

ВОЗРАСТАНИЯ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ МЕЖПЛАНЕТНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ РАЗНЫХ ТИПОВ

Н.С. Шлык, С.М. Белов, М.А. Абунина, А.А. Абунин

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, nshlyk@izmiran.ru

ELECTRON FLUX ENHANCEMENTS IN GEOSTATIONARY ORBIT, CAUSED BY INTERPLANETARY DISTURBANCES OF DIFFERENT TYPES

N.S. Shlyk, S.M. Belov, M.A. Abunina, A.A. Abunin

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, RAS, Troitsk, Moscow, Russia,
nshlyk@izmiran.ru

Аннотация. Исследуются возрастания потоков высокоэнергичных (>2 МэВ) магнитосферных электронов на геостационарных орбитах за 1986–2024 гг., возникшие в результате воздействия межпланетных возмущений трех различных типов: (1) корональных выбросов массы, (2) потоков плазмы из корональных дыр и (3) их комбинаций. С помощью метода наложения эпох показано, что все три группы межпланетных возмущений по-разному воздействуют на регистрируемые впоследствии потоки электронов. Наиболее мощные и длительные электронные возрастания обусловлены воздействием высокоскоростных потоков из корональных дыр, а корональные выбросы массы способны значительно снижать потоки высокоэнергичных магнитосферных электронов. Учет типов межпланетных возмущений позволяет точнее прогнозировать уровень и длительность опасных электронных возрастаний.

Ключевые слова: магнитосферные электроны, геостационарная орбита, межпланетные возмущения.

Abstract. The paper examines increases in high-energy (>2 MeV) magnetospheric electron fluxes in geostationary orbits over a long period from 1986 to 2024, caused by three different types of interplanetary disturbances: (1) coronal mass ejections, (2) plasma streams from coronal holes, and (3) their combinations. Using the epoch superposition method, it is shown that interplanetary disturbances have different effects on the subsequently recorded electron fluxes. The most powerful and long-lasting electron enhancements are caused by high-speed streams from coronal holes, while coronal mass ejections can significantly reduce high-energy magnetospheric electron fluxes. Taking into account the types of interplanetary disturbances allows for more accurate predictions of the level and duration of hazardous electron flux enhancements.

Keywords: magnetospheric electrons, geostationary orbit, interplanetary disturbances.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастания потоков высокоэнергичных (>2 МэВ) магнитосферных электронов на геостационарных орбитах (ГСО) и их прогнозирование представляют значительный интерес для исследователей, поскольку такие события способны значительно ухудшать состояние космических аппаратов [Baker, 2001; Belov et al., 2004; Pilipenko et al., 2006]. Уже установлено, что электронные возрастания имеют тесную связь с ростом скорости солнечного ветра (СВ) и изменениями компонент межпланетного магнитного поля (ММП), а также с усилением авроральной и геомагнитной активности [Paulikas and Blake, 1979; Li et al., 2001; O'Brien et al., 2001; Reeves et al., 2003; 2011; Kryakunova et al., 2023; 2025; Мoya et al., 2017; Власова и др., 2021]. Однако причинами регистрируемых у Земли изменений скорости СВ, индукции ММП и геомагнитной активности являются межпланетные возмущения, связанные с различными солнечными источниками. В данной работе исследуется >3000 событий изменения потоков высокоэнергичных (>2 МэВ) магнитосферных электронов на ГСО по данным спутников серии GOES [<https://services.swpc.noaa.gov/json/goes/>] за длительный период 1986–2024 гг. Для каждого

такого события с использованием созданной в ИЗМИРАН базы данных форбуш-эффектов и межпланетных возмущений [FEID, <https://tools.izmiran.ru/feid>] был определен солнечный источник и рассмотрены три соответствующие группы:

(1) корональный выброс массы (КВМ) — 1207 событий, группа CMEs;

(2) высокоскоростной поток из корональной дыры (ВСП из КД) — 922 события, группа CHs;

(3) комбинированный (совместное воздействие КВМ и ВСП из КД) — 882 события, группа MIX.

Целью настоящей работы является поиск и описание закономерностей поведения потока высокоэнергичных магнитосферных электронов в зависимости от типа межпланетного возмущения, приведшего к его модуляции.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫДЕЛЕННЫХ ГРУПП СОБЫТИЙ

На рис. 1 показано поведение различных параметров СВ и ММП (верхняя панель), потока магнитосферных электронов с энергиями >2 МэВ (средняя панель) и геомагнитной активности (индексы Dst и K_p , нижняя панель) за период 15–20 июня 2023 г. Вертикальными линиями (ons) отмечены начала межпланетных возмущений.

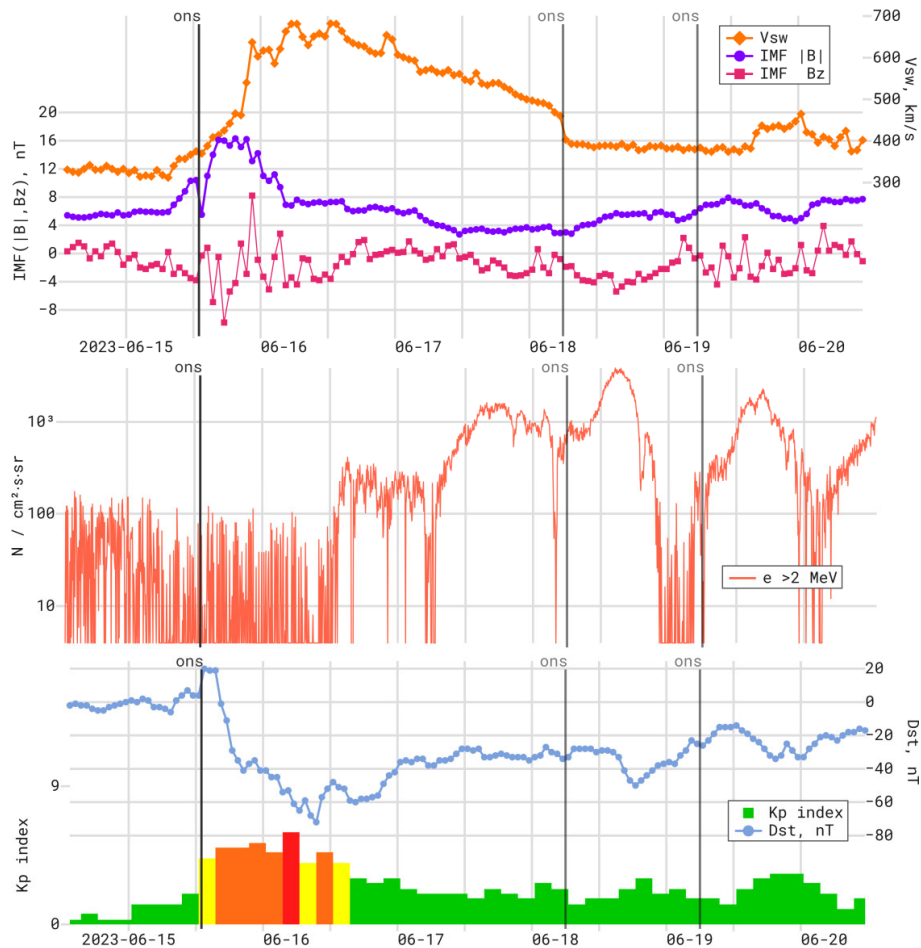


Рис. 1. Поведение основных параметров СВ, ММП, потока высокоэнергичных магнитосферных электронов и геомагнитной активности

В рассматриваемом примере, первое событие (начало 15 июня в 13 UT) из группы CHs: хорошо видно увеличение скорости СВ, повышенные значения ММП и колебания B_z -компоненты (область взаимодействия перед началом ВСП из КД), усиление геомагнитной активности до уровня умеренной магнитной бури. Затем, на 2–3 суток начинается значительный рост потока электронов до опасного уровня ($> 10^3 \text{ (cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr)}^{-1}$), однако под воздействием следующих межпланетных возмущений (18 и 19 июня), связанных с КВМ, видно снижение и новый рост потока частиц. Таким образом, поведение потока высокоэнергичных магнитосферных электронов хотя и всегда связано с изменением скорости СВ, модуля ММП и геомагнитной активности, но может существенно отличаться для разных типов межпланетных возмущений.

На рис. 2 показано распределение средних значений потока электронов, зарегистрированных на третьи сутки после начала события для трех рассматриваемых групп. Все распределения ассиметричны, но наибольшее среднее значение (отмечено вертикальной линией соответствующего цвета) приходится на группу CHs. Можно также сделать вывод, что после воздействия межпланетных КВМ (МКВМ) уровень потока электронов чаще всего не увеличивается до опасного уровня, например, медианное значение в

группе CMEs составляет всего $38.9 \text{ (cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr)}^{-1}$, а для группы CHs это значение почти в 10 раз больше — $372.3 \text{ (cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr)}^{-1}$, что говорит о большей эффективности этой группы в отношении электронных возрастных.

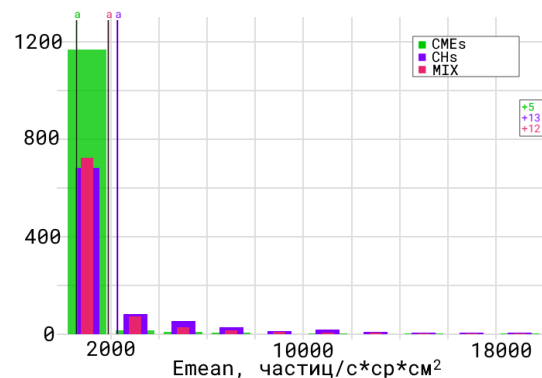


Рис. 2. Распределение средних значений потока электронов, зарегистрированных на третьи сутки после начала события, для трех групп событий. Числа соответствующего цвета в правой части рисунка показывают количество событий каждой группы, не вошедших в представленный на диаграмме диапазон значений

Группа MIX занимает промежуточное положение, следует предполагать, что наличие ВСП из КД «помогает» МКВМ оказать влияние на

рост потока электронов. Возможным механизмом могут быть волновые пакеты, связанные с периодическими изменениями B_z -компоненты ММП, которые обычно отсутствуют в МКВМ-событиях. По-видимому, такие взаимодействия типа волна—частица способны ускорять постоянно имеющиеся во внешнем радиационном поясе затравочные электроны с энергиями от десятков сотен килоэлектронвольт до единиц мегаэлектронвольт.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ ЭПОХ

Разница в поведении потоков высокоэнергичных магнитосферных электронов под воздействием межпланетных возмущений различных типов хорошо видна также при рассмотрении результатов применения метода наложения эпох, где за нулевой час принято начало соответствующего события в базе данных FEID (рис. 3). Отметим, что фоновые значения потока электронов значительно различаются для исследуемых групп: в группе CMEs они на порядок меньше, чем в группах CHs и MIX, и в группе CHs фон несколько выше, чем в группе MIX. Это может быть связано с тем, что длительность электронных возрастных значительно превышает длительность межпланетных возмущений, которыми они вызваны, в результате чего регистрируемые друг за другом события с участием ВСП из КД

последовательно вносят вклад в повышение уровня потока электронов, а последовательные МКВМ, наоборот, снижают его.

Характерной особенностью всех рассматриваемых групп является небольшой рост потока электронов в первые часы от начала события (вероятно, связанный с ускоренными на межпланетных ударных волнах частицами) и снижение потока электронов на следующие 20–25 ч (внутри структуры магнитного облака МКВМ или в области взаимодействия, предшествующей ВСП из КД). Интересно отметить, что уровень геомагнитной активности при этом не различается во всех трех группах (рис. 3, нижняя левая панель). Однако группе CMEs в целом свойственны значительно более низкие значения потоков высокоэнергичных электронов, чем группам, в которых имеется воздействие ВСП из КД. Более детальный анализ показывает, что рост потока электронов в группе CMEs на вторые-третьи сутки связан уже с воздействием следующего межпланетного возмущения, что отражается и в более высоких значениях K_p -индекса и новом росте скорости СВ (рис. 3, нижние панели).

Группы CHs и MIX имеют в целом схожее поведение, выраженный рост потоков электронов до опасных значений начинается на 2–3 сутки от начала событий, когда скорость СВ достигает своих максимальных значений (рис. 3, нижняя правая панель).

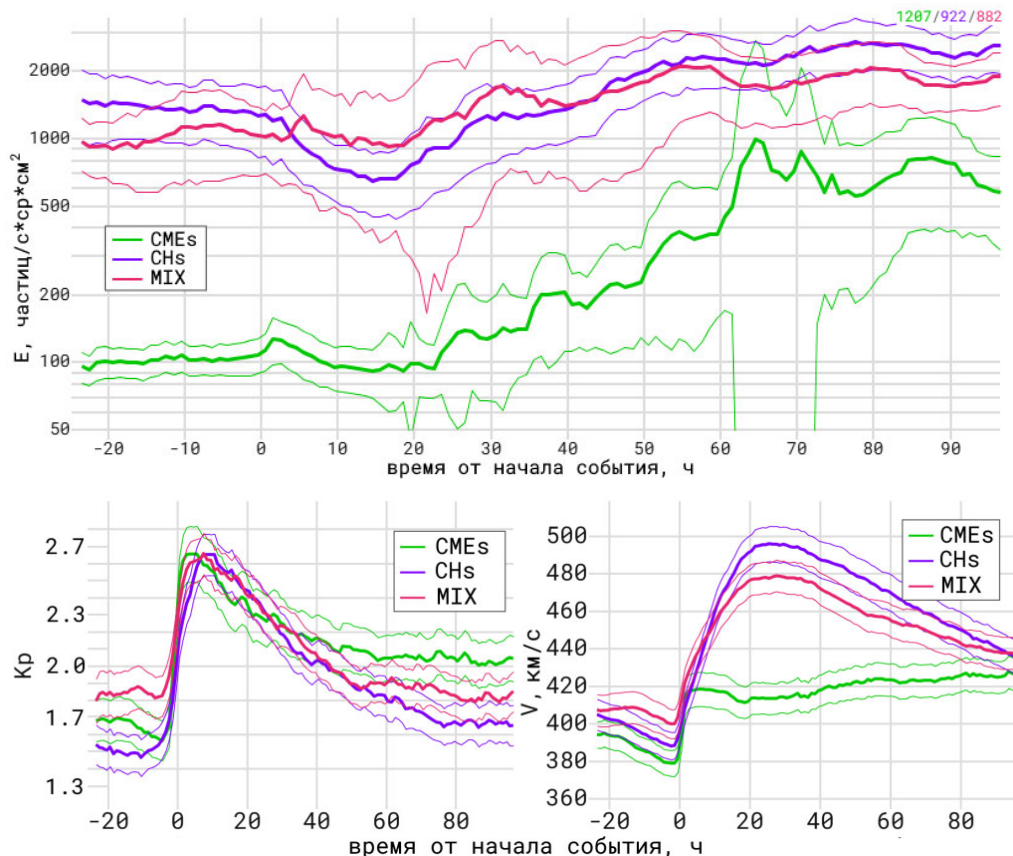


Рис. 3. Поведение потока электронов с энергиями >2 МэВ на ГСО (верхняя панель), K_p -индекса геомагнитной активности и скорости СВ (нижняя панель) при воздействии межпланетных возмущений разных типов. Тонкими линиями соответствующего цвета обозначено отклонение $\pm\sigma$, числа сверху — количество событий в каждой группе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ поведения потоков высокоэнергичных (>2 МэВ) магнитосферных электронов на ГСО за длительный период 1986–2024 гг., возникших в результате воздействия межпланетных возмущений трех различных типов, показал следующее.

— Самые значительные ($> 10^3$ (см²·с·ср)^{−1}) и длительные (> 3 сут) электронные возрастания обусловлены воздействием высокоскоростных потоков из КД;

— Повышенный уровень геомагнитной активности в отсутствие роста скорости СВ, обусловленного ВСП из КД, не приводит к увеличению потоков электронов до опасного уровня;

— Межпланетные корональные выбросы массы способны снижать потоки высокоэнергичных магнитосферных электронов, особенно во время прохождения мимо Земли структуры магнитного облака;

— Эффект снижения потока электронов также наблюдается в области взаимодействия перед началом роста скорости в ВСП из КД.

Учет рассмотренных типов межпланетных возмущений позволит точнее прогнозировать уровень и длительность опасных электронных возрастаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Baker D. Satellite anomalies due to space storms. *Space Storms and Space Weather Hazards*. Ed. Daglis I.A. New York, Springer Publ., 2001, P. 251–284.

Belov A., Dorman L., Iucci N., Kryakunova O., Ptitsyna N. The relation of high- and low-orbit satellite anomalies to different geophysical parameters. In: Daglis I.A. (eds) *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, V. 176. Springer, Dordrecht. 2004.

Kryakunova O.N., Belov A.V., Yakovets A.F., Abunin A.A., Tsepakina I.L., Seifullina B.B., Abunina M.A., Nikolayevskiy N.F., Shlyk N.S. A statistical relationship

between the fluence of magnetospheric relativistic electrons and interplanetary and geomagnetic characteristics // *Adv. Space Res.* 2023. V. 72, N 12. P. 5391–5398.

Kryakunova O.N., Seifullina B.B., Tsepakina I.L., Shlyk N.S., Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V., Nikolayevskiy N.F. On solar sources of interplanetary disturbances leading to high-energy magnetospheric electron enhancements in geostationary orbit // *MNRAS*. 2025. V. 541. P. 911–918.

Li X., Temerin M., Baker D.N., Reeves G.D., Larson G.D. Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 1887–1890.

Moya P.S., Pinto V.A., Sibeck D.G. et al. On the effect of geomagnetic storms on relativistic electrons in the outer radiation belt: Van Allen Probes observations // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2017. V. 122. P. 11100–11108.

O'Brien T. P., McPherron R. L., Sornette D., Reeves G. D., Friedel R., Singer H. J. Which magnetic storms produce relativistic electrons at geosynchronous orbit? // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N A8. P. 15533–15544.

Paulikas G.A., Blake J.B. Effects of the solar wind magnetospheric dynamics: energetic electrons at the synchronous orbit. In: Olson, W.P. (Ed.), *Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes*. Geophysical Monograph Series, AGU, Washington, DC, V. 21. 1979. P. 180.

Pilipenko V., Yagova N., Romanova N., Allen J. Statistical relationships between the satellite anomalies at geostationary orbits and high-energy particles // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37, N 6. P. 1192–1205.

Reeves G. D., Morley S. K., Friedel R. H. W., Henderson M. G., Cayton T. E., Cunningham G., Blake J. B., Christensen R. A., Thomsen D. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. Article ID A02213.

Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W. et al. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 10. P. 1529–1564.

URL: <https://tools.izmiran.ru/feid> (дата обращения 07.05.2026).

URL: <https://services.swpc.noaa.gov/json/goes/> (дата обращения 07.05.2026).