

## УСЛОВИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА $L < 1.2$ , СВЯЗАННЫЕ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

### CONDITIONS FOR THE OCCURRENCE OF INTENSE FLUXES OF ENERGETIC ELECTRONS AT $L < 1.2$ ASSOCIATED WITH SOLAR ACTIVITY AND SOLAR WIND PARAMETERS

**А.В. Суворова** 

Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына, МГУ,  
Москва, Россия, [alla\\_suvorova@mail.ru](mailto:alla_suvorova@mail.ru)

**A.V. Suvorova**

Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics,  
Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia, [alla\\_suvorova@mail.ru](mailto:alla_suvorova@mail.ru)

**А.В. Дмитриев** 

Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына, МГУ,  
Москва, Россия, [dalexav@mail.ru](mailto:dalexav@mail.ru)

**A.V. Dmitriev**

Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics,  
Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia, [dalexav@mail.ru](mailto:dalexav@mail.ru)

**Аннотация.** В работе представлены результаты статистического исследования спорадических возрастных потоков электронов с энергией  $>30$  кэВ на низких дрейфовых оболочках в зоне квазизахвата на геомагнитном экваторе. По данным низковысотных спутников NOAA/POES и MetOp был создан каталог событий с возрастаниями потоков квазизахваченных в запрещенной зоне электронов (forbidden energetic electrons, FEE) за 1998–2023 гг. Статистический анализ событий FEE выявил солнечно-циклическую, а также сезонную и суточную вариации в появлении возрастных FEE. Исследована корреляция годовой частоты событий FEE с солнечной активностью, параметрами солнечного ветра и геомагнитной активностью. Обнаружены сильные корреляционные связи между событиями FEE и индексом  $F_{10.7}$  солнечной активности (поток радиоизлучения), а также с альфвеновским числом Маха  $M_A$  (параметр солнечного ветра). Предложена интерпретация полученных результатов на основе механизма электрического дрейфа и радиального транспорта электронов из внутреннего радиационного пояса Земли в зону квазизахвата ( $L < 1.2$ ). Ключевым фактором действия механизма является эффективное проникновение электрического поля на низкие широты при возникновении значительной разницы проводимостей высокоширотной ионосферы в освещенном и неосвещенном секторах местного времени в условиях ослабления авроральной активности.

**Ключевые слова:** внутренний радиационный пояс, квазизахваченные электроны, солнечно-земные связи.

**Abstract.** We present the results of a statistical study of transient enhancements of electrons with energies  $>30$  keV at low drift shells in the quasi-trapped region (forbidden zone) at the geomagnetic equator. Using data from low-altitude NOAA/POES and MetOp satellites, we have compiled a catalog of events with forbidden energetic electron (FEE) enhancements for the period from 1998 to 2023. Statistical analysis of FEE events has revealed solar-cyclic, as well as seasonal and diurnal variations in the occurrence of FEE enhancements. We have examined the correlation of the annual frequency of FEE events with solar activity, solar wind parameters, and geomagnetic activity. Strong correlations have been found with the  $F_{10.7}$  index of solar activity (radio emission flux) as well as with the Alfvén Mach number (solar wind parameter). An interpretation of the obtained results is proposed which is based on the mechanism of electrical drift and radial transport of electrons from Earth's inner radiation belt to the quasi-trapped region ( $L < 1.2$ ). The key factor for the operation of the mechanism is the effective penetration of the electric field to low latitudes when a significant difference in the conductivity of the high-latitude ionosphere occurs in the illuminated and unilluminated sectors of local time under conditions of weakening auroral activity.

**Keywords:** inner radiation belt, quasi-trapped electrons, solar-terrestrial relationships.

## ВВЕДЕНИЕ

Электроны радиационного пояса Земли (РПЗ) с энергиями меньше 1 МэВ занимают область дрейфовых  $L$  оболочек, разделяемую условно на внешнюю и внутреннюю зоны (рис. 1). Внутренняя зона ( $L \sim 1.2\text{--}2.5$ ) энергичных электронов отделена от внеш-

ней зоны ( $L \sim 3\text{--}6$ ) узким зазором, где потоки электронов понижены. Нижняя граница пояса находится на  $L \sim 1.2$ , отделяя РПЗ от зоны квазизахвата или запрещенной зоны (forbidden zone), где потоки резко уменьшаются до фоновых значений. Динамика электронов на низких дрейфовых оболочках ( $L < 2$ ) принци-

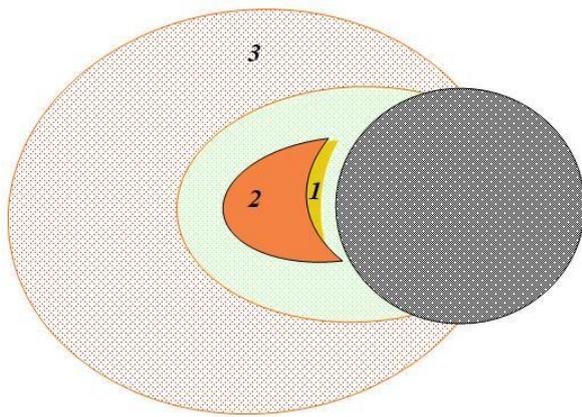


Рис. 1. Структурная схема радиационного пояса электронов в диапазоне энергий десятки–сотни килоэлектронвольт: 1 — запрещенная зона (forbidden zone), 2 — внутренний РПЗ, 3 — внешний РПЗ

пиально отличается от их динамики на более высоких. Из спутниковых измерений установлено, что в отличие от внешней зоны потоки электронов во внутренней зоне не испытывают заметных вариаций, обусловленных геомагнитной активностью. Из-за этого внутренняя зона энергичных электронов считается относительно стабильной. Однако известно несколько случаев, когда во время очень сильных [Tanaka et al., 1990; Takagi et al., 1993; Gusev et al., 1995; Dmitriev, Yeh, 2008] и даже умеренных магнитных бурь [Tadokoro et al., 2007] происходили резкие и значительные увеличения потоков. К необычной динамике внутреннего РПЗ можно отнести также формирование отдельных пиков в энергетических спектрах (структуры zebra stripes) вблизи нижней кромки пояса ( $L \sim 1.2-1.4$ ) [Imhof et al., 1973; Pinto et al., 1991; Kudela et al., 1992; Sauvaud et al., 2006; Sun et al., 2024].

Необычная динамика внутреннего РПЗ приводит к еще одному малоизученному явлению, в котором захваченные электроны с энергией 30–300 кэВ проникают на очень низкие оболочки  $L < 1.2$ , попадая в зону квазизахвата (цифра 1 на рис. 1) [Suvorova et al., 2012, 2014]. Поток квазизахваченных электронов под поясом на экваторе и в области широт  $\pm 30^\circ$  резко локально возрастает на несколько порядков в сравнении с фоном. В результате азимутального дрейфа электронов в восточном направлении увеличенный поток последовательно наблюдается на других долготах, пока не достигнет области Южно-Атлантической аномалии (ЮАА). В этом явлении квазизахваченные в запрещенной зоне электроны названы forbidden energetic electrons (FEE). Спорадические возрастания потока квазизахваченных электронов наблюдались вблизи экватора на высотах от 300 до 800 км [Савенко и др., 1962; Heikkila, 1971; Evans, 1988; Asikainen, Mursula, 2005; Suvorova et al., 2012; Suvorova, Dmitriev, 2015]. Несмотря на то, что явление было обнаружено еще в ранних экспериментах, оно долго не изучалось из-за очень редких наблюдений и серьезной критики, так как считалось, что измерения на ранних несовершенных приборах были ошибочными [Paulikas, 1975].

Недавно выполненные теоретический анализ и моделирование [Lejosne, Mozer, 2016; Su et al., 2016;

Selesnick et al., 2019] показали, что обнаруженная динамика потоков захваченных и квазизахваченных электронов на низких  $L$ -оболочках не описывается в рамках разработанных современных электродинамических моделей. Согласно моделям, потоки на низких  $L$  должны оставаться относительно стабильными или слабо меняться — во всяком случае, не на порядки величин.

Исследования динамики энергичных электронов на низких  $L$  в последние годы активно ведутся в двух направлениях: первое сосредоточено на моделировании процессов радиального дрейфа на  $L < 2.5$  [Hua et al., 2019; Lejosne, Mozer, 2016; Lejosne et al., 2022; Selesnick et al., 2016; 2019], второе — на сборе и анализе статистики возрастных квазизахваченных электронов на  $L < 1.2$  с использованием многолетних наблюдений на низковысотных спутниках [Suvorova, Dmitriev, 2015; Suvorova, 2017]. Моделирование позволяет выявить недостатки электродинамических моделей, чтобы в дальнейшем разработать новые теоретические подходы. С помощью эмпирического анализа ведется поиск эффективных драйверов и внешних условий, воздействующих на магнитосферу и ионосферу, которые приводят к явлению FEE.

Настоящая работа посвящена статистическому анализу возрастных потоков FEE с энергией  $> 30$  кэВ. Используя данные непрерывного мониторинга (1998–2023 гг.) энергичных заряженных частиц с помощью большой группировки низковысотных спутников NOAA, мы собрали достаточно большую статистику возрастных  $> 30$  кэВ квазизахваченных электронов. Результаты статистического анализа используются для анализа условий появления FEE при изменении солнечной и геомагнитной активности на разных фазах солнечных циклов.

## 1. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Каталог возрастных потоков FEE с энергией  $> 30$  кэВ создан с использованием измерений потоков заряженных частиц из открытой базы данных [https://ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/dataaccess.html] низкоорбитальных спутников NOAA/POES и MetOp. В таблице приведены годы функционирования каждого КА. На орбите с 2001 г. находилось два и более спутников, в 2012 и 2013 г. их стало семь (максимальное количество), а в 2023 г. активными оставались пять КА. Круговые полярные солнечно-синхронные орбиты имеют наклонение  $98^\circ$  на высотах около 850 км. Плоскости орбит занимали от одного до трех фиксированных диапазонов LT, в част-

Интервалы работы спутниковой группировки

Спутники	Годы
NOAA-15	1998 – н. в.
NOAA-16	2001–2014
NOAA-17	2002–2013
NOAA-18	2005 – н. в.
NOAA-19	2009 – н. в.
МЕТОР-А	2006–2021
МЕТОР-В	2012 – н. в.
МЕТОР-С	2019 – н. в.

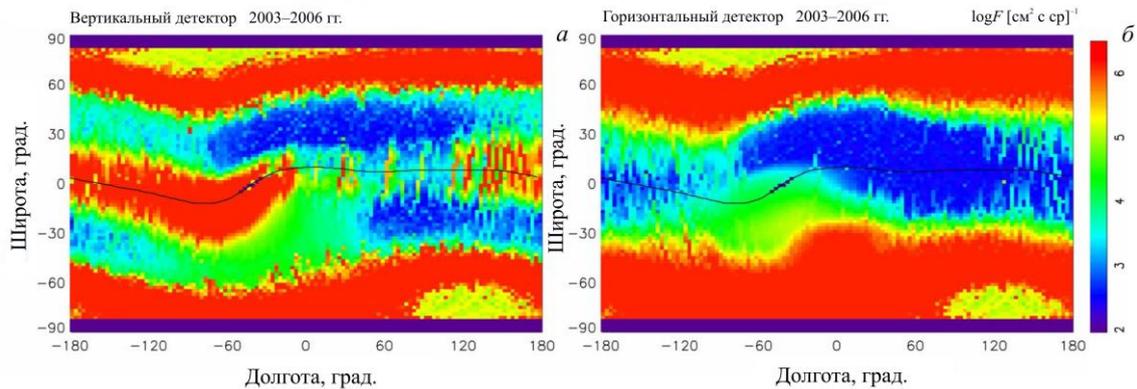


Рис. 2. Географическая карта распределения максимальной интенсивности потока электронов с энергией  $>30$  кэВ, зарегистрированного вертикальным (слева) и горизонтальным (справа) детекторами за период 2003–2006 гг.

ности, включая терминаторы (6–18 LT), утро–вечер (9–21 LT) и ночь–день (2–14 LT). В 2023 г. число плоскостей сократилось до двух и распределены они неравномерно: в плоскости терминатора остался только один КА, в плоскости утро–вечер — четыре. Три европейских спутника MetOp находятся в плоскости утро–вечер.

На борту всех спутников установлены идентичные приборы для измерения потоков электронов и протонов в широком диапазоне энергий от нескольких электронвольт до сотен мегаэлектронвольт. В работе используются данные телескопа MERED [Evans, Geer, 2006]. В нем используются пары полупроводниковых детекторов с ортогональной ориентацией, что позволяет одновременно измерять потоки квазизахваченных и высыпающихся электронов в трех энергетических каналах диапазона килоэлектронвольт ( $>30$ ,  $>100$  и  $>300$  кэВ). Вертикальный детектор, направленный в зенит, измеряет квазизахваченные электроны на низких широтах ( $<30^\circ$ ) и высыпающиеся на средних и высоких. Горизонтальный детектор вдоль направления скорости измеряет частицы, высыпающиеся на низких широтах и захваченные на более высоких. На рис. 2 видно, что возрастания потоков электронов вблизи экватора чаще регистрируются вертикальным детектором, чем горизонтальным. Таким образом, явление возрастания потока на экваторе наблюдается преимущественно у квазизахваченных электронов [Suvorova et al., 2013]. В работе используются данные вертикального детектора в интегральном канале  $E > 30$  кэВ, для которых статистика возрастаний потоков FEE была наибольшей.

Отметим, что информация в базе данных до 2014 г. очищена от сбоев и усреднена по времени за 16 с. Более поздняя информация содержит необработанные данные с временным разрешением  $\sim 2$  с без предварительной фильтрации многочисленных сбоев. Часть сбоев, которые мы идентифицировали как систематические, были исключены из обработки, так как они могли исказить результаты статистического анализа потоков FEE [Голубков и др., 2024].

Селекция возрастаний потоков FEE на  $L < 1.2$  проводилась с помощью визуального отбора географических карт распределения интенсивностей потоков [Suvorova et al., 2012]. Методика построения карт интенсивностей заключалась в определе-

нии максимальных потоков электронов с  $E > 30$  кэВ в пространственных ячейках  $3^\circ \times 2^\circ$  географической долготы и широты соответственно и для заданного интервала времени, например часы или сутки. Используемая методика с определением максимального потока имеет важное преимущество перед процедурой усреднения. При усреднении данных для сотни и более витков поиск возрастаний на низких широтах становится малоэффективным, так как такие возрастания наблюдаются локально и относительно редко, поэтому на длительных интервалах времени (сутки) доминируют фоновые потоки. В результате на карте, сглаженной усреднением, возрастания становятся малозаметными, а карты с максимальными потоками позволяют эффективно обнаруживать локальные транзиентные возрастания потоков электронов.

Каталог событий FEE представляет собой набор географических карт интенсивностей потоков  $>30$  кэВ электронов за одни сутки и список дат в 1998–2023 г. (пример на рис. 3, в). Для определения более точного времени (UT) каждого возрастания на геомагнитном экваторе использовались временные профили в форме колокола с одним максимумом (тип 1 на рис. 3, а). Длительность одного возрастания составляла более 6 мин. Профили типа 2 в статистике не учитывались. В выбранных событиях потоки FEE на экваторе превышали фон на несколько порядков, т. е. от  $\sim 10^4$  до  $10^7$  электронов/(см<sup>2</sup> с ср). Набор данных для статистического анализа содержал дату возрастания потока FEE, а также UT и географическую долготу, привязанные к точке пересечения геомагнитного экватора (долготы от  $-90^\circ$  до  $0^\circ$  в зоне ЮАА исключались). По UT и долготе определялось LT, либо оно бралось из данных каждого спутника. Из списка событий собирались отдельные статистики по количеству дней в году, в месяце и статистика количества возрастаний потоков FEE в определенных интервалах LT.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1 Распределения возрастаний потоков FEE по местному времени, месяцам и годам

Диапазон LT был разбит на 6 интервалов по 4 ч. На рис. 4 показано распределение возрастаний потоков FEE по LT. Максимальная частота появления

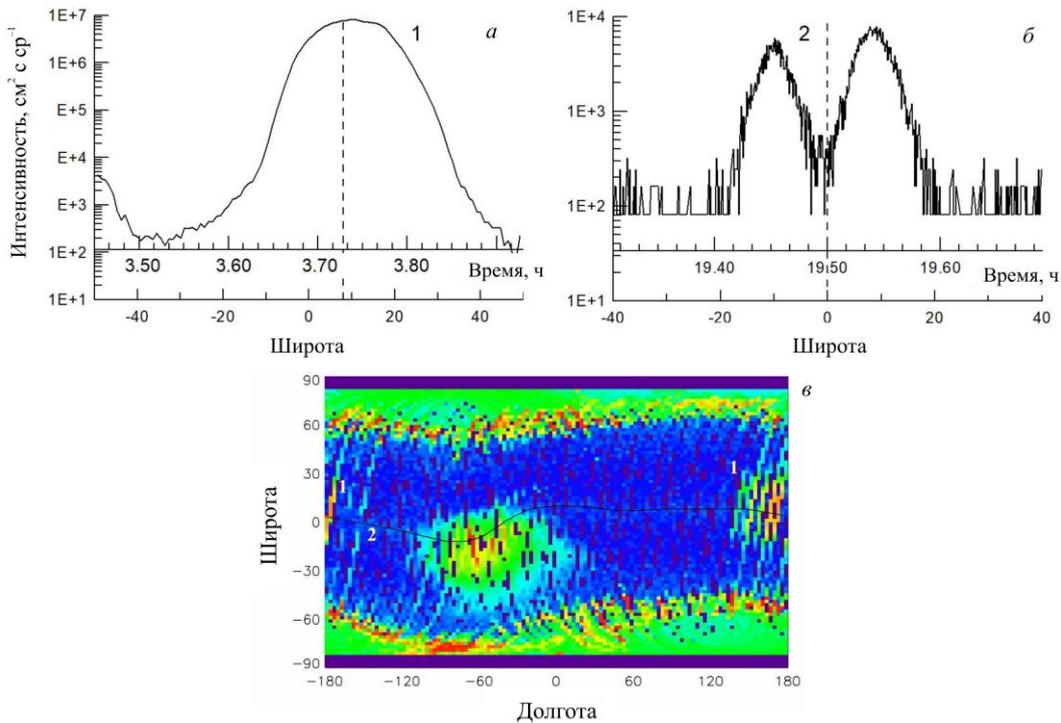


Рис. 3. Возрастания потоков FEE с энергией электронов  $E_e > 30$  кэВ: а — временной профиль возрастания с одним максимумом интенсивности вблизи экватора (тип 1); б — временной профиль возрастания с двумя максимумами на низких широтах в Северном и Южном полушариях и глубоким минимумом вблизи экватора (тип 2). Цифрами 1 и 2 обозначены два типа возрастаний. Панель в — глобальная карта максимальных интенсивностей во время магнитной бури 23 апреля 2023 г. Геомагнитный экватор показан кривой черного цвета

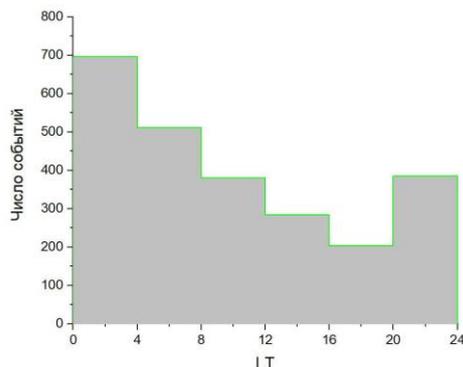


Рис. 4. Распределение FEE по LT

возрастаний приходится на интервал 0–4 LT (среднее время 02 LT). Много событий происходит и в соседнем интервале 4–8 LT (06 LT). Меньшее количество, но поровну, отмечается в интервалах 8–12 (10 LT) и 20–24 LT (22 LT), днем — минимальное число возрастаний потоков FEE. Таким образом, можно выделить сектор LT после полуночи (02 LT) до ранних утренних часов (06 LT), в котором частота появления возрастания потоков FEE наибольшая, в дневные часы — наименьшая.

На рис. 5 показано распределение количества дней с возрастаниями потоков FEE по месяцам. В распределении отчетливо присутствуют два пика: главный (с мая по сентябрь) и второстепенный (с декабря по февраль). Месяцы осеннего и весеннего равноденствий соответствуют минимальному количеству событий.

На рис. 6 показано распределение количества дней с возрастаниями потоков FEE по годам. Если откинуть

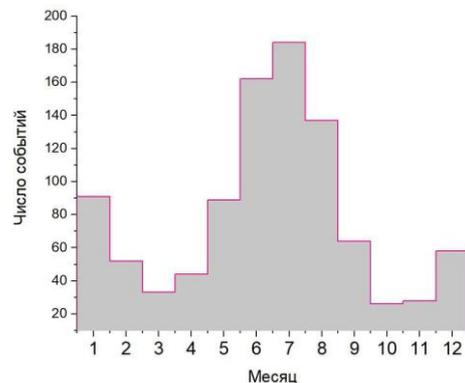


Рис. 5. То же по месяцам

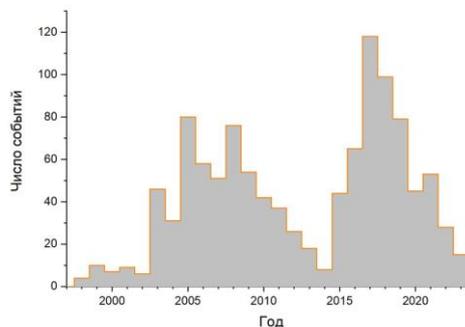


Рис. 6. То же по годам

первые три года (1998–2000 гг.), когда на орбите был всего один спутник, в распределении хорошо просматривается цикличность с периодом 10–12 лет. Один максимум приходится на интервал с 2005 по 2008 г., второй — 2017–2019 г., что соответствует

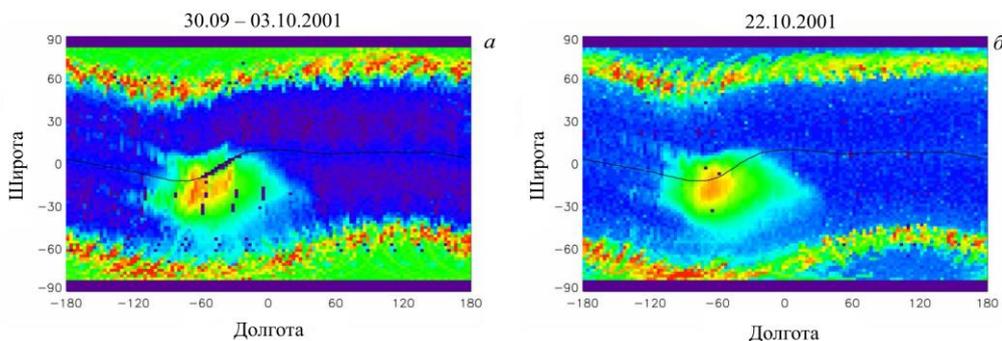


Рис. 7. Географические карты интенсивности потоков электронов с энергией  $>30$  кэВ во время геомагнитных бурь 30 сентября – 3 октября 2001 г. (а) и 22 октября 2022 г. (б). В этих событиях в запрещенной области возрастания потоков FEE не наблюдалось

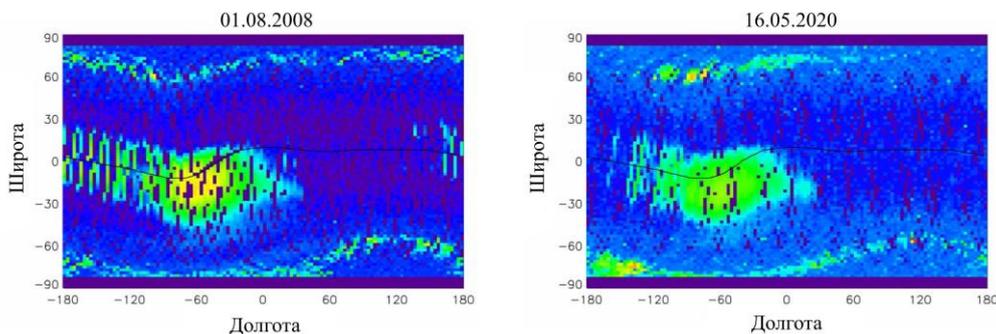


Рис. 8. Географические карты интенсивности потоков электронов в спокойных геомагнитных условиях ( $K_p \sim 0 \div 2$ ) 1 августа 2008 и 16 мая 2020 г. В этих событиях в запрещенной области возрастания потоков FEE наблюдались в течение нескольких часов

фазам спада и минимума 23-го и 24-го солнечных циклов соответственно. Минимумы появления возрастания потоков FEE наблюдаются в 2002 и 2014 г., что соответствует фазам максимума циклов.

## 2.2. Геомагнитная активность во время событий FEE

Геомагнитная активность определяет динамику всей магнитосферы и, в свою очередь, контролируется солнечной активностью и солнечным ветром (СВ). Мы выборочно сопоставили суточные карты из каталога FEE с уровнем геомагнитной активности [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>]. В частности, взяли события, в которых потоки имели очень большую интенсивность ( $>10^5$  электронов/( $\text{см}^2$  с ср)). Оказалось, что во время событий FEE уровень геомагнитной активности мог быть любым, включая магнитные бури, суббури и спокойные условия. Максимальная интенсивность потоков FEE, зарегистрированная за сутки, не зависела от мощности бури/суббури. Кроме того, при похожих геомагнитных условиях, например одинаковом индексе  $Dst$  в максимуме магнитной бури, возрастания потоков могли произойти, а могли и отсутствовать. Так, не было возрастания потоков FEE во время некоторых сильных магнитных бурь ( $K_p$  мог возрасти до 8, а  $Dst$  упасть ниже  $-200$  нТл), приведенных как примеры в работе [Suvorova, Dmitriev, 2015]. Напротив, в очень спокойных условиях ( $K_p \leq 1$ ) потоки FEE наблюдались в течение нескольких часов [Suvorova et al., 2019]. Детальный анализ этого случая обнаружил связь

с импульсами давления плазмы, которые генерировались в форшоке в подсолнечной области в условиях квазирадialного межпланетного магнитного поля (ММП). На рис. 7 и 8 показаны несколько случаев, не соответствующих типичной зависимости от геомагнитной активности. Возрастания потоков FEE не наблюдалось (см. рис. 7) во время последовательности сильных магнитных бурь ( $|Dst| \sim 150$  и  $\sim 200$  нТл) с 30 сентября по 3 октября 2001 г. и во время умеренной бури 22 октября 2022 г. ( $|Dst| \sim 90$  нТл). Данные бури произошли во время фазы максимума 23-го цикла и на фазе роста 25-го цикла. С другой стороны, длительные потоки FEE наблюдались 1 августа 2008 г. и 16 мая 2020 г. в очень спокойных условиях (см. рис. 8) в минимумах 23-го и 24-го циклов. Авроральная активность также была очень низкой, что хорошо видно на карте как очень слабые локальные высыпания энергичных электронов из внешнего РПЗ на широтах выше  $60^\circ$ .

## 2.3. Солнечная активность и солнечный ветер во время событий FEE

Мы изучили, как солнечная активность и параметры СВ [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>] влияют на частоту появления FEE. Были рассчитаны коэффициенты корреляции между годовой частотой появления FEE (см. рис. 6) и среднегодовыми значениями индекса  $F10.7$ , альфвеновского числа Маха  $M_A$ , скорости  $V$ , плотности  $D$ , температуры  $T$  плазмы СВ и напряженности  $B$  ММП. Была обнаружена сильная связь с  $F10.7$  ( $c = -0.77$ ) и  $M_A$  ( $c = 0.70$ ), а также значи-

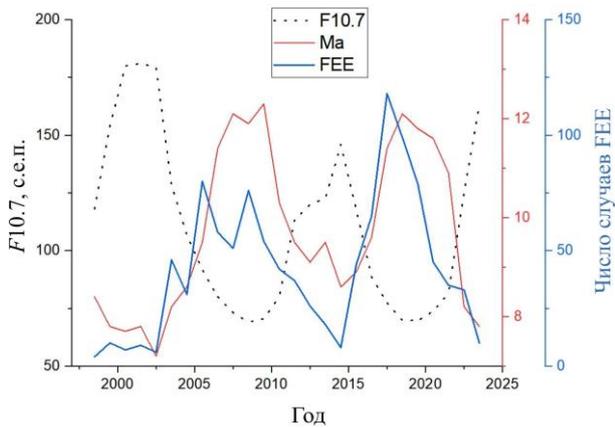


Рис. 9. Вариации частоты событий FEE, среднегодовых значений  $F10.7$  и  $M_A$  в 1998–2023 гг.

мая связь с  $B$  ММП ( $c = -0.5$ ), но для остальных параметров коэффициенты корреляции не превышали 0.2. Для двойной логарифмической зависимости коэффициенты корреляции значительно выросли: для  $F10.7$   $c = -0.87$ , для  $M_A$   $c = 0.76$ . Хотя по отдельности параметры плазмы СВ и не показали связи с событиями FEE, но в совокупности  $V$ ,  $D$  и  $B$  влияют на появление FEE, так как входят в выражение для числа Маха. На рис. 9 показаны вариации частоты появления FEE и среднегодовых значений  $F10.7$  и  $M_A$  за исследуемый период с 1998 по 2023 г. Важно отметить, что частота появления FEE антикоррелирует с  $F10.7$  и коррелирует с  $M_A$ . Мы также включили в анализ еще один параметр, предложенный в [Borovsky, Birn, 2014] для оценки скорости локального пересоединения на дневной магнитопаузе. В выражение для  $R$  (см. (8) в [Borovsky, Birn, 2014]) входят почти все параметры СВ ( $M_A$ ,  $V$ ,  $D$ ) кроме  $T$ . Коэффициент корреляции  $c = -0.34$  между частотой появления FEE и  $R$  оказался довольно низким — это не противоречит эмпирическому факту, что магнитные бури не всегда приводят к появлению FEE.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе мы рассмотрели один из аспектов динамики электронов РПЗ на низких дрейфовых  $L$ -оболочках: спорадические возрастания потоков энергичных электронов (FEE) в запрещенной зоне ( $L < 1.2$ ). Известно, что источником больших потоков FEE является внутренний РПЗ [Suvorova et al., 2014]. Какой физический механизм обеспечивает повышение потока FEE, является главным вопросом в этой проблеме. В разное время предлагались различные механизмы, но все чаще мнения сходятся на том, что динамические явления во внутреннем поясе и под ним могут быть связаны общим процессом, а именно, радиальным транспортом или быстрым дрейфом частиц к Земле [Suvorova et al., 2012, 2013; Lejosne, Mozer, 2016; Selesnick et al., 2016, 2019; Su et al., 2016]. Радиальный перенос частиц происходит в скрещенных магнитном и электрическом полях, при западном направлении электрического поля дрейф направлен к Земле. Таким образом, ключевую роль в радиальном транспорте частиц играет электрическое поле, но необходимо

определить источники этого поля или локальный механизм его генерации на высотах  $\sim 1000$ – $1500$  км вблизи экватора. На данный момент эта задача пока не решена [Su et al., 2016], так как в электродинамических моделях заложен принцип экранировки электрического поля во внутренней зоне ( $L < 3$ ), т. е. электрическое поле усиленной магнитосферной конвекции не проникает на низкие широты и высоты.

В случае транзитных возрастаний потоков FEE события можно интерпретировать как инъекции, а это требует наличия довольно сильного электрического поля ( $\sim$  нескольких мВ/м) на низких широтах и высотах  $\sim 1000$  км [Suvorova et al., 2014; Suvorova, Dmitriev, 2015]. Однако в рамках современных электродинамических моделей [Su et al., 2016] на низких  $L$ -оболочках сложно обосновать даже незначительные отклонения электрического поля от средней величины 0.4–1 мВ/м [Selesnick et al., 2016]. В [Hua et al., 2019; Hui, Vichare, 2019; Lejosne, Mozer, 2016; Lejosne et al., 2021, 2022; Selesnick et al., 2016] для моделирования радиального дрейфа во внутреннем поясе рассматривают разные источники электрического поля, включая ионосферные и магнитосферные. Согласно теоретическим оценкам [Selesnick et al., 2019], необходимо электрическое поле величиной  $\sim 5$  мВ/м, чтобы объяснить наблюдения глубоких инъекций электронов из внутреннего РПЗ на низкие  $L$ -оболочки. В этих работах отмечается, что необходимо разобраться, как происходит проникновение электрических полей с высоких широт на экватор и какую роль в этом процессе могут выполнять продольные токи.

В представленном статистическом исследовании возрастаний потоков электронов диапазона килоэлектронвольт в зоне квазизахвата мы выяснили, какие внешние условия необходимы, чтобы запустить процесс инъекции в область  $L < 1.2$ , а какие могут быть необязательным дополнением. К первым факторам мы относим солнечную активность и СВ, ко вторым — геомагнитную активность. Мы показали отсутствие однозначной связи с магнитными бурями и корреляции с локальной скоростью дневного пересоединения. С другой стороны, мы показали, что и в спокойных условиях могут происходить события FEE. Эти результаты согласуются с [Suvorova, 2017], где было показано, что появление FEE не зависит от индекса суббулевой активности  $AL$  и индуцированного межпланетного электрического поля, т. е.  $B_z$ -компоненты ММП.

Следует отметить, что отсутствие связи событий FEE с геомагнитной активностью может указывать и на альтернативный источник происхождения энергичных электронов не из РПЗ, а из нижней атмосферы во время грозовой активности. Учитывая географическое распределение грозовой активности, максимальное ожидание событий FEE предполагается в приэкваториальной области в секторе долгот над юго-восточной Азией и Океанией, что согласуется со статистикой наблюдений, но только отчасти. Все же значительно чаще события наблюдаются над Тихим океаном в западной полушарии [Suvorova, 2017]. Определенно можно сказать, что в случае с гро-

зовой активностью такие события не должны зависеть от солнечного цикла, чаще происходить после полудня и в летний период. С нашей точки зрения, состоятельность этой гипотезы опровергается результатами статистического анализа, в котором распределения событий по LT имеют максимум в ночные часы, два максимума в сезонном распределении (зима и лето) и явную солнечно-циклическую вариацию. Поэтому мы придерживаемся механизма быстрого радиального транспорта (по типу инъекции) из внутреннего РПЗ.

В работе [Suvorova, 2017] была высказана гипотеза о том, что в появлении FEE большую роль играет освещенность полярной ионосферы и проводимость в авроральной области. Летние месяцы Северного полушария как раз обеспечивают максимально подходящие условия для освещенности и высокой проводимости полярной шапки и дневного овала, зимние месяцы создают аналогичные условия в Южном полушарии с той лишь разницей, что площадь освещенной полярной области меньше из-за асимметрии и наклона оси диполя. Вероятно, что в сезонном распределении FEE проявляется эффект неравномерной ионосферной проводимости в авроральной зоне в комбинации с наклоном диполя [Suvorova, 2017].

Распределение событий FEE по LT имеет максимум в интервале 02–06 LT, т. е. инъекции электронов происходят чаще в послеполуночном секторе. В ночные и ранние утренние часы остаточная ионосферная проводимость в субавроральной области очень низкая [Liu, Chen, 2009], что мы считаем важным фактором. В этом случае можно предположить, что большая разница проводимостей дневной и ночной ионосферы способствует более эффективному проникновению возмущений электрического поля с высоких широт глубоко во внутреннюю магнитосферу преимущественно в послеполуночном секторе. Основываясь на этой гипотезе, мы можем интерпретировать результаты корреляционного анализа следующим образом.

1. Мы получили, что инъекции FEE антикоррелируют с  $F10.7$ , который, в свою очередь, хорошо коррелирует с солнечным циклом [Clette, 2021]. Индекс  $F10.7$  контролирует ионизацию дневной ионосферы. В терминах ионосферной проводимости это означает, что в период минимума солнечного цикла ионизация дневной ионосферы в среднем значительно ниже, чем в период максимума. С другой стороны, фаза максимума характеризуется возмущенными условиями в СВ, которые приводят к высокой геомагнитной активности и интенсификации высыпаний заряженных частиц в ночную авроральную ионосферу. Поскольку вследствие этого ночная ионизация в высоких широтах существенно возрастает, разница между дневной и ночной ионизацией в среднем снижается и тогда падает эффективность проникновения электрического поля на низкие широты. Поэтому в максимуме солнечного цикла наблюдается уменьшение количества инъекций электронов и это выражается в антикорреляции между  $F10.7$  и частотой появления FEE. В минимуме цикла высыпания частиц происходят реже и имеют меньшую интенсивность потоков, поэтому иониза-

ция ночной ионосферы очень мала. Особенно следует отметить, что в послеполуночные часы при отсутствии дополнительных источников ионизации рекомбинационные процессы приводят к тому, что электронная плотность, по крайней мере, на порядок величины меньше, чем в дневной ионосфере. И даже снижение ионизации дневной ионосферы из-за уменьшения в 2–3 раза  $F10.7$  в минимуме солнечной активности по отношению к максимуму не может скомпенсировать возникающую большую разницу (10-кратную) между дневной и ночной ионосферой, что создает подходящие условия для проникновения электрического поля.

2. Мы получили, что инъекции FEE коррелируют с  $M_A$  плазмы СВ. Авроральная активность, а именно частота суббурь, уменьшается с увеличением  $M_A$  и становится максимальной на фазе спада солнечного цикла [Borovsky, Yakimenko, 2017]. Таким образом,  $M_A$  также контролирует проводимость ночной авроральной ионосферы: большое  $M_A$  — реже суббури и ниже проводимость. В терминах ионосферной проводимости это означает, что в период минимальной солнечной активности частота суббурь и ионизация ночной ионосферы в среднем ниже, чем на других фазах цикла, т. е. и здесь мы видим, что важным условием проникновения электрического поля является низкая проводимость ночной ионосферы в авроральной/субавроральной области. Повышенная остаточная проводимость в ночной авроральной области, например в результате частых суббурь и бурь, может сдерживать проникновение электрического поля из высоких широт к экватору.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистический анализ событий FEE, выполненный на основе каталога, выявил солнечно-циклическую, а также сезонную и суточную вариации появления возрастных FEE. Исследована корреляция годовой частоты событий FEE с солнечной активностью, параметрами СВ и геомагнитной активностью. Обнаружены сильные корреляционные связи между событиями FEE,  $F10.7$  и  $M_A$ . Предложена интерпретация полученных результатов на основе механизма электрического дрейфа и радиального транспорта электронов из внутреннего РПЗ в зону квазизахвата ( $L < 1.2$ ). Сделан вывод о том, что ключевым фактором действия механизма является эффективное проникновение электрического поля на низкие широты. Наиболее подходящие условия проникновения создаются при возникновении значительной разницы проводимостей высокоширотной ионосферы в освещенном и неосвещенном (послеполуночном) секторах LT и уменьшении частоты суббурь.

Авторы благодарны создателям баз данных OMNI (Goddard Space Flight Center, NASA, USA) и NOAA/POES (National Centers for Environmental Information, NOAA, USA) за возможность их использования в данном исследовании.

Работа выполнена в рамках темы НИР «Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голубков М.Г., Суворова А.В., Дмитриев А.В. и др. Статистический анализ возрастных потоков энергичных электронов в низкоширотной ионосфере по данным спутников NOAA/POES и MetOp с 1998 по 2022 год. *Хим. физика*. 2024. Т. 43. (В печати).

Савенко И.А., Шаврин П.И., Писаренко Н.Ф. Низкоэнергичные частицы на высоте 320 км на широтах вблизи экватора. *Искусственные спутники Земли*. 1962. № 3. С. 75–80.

Asikainen T., Mursula K. Filling the South Atlantic anomaly by energetic electrons during a great magnetic storm. *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. L16102. DOI: [10.1029/2005GL023634](https://doi.org/10.1029/2005GL023634).

Borovsky J.E., Birn J. The solar wind electric field does not control the dayside reconnection rate. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. Vol. 119. P. 751–760. DOI: [10.1002/2013JA019193](https://doi.org/10.1002/2013JA019193).

Borovsky J.E., Yakymenko K. Substorm occurrence rates, substorm recurrence times, and solar wind structure. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122. P. 2973–2998. DOI: [10.1002/2016JA023625](https://doi.org/10.1002/2016JA023625).

Clette F. Is the  $F_{10.7\text{cm}}$  — sunspot number relation linear and stable? *J. Space Weather Space Clim.* 2021. Vol. 11, iss. 5. Art. 2. DOI: [10.1051/swsc/2020071](https://doi.org/10.1051/swsc/2020071).

Dmitriev A.V., Yeh H.-C. Storm-time ionization enhancements at the topside low-latitude ionosphere. *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 26. P. 867–876.

Evans D.S. Dramatic increases in the flux of >30 keV electrons at very low  $L$ -values in the onset of large geomagnetic storms. *EOS Trans.* 1988. Vol. 69, iss. 44. P. 1393.

Evans D.S., Greer M.S. Polar Orbiting Environmental Satellite Space Environment Monitor – 2: *Instrument descriptions and archive data documentation*. 2006. available from NGDC: <http://ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/documentation.html> (дата обращения 25 апреля 2024 г.).

Gusev A., Kohno T., Martin I., et al. Injection and fast radial diffusion of energetic electrons into the inner magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1995. Vol. 43. P. 1131–1134.

Heikkilä W.J. Soft particle fluxes near the equator. *J. Geophys. Res.* 1971. Vol. 76. P. 1076–1078.

Hua M., Li W., Ma Q., et al. Modeling the electron enhancement and butterfly pitch angle distributions on  $L$  shells <2.5. *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46. P. 10967–10976. DOI: [10.1029/2019GL084822](https://doi.org/10.1029/2019GL084822).

Hui D., Vichare G. Variable responses of equatorial ionosphere during undershielding and overshielding conditions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. Vol. 124. P. 1328–1342. DOI: [10.1029/2018JA025999](https://doi.org/10.1029/2018JA025999).

Imhof W.L., Gaines E.E., Reagan J.B. Dynamic variations in intensity and energy spectra of electrons in the inner radiation belt. *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78. P. 4568–4576. DOI: [10.1029/ja078i022p04568](https://doi.org/10.1029/ja078i022p04568).

Kudela K., Matisin J., Shuiskaya F.K., et al. Inner zone electron peaks observed by the “Active” satellite. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 8681–8683.

Lejosne S., Mozer F.S. Typical values of the electric drift  $E \times B / B^2$  in the inner radiation belt and slot region as determined from Van Allen Probe measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121. P. 12014–12024. DOI: [10.1002/2016JA023613](https://doi.org/10.1002/2016JA023613).

Lejosne S., Fedrizzi M., Maruyama N., et al. Thermospheric neutral winds as the cause of drift shell distortion in Earth’s inner belt. *Front. Astron. Space Sci.* 2021. Vol 8. Art. 725800. DOI: [10.3389/fspas.2021.725800](https://doi.org/10.3389/fspas.2021.725800).

Lejosne S., Fejer B., Maruyama N., et al. Radial transport of energetic electrons as determined from the “zebra stripes” measured in the Earth’s inner belt and slot region. *Front. Astron. Space Sci.* 2022. Vol. 9. Art. 823695. DOI: [10.3389/fspas.2022.823695](https://doi.org/10.3389/fspas.2022.823695).

Liu L., Chen Y. Statistical analysis of solar activity variations of total electron content derived at Jet Propulsion Labor-

atory from GPS observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2009. Vol. 114. A10311. DOI: [10.1029/2009JA014533](https://doi.org/10.1029/2009JA014533).

Paulikas G.A. Precipitation of particles at low and middle latitudes. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1975. Vol. 13, iss. 5. P. 709–734.

Pinto O., Pinto R.C.A., Gonzalez W.D., et al. About the origin of peaks in the spectrum of inner belt electrons. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96. P. 1857–1860. DOI: [10.1029/90JA02383](https://doi.org/10.1029/90JA02383).

Sauvaud J.A., Moreau T., Maggiolo R., et al. High-energy electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer description and first results on the inner belt. *Planet. Space Sci.* 2006. Vol. 54. P. 502–511.

Selesnick R.S., Su Y.-J., Blake J.B. Control of the innermost electron radiation belt by large-scale electric fields. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121. P. 8417–8427. DOI: [10.1002/2016JA022973](https://doi.org/10.1002/2016JA022973).

Selesnick R.S., Su Y.-J., Sauvaud J.A. Energetic electrons below the inner radiation belt. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. Vol. 124. P. 5421–5440. DOI: [10.1029/2019JA026718](https://doi.org/10.1029/2019JA026718).

Su Y.-J., Selesnick R.S., Blake J.B. Formation of the inner electron radiation belt by enhanced large-scale electric fields. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121. P. 8508–8522. DOI: [10.1002/2016JA022881](https://doi.org/10.1002/2016JA022881).

Sun W., Yang J., Wang W., et al. Archimedean spiral distribution of energetic particles in Earth’s inner radiation belt. *Geophys. Res. Lett.* 2024. Vol. 51. e2023GL106859. DOI: [10.1029/2023GL106859](https://doi.org/10.1029/2023GL106859).

Suvorova A.V. Flux enhancements of >30 keV electrons at low drift shells  $L < 1.2$  during last solar cycles. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122. P. 12274–12287. DOI: [10.1002/2017JA024556](https://doi.org/10.1002/2017JA024556).

Suvorova A.V., Dmitriev A.V. Radiation aspects of geomagnetic storm impact below the radiation belt. *Cyclonic and Geo-magnetic Storms: Predicting Factors, Formation and Environmental Impacts*. New York: NOVA Science Publishers, 2015. P. 19–76.

Suvorova A.V., Tsai L.C., Dmitriev V.A. On relation between mid-latitude ionospheric ionization and quasi-trapped energetic electrons during 15 December 2006 magnetic storm. *Planet. Space Sci.* 2012. Vol. 60. P. 363–369. DOI: [10.1016/j.pss.2011.11.001](https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.11.001).

Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.-C., et al. TEC evidence for near-equatorial energy deposition by 30 keV electrons in the topside ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 4672–4695. DOI: [10.1002/jgra.50439](https://doi.org/10.1002/jgra.50439).

Suvorova A.V., Huang C.-M., Matsumoto H., et al. Low-latitude ionospheric effects of energetic electrons during a recurrent magnetic storm. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. Vol. 119. P. 9283–9302. DOI: [10.1002/2014JA020349](https://doi.org/10.1002/2014JA020349).

Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Parkhomov A.V., et al. Quiet time structured Pc1 waves generated during transient foreshock. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. Vol. 124. P. 9075–9093. DOI: [10.1029/2019JA026936](https://doi.org/10.1029/2019JA026936).

Tadokoro H., Tsuchiya F., Miyoshi Y., et al. Electron flux enhancement in the inner radiation belt during moderate magnetic storms. *Ann. Geophys.* 2007. Vol. 25. P. 1359–1364.

Takagi S., Nakamura T., Kohno T., et al. Observation of space radiation environment with EXOS-D. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1993. Vol. 40, iss. 6. P. 1491–1497.

Tanaka Y., Nishino M., Iwata A. Magnetic storm-related energetic electrons and magnetospheric electric fields penetrating into the low-latitude magnetosphere ( $L \sim 1.5$ ). *Planet. Space Sci.* 1990. Vol. 38, iss. 8. P. 1051–1059.

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 25 апреля 2024 г.).

URL: <https://ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/dataaccess> (дата обращения 25 апреля 2024 г.).

URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html> (дата обращения 25 апреля 2024 г.).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Суворова А.В., Дмитриев А.В. Условия появления интенсивных потоков энергичных электронов на  $L < 1.2$ , связанные с солнечной активностью и параметрами солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 3. С. 79–87. DOI: [10.12737/szf-103202409](https://doi.org/10.12737/szf-103202409).