 7 Энергетические спектры электронов, зарегистрированные в событиях при определенных соотношениях плотности и скорости СВ. Соответствующие величины указаны на графике.

В таблице 1 представлены основные результаты сравнительного анализа энергетических спектров для отдельных событий: для 6 значений энергий электронов и 6 величин скорости СВ показаны отношения потоков (F1/F2) при изменении плотности СВ (N2/N1) для одной скорости СВ.

Таблица 1

Скорость км/с	N2/N1	31.7 кэВ	62.5 кэВ	625 кэВ	925 кэВ	1300 кэВ	2000 кэВ
515-518	1.89	0.88	1.21	1.6	1.85	2.36	2.66
535-539	1.92	1.39	1.38	1.49	2.53	5.2	
584-586	2.05	0.95	1.08	1.56	2.26	3.2	4.36
602	1.96	2.3	2.46	2.4	5	13.9	
657-660	1.33	1.41	1.39	0.88	1	1.22	2
668-672	1.33	1.77	1.58	0.8	0.7	0.61	0.53

Таблица 1 позывает уменьшение потоков электронов при увеличении плотности СВ при постоянной скорости СВ. Эффект зависит от энергии частиц и увеличивается при увеличении скорости СВ. При скорости 602 км/с и возрастании плотности СВ ~ в 2 раза поток электронов уменьшается ~ в 2.5 раза для энергии 625 кэВ и ~ в 14 раз для энергий 1300 кэВ. Для улучшения статистики для каждого диапазона скорости были выбраны несколько событий (не менее 4) с разбросом скорости < 1.5% и проведены вычисления суммарного влияния плотности для пяти диапазонов энергии частиц 31.7—90 кэВ, 172.5—270 кэВ, 172.5—407.5 кэВ, 925—1300 кэВ и 1300 кэВ. Результаты представлены на рис.8 и в таб. 2. Такой выбор диапазонов энергии связан с подобием зависимости электронов этих энергий от скорости и плотности СВ (рис. 2 и 3).

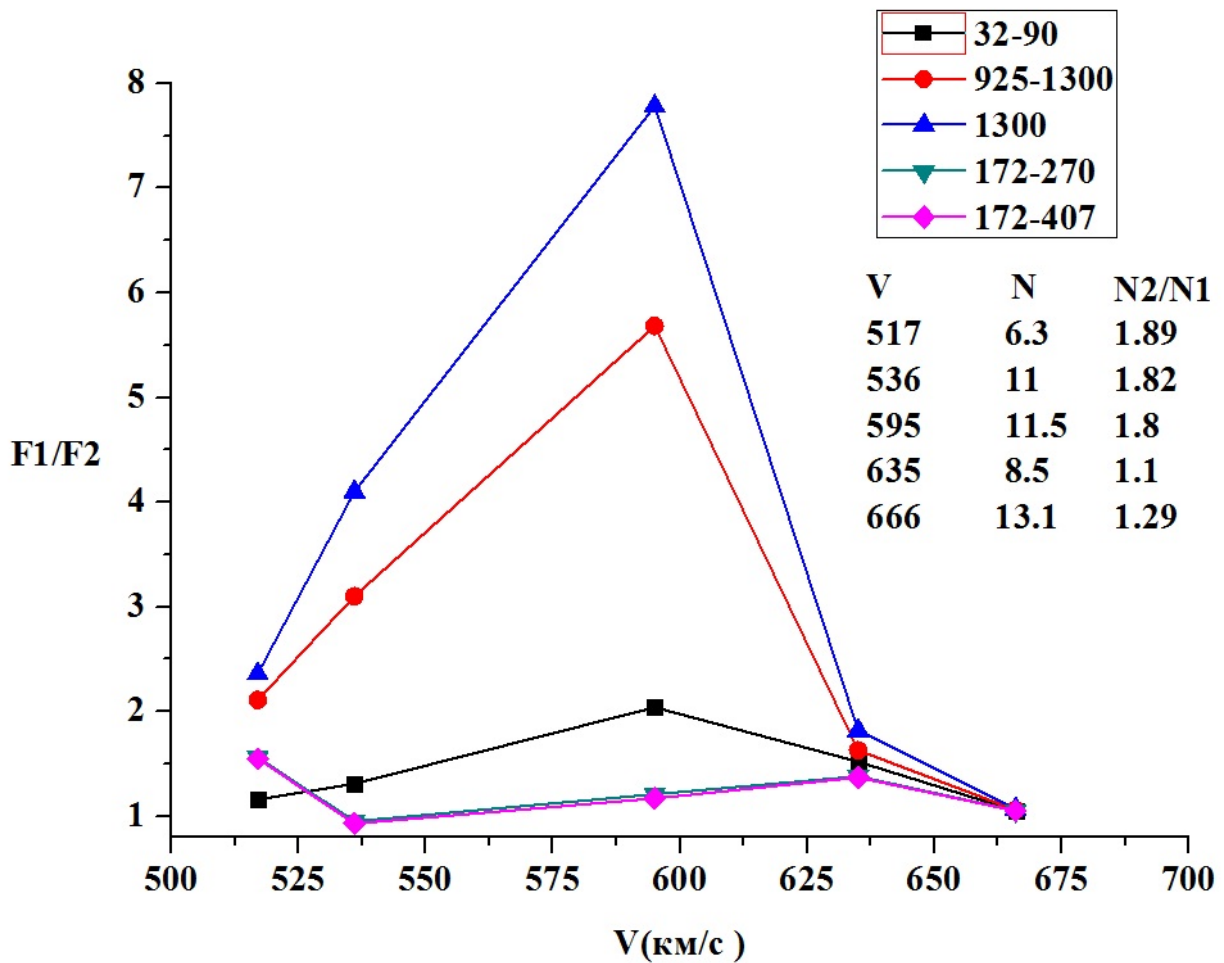


Рис. 8 Зависимость от скорости отношения величин потоков электронов ($F1/F2$) при изменении плотности СВ ($N2/N1$) для пяти диапазонов энергии электронов. На графике для каждой скорости указаны средние значения плотности СВ и отношения плотности.

Таблица 2

Средняя скорость, км/с	Среднее $N2/N1$	32-90 кэВ	925-1300 кэВ	1300 кэВ	172-270 кэВ	172-407 кэВ
517	1.89	1.16	2.11	2.36	1.56	1.55
536	1.82	1.31	3.1	4.1	0.95	0.93
595	1.8	2.04	5.68	7.97	1.2	1.17
635	1.1	1.52	1.63	1.82	1.38	1.37
666	1.29	1.05	1.06	1.07	1.05	1.05

Отметим следующие средние количественные эффекты влияние плотности и скорости СВ на формирование потоков электронов. 1. Уменьшение потока электронов при увеличении плотности СВ для постоянной скорости СВ, наиболее значительное для релятивистских энергий. Эффект регистрируется при скорости ≤ 650 км/с. 2. Возрастание влияния плотности при увеличении скорости СВ. Эффект также регистрируется при скорости ≤ 650 км/с. 3. При скорости СВ > 650 км/с потоки электронов практически не зависят от плотности СВ. 4. Минимальные вариации при изменении плотности при постоянной скорости СВ наблюдаются для энергий 172.5 – 407.5 кэВ. В событиях, сформированных при высокой плотности потоков СВ, дифференциальный энергетический спектр электронов должен быть более жестким, значительно уменьшается число электронов > 625 кэВ. Динамика потоков релятивистских электронов во многом определяет величину радиационных дозовых нагрузок для аппаратуры космических аппаратов. На рис. 6 показана структура энергетических спектров для двух событий при скорости СВ 602 км/с. Полное число электронов с энергией 900-1500 кэВ составило $\sim 114 \times 10^3$ электрон/см²·с·стер при плотности СВ 9.2 см⁻³ и $\sim 20 \times 10^3$

электрон/см²·с·стерпри плотности 18 см⁻³, при этом дозовые нагрузки (с учетом спектральных характеристик) изменятся ~ в 5 раз.

Основные результаты

В работе проведен анализ влияния плотности и скорости СВ (как независимых параметров) на формирование потоков электронов ВРПЗ. Рассмотрены 29 возрастных потоков электронов, зарегистрированных в 2007 г. при воздействии высокоскоростных потоков СВ. Рассмотрена зависимость дифференциальных потоков электронов от скорости СВ (диапазон 400 км/с – 700 км/с) для трех диапазонов плотности СВ: 6-9 см⁻³, 9-12 см⁻³ и 13-21 см⁻³ и зависимость дифференциальных потоков электронов от плотности СВ (диапазон 4 см⁻³ – 22 см⁻³) для трех диапазонов скорости СВ 440-535 км/с, 535-602 км/с и 602-668 км/с. Результаты статистического анализа позволяют выделить некоторые общие характеристики. При увеличении скорости СВ для всех энергий (диапазон 31.7 – 2000 кэВ) регистрируется увеличение потоков электронов. При увеличении плотности СВ для всех энергий регистрируется уменьшение потока электронов. Полученные данные указывают на нелинейный характер связи величины потоков электронов с плотностью и скоростью СВ: внутри каждого выделенного диапазона плотности и скорости вариации потоков электронов при изменении параметров СВ зависят от энергии частиц. Скорость СВ является основным фактором, определяющим возрастание потоков электронов ВРПЗ, для данной плотности с увеличением скорости СВ потоки электронов увеличиваются. Наиболее сильные вариации при изменении скорости и плотности наблюдаются для электронов > 925 кэВ. Значительные отличия динамики потоков электронов при изменении параметров СВ наблюдаются для трех диапазонов энергии электронов: < 100 кэВ, 100 – 400 кэВ и > 625 кэВ. Динамика потоков электронов отражает сложный баланс влияния различных физических механизмов, возникающих в магнитосфере Земли при воздействии высокоскоростных потоков СВ. Особенности динамики отдельных групп электронов определяются зависимостью от параметров СВ физического механизма, наиболее эффективного для формирования данной группы частиц [1,8, 25- 27].

При сравнении средних величин потоков в 6 выделенных диапазонах плотности и скорости СВ (рис. 4) получены следующие результаты: увеличение потоков электронов при возрастании скорости СВ, наиболее значительное для релятивистских энергий; уменьшение потоков электронов при возрастании плотности СВ, наиболее значительное для релятивистских энергий; в среднем, потоки электронов при высокой скорости СВ выше, чем при высокой плотности; минимальные вариации потоков электронов при изменении плотности и скорости СВ регистрируются для энергий 170 – 400 кэВ.

Анализ энергетических спектров электронов в отдельных событиях показал: 1. Уменьшение потока электронов при увеличении плотности СВ для постоянной скорости СВ, наиболее значительное для релятивистских энергий. Эффект регистрируется при скорости ≤ 650 км/с. 2. Возрастание влияния плотности при увеличении скорости СВ. Эффект также регистрируется при скорости ≤ 650 км/с; 3. Для диапазона энергий 170-400 кэВ изменение плотности почти не влияет на потоки электронов. В работе получены количественные оценки эффекта плотности. При скорости СВ 536 км/с увеличение ~ в 2 раза плотности приводит к уменьшению ожидаемого возрастания для диапазона энергий электронов 32-90 кэВ в 1.3 раза, для диапазона энергий 925-1300 кэВ уменьшению в 3 раза, при скорости 595 км/с эти величины возрастают и равны соответственно 2 и 5,7. Динамика потоков релятивистских электронов во многом определяет величину радиационных дозовых нагрузок для аппаратуры космических аппаратов. Для скорости СВ 602 км/с при изменении плотности СВ от 9.2 до 18 см⁻³ дозовые нагрузки (с учетом спектральных характеристик) могут измениться ~ в 5 раз.

Литература

1. Quantifying the relative contributions of substorm injections and chorus waves to the rapid outward extension of electron radiation belt/Zhenpeng Su, Hui Zhu, Fuliang Xiao, Huinan Zheng, Yuming Wang, Q.-G. Zong, Zhaoguo He, Chao Shen, Min Zhang, Shui Wang, et al./J. Geophys. Res. Space Physics, 2014, v.119, issue 12, 10,023–10,040, doi:10.1002/2014JA020709. [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/01JGR2014.pdf> , свободный или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JA020709/pdf> , свободный.
2. Radiation belt electron dynamics driven by adiabatic transport, radial diffusion, and wave-particle interactions/Zhenpeng Su, Fuliang Xiao, Huinan Zheng, and Shui Wang/J. Geophys. Res. Space Physics, 2011, v. 116, A04205, doi:10.1029/2010JA016228, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/02JGR2011.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JA016228/pdf>, свободный.

3. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves /Richard B. Horne, Richard M. Thorne, Sarah A. Glauert, Jay M. Albert, Nigel P. Meredith, Roger R. Anderson// J. Geophys. Res. Space Physics , 2005, v.110, A03225, doi:10.1029/2004JA010811, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/03JGR2005.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JA010811/pdf>, свободный.
4. Combined acceleration of electrons by whistler-mode and compressional ULF turbulences near the geosynchronous orbit/ Liuyuan Li,1 Jinbin Cao, and Guocheng Zhou// J. Geophys. Res. Space Physics, 2005, v.110, p. 5105-5112, A03203, doi: 10.1029/2004JA010628, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/04JGR2005.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004JA010628/pdf>, свободный.
5. Simulation of energy-dependent electron diffusion processes in the Earth's outer radiation belt/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, doi: 10.1002/2016JA022507, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/05JGR2016.pdf> , свободный.
6. Formation process of relativistic electron flux through interaction with chorus emissions in the Earth's inner magnetosphere/ Yoshiharu Omura, Yu Miyashita, Masato Yoshikawa, Danny Summers, Mitsuru Hikishima, Yusuke Ebihara, Yuko Kubota//J. Geophys. Res. Space Physics, v. 120, Issue 11 November 2015, p. 9545–9562, doi: 10.1002/2015JA021563, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/06JGR2015.pdf> , свободный.
7. Van Allen Probes observations linking radiation belt electrons to chorus waves during 2014 multiple storms/ Si Liu,Fuliang Xiao,Chang Yang,Yihua He,Qinghua Zhou, C. A. Kletzing, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, H. E. Spence, G. D. Reeves, H. O. Funsten, J. B. Blake, D. N. Baker, J. R. Wygant // J. Geophys. Res. Space Physics , 2015, v.120, Issue 2 , February 2015, p. 938-948, doi: 10.1002/2014JA020781 ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/07JGR2015.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JA020781/pdf> , свободный.
8. Prompt energization of relativistic and highly relativistic electrons during a substorm interval: Van Allen Probes observations/J. C. Foster, P. J. Erickson, D. N. Baker, S. G. Claudepierre, C. A. Kletzing, W. Kurth, G. D. Reeves, S. A. Thaller, H. E. Spence, Y. Y. Shprits, and J. R. Wygant//Geophys. Res. Lett. 2014, v.41, p. 20-25, doi:10.1002/2013GL058438, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/08JGR2015.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013GL058438/pdf> , свободный.
9. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus/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, 2013, 504(7480), 411–414, doi:10.1038/nature12889, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/09nature2013.pdf> , свободный.
10. Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit/Wladislaw Lyatsky1 and George V. Khazanov//J. Geophys. Res. Space Physics, 2008, v. 113, A08224, doi:10.1029/2008JA013048, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/10JGR2008.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JA013048/pdf> , свободный.
11. Dynamic responses of the Earth's radiation belts during periods of solar wind dynamic pressure pulse based on normalized superposed epoch analysis/ Ni, B., Z. Xiang, X. Gu, Y. Y. Shprits, C. Zhou, Z. Zhao, X. Zhang, and P. Zuo//J. Geophys. Res. Space Physics , 2016, v. 121, 8523–8536, doi:10.1002/2016JA023067, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/11JGR2016.pdf>, свободный.
12. Geomagnetic storms and EMIC waves: Van Allen Probe observations /Dedong Wang, Zhigang Yuan, Xiongdong Yu, Shiyong Huang, Xiaohua Deng, Meng Zhou, Haimeng Li// J. Geophys. Res. , 2016, v. 121, issue 7, doi:10.1002/2015JA022318, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/12JGR2016.pdf>, свободный.
13. Van Allen Probes observations of electromagnetic ion cyclotron waves triggered by enhanced solar wind dynamic pressure/D.-Y. Lee,S.-J. Noh,J. Hwang,K.-C. Kim,J. J. Lee,C. R. Choi,S. Thaller,R. Skoug//J. Geophys. Res., 2016, v.121, issue 10, doi:10.1002/2016JA022841, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/13JGR2016.pdf>, свободный.

14. The dependence on geomagnetic conditions and solar wind dynamic pressure of the spatial distributions of EMIC waves observed by the Van Allen Probes/ A. A. Saikin, J.-C. Zhang, C. W. Smith, H. E. Spence, R. B. Torbert, C. A. Kletzing // *J. Geophys. Res.*, 2016, v.121, issue 5, doi: 10.1002/2016JA022523, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/14JGR2016.pdf> , свободный.
15. Solar wind driving of magnetospheric ULF waves: Field line resonances driven by dynamic pressure fluctuations/ Claudepierre, S. G., M. K. Hudson, W. Lotko, J. G. Lyon, and R. E. Denton// *J. Geophys. Res.*, 2010, v. 115, A11202, doi:10.1029/2010JA015399, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/15JGR2010.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JA015399/pdf> , свободный.
16. Van Allen Probes observation and modeling of chorus excitation and propagation during weak geomagnetic activities/Yihua He, Fuliang Xiao, Qinghua Zhou, Chang Yang, Si Liu, D. N. Baker, C. A. Kletzing, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, H. E. Spence, G. D. Reeves, H. O. Funsten, J. B. Blake// *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2015, v. 120, issue 8, doi: 10.1002/2015JA021376, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/16JGR2015.pdf> <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JA021376/pdf>, свободный.
17. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited/ Reeves, G. D., 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, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/17JGR2011.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JA015735/pdf>, свободный.
18. Long-term variations in solar wind velocity and radiation belt electrons/Geoff Reeves, Steve Morley, and Greg Cunningham/ *J. Geophys. Res.*, 2013, v. 118, 1040–1048, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/18JGR2013.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgra.50126/pdf> , свободный.
19. Effect of solar wind density on relativistic electrons at geosynchronous orbit/ Lyatsky, W., and G. V. Khazanov // *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35(3), L03,109, doi:10.1029/2007GL032524, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/19GRL2008.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GL032524/pdf> , свободный.
20. Responses of relativistic electron fluxes in the outer radiation belt to geomagnetic storms/Xiong, Y., L. Xie, Z. Pu, S. Fu, L. Chen, B. Ni, W. Li, J. Li, R. Guo, and G. K. Parks// *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2015, v.120, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/20JGR2015.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JA021440/pdf> , свободный.
21. Эффективность связи потоков энергичных электронов на геостационарной орбите с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности в 22-м и 23-м солнечных циклах./В.И. Дегтярев, Г.В. Попов, С.Э. Чудненко//*Солнечно-земная физика. Вып. 23 (2013) С. 64–74,*
22. 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, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/22JGR2012.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JA017253/pdf> , свободный.
23. Timing analysis of the relationship between solar wind parameters and geosynchronous Pc5 amplitude/Kazuo Takahashi¹ and Aleksandr Y. Ukhorskiy¹// *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2008, v. 113, A12204, doi:10.1029/2008JA013327, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/23JGR2008.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JA013327/pdf> , свободный.
24. Impact of ULF oscillations in solar wind dynamic pressure on the outer radiation belt electrons/A. Y. Ukhorskiy, B. J. Anderson, K. Takahashi, N. A. Tsyganenko// *Geophys. Res. Lett.*, 2006, v.33, L06111, doi: 10.1029/2005GL024380, [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/24GRL2006.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GL024380/pdf>, свободный.
25. 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. [“Электронный ресурс” – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/25JGR2015.pdf> , свободный.

26. 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, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/26GRL2016.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016GL069691/full>, свободный
27. Energy dependent dynamics of keV to MeV electrons in the inner zone, outer zone, and slot regions/Geoffrey D. Reeves, Reiner H. W. Friedel, Brian A. Larsen, Ruth M. Skoug, Herbert O. Funsten, Seth G. Claudepierre, Joseph F. Fennell, Drew L. Turner, Mick H. Denton, Harlan E. Spence, J. Bernard Blake, and Daniel N. Baker // *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2016, v.121, 397–412, doi:10.1002/2015JA021569, ["Электронный ресурс] – статья (формат pdf) – режим доступа <http://d54x.ru/19/01/27JGR2016.pdf> или <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JA021569/full>, свободный