ОСОБЕННОСТИ ВОЗРАСТАНИЙ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ МАГНИТОСФЕРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ > 2 МэВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ В 2009 г.

**Абунина М.А.¹, Белов А.В.¹, Шлык Н.С.¹, Абунин А.А.¹, Прямушкина И.И.¹,
Крыкунова О.Н.², Сейфуллина Б.Б.², Цепакина И.Л.²**

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

²*Дочернее товарищество с ограниченной ответственностью "Институт ионосферы",
г. Алматы, Казахстан*

FEATURES OF THE MAGNETOSPHERIC ELECTRON FLUX INCREASES WITH ENERGY > 2 MeV ON GEOSTATIONARY ORBIT IN 2009

**Abunina M.A.¹, Belov A.V.¹, Shlyk N.S.¹, Abunin A.A.¹, Pryamushkina I.I.¹,
Kryakunova O.N.², Seifullina B.B.², Tsepakina I.L.²**

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences, IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia*

²*Subsidiary Limited Liability Partnership "Institute of Ionosphere", Almaty, Kazakhstan*

Increases in the flux of magnetospheric electrons and related phenomena in 2009 are investigated. The year 2009 was very calm: there were neither solar proton events nor significant Forbush decreases, and only four geomagnetic storms were registered. However, increases in high-energy magnetospheric electrons fluxes were recorded: 4 increases with a maximum flux $> 500 \text{ p/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$, 10 increases with a maximum flux from 100 to $500 \text{ p/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$. The relationship between the identified enhancements with the features of interplanetary and geomagnetic disturbances, as well as with their solar sources, is analyzed. High-speed streams from coronal holes, which did not entail an increase in electron fluxes, are considered separately.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-19-22

Введение

Изучение электронных возрастных один из важных вопросов солнечно-земной физики и космической погоды. Хорошо известно, что потоки высокоэнергичных электронов (>2 МэВ) создают значительные угрозы для спутниковой электроники [1, 2]. Особенности поведения потока магнитосферных электронов и его связи с различными межпланетными возмущениями на длительном экспериментальном материале рассматривались многими авторами [3–7].

В данной работе для более уверенного отождествления электронных возрастных с солнечными источниками, был выбран самый спокойный за последние 34 года период – 2009 год, когда было зарегистрировано наименьшее количество электронных возрастных, и они были непродолжительными (рис. 1).

Рис. 1. Количество электронных возрастных (превышение среднесуточного потока электронов $>5 \cdot 10^7$ ч/см²·ср·день) с 1987 по 2020 гг.

Из рисунка 1 видно, что значительно выделяются периоды 1993–1995, 2003–2008 и 2015–2017 гг., когда примерно в каждый третий день в году были зарегистрированы высокие значения потока магнитосферных электронов. Такое количество возмущенных дней затрудняет анализ источников и причин этих возрастных, поскольку события накладываются друг на друга.

Данные и методы

В работе использовались данные потоков электронов с энергией >2 МэВ на геостационарной орбите спутников серии GOES [9]. Данные по межпланетным возмущениям (скорость, плотность, температура солнечного ветра (СВ), величина межпланетного магнитного поля (ММП), вариациям космических лучей (КЛ) и геомагнитной активности были включены в базу данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID – *Forbush Effects and Interplanetary Disturbances*, [10]), созданную в ИЗМИРАН. Параметры СВ и ММП взяты из базы данных OMNI [11], данные по геомагнитной активности брались из [12] и [13]. Вариации плотности КЛ рассчитывались методом глобальной съемки [8] по данным мировой сети нейтронных мониторов [14] для частиц с жесткостью 10 ГВ.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрев поведение потока электронов с энергией >2 МэВ по данным спутников GOES в 2009 году (рис. 2), мы разделили все возрастные потоки электронов на четыре группы: I) >500 ч/см²·с·ср – 4 события; II) от 100 до 500 ч/см²·с·ср – 10 событий; III) от 10 до 100 ч/см²·с·ср – 21 событие; IV) <10 ч/см²·с·ср – 16 событий.

При помощи базы данных FEID, мы соотнесли все электронные возрастные с межпланетными возмущениями и определили, что 4 самых значительных возрастных из первой группы были связаны с воздействием высокоскоростных потоков из корональных дыр (КД), поэтому решили попробовать связать остальные электронные возрастные с другими потоками из КД. Однако выяснилось, что не все КД эффективны для модуляции потока электронов.

Рис. 2. Поведение потока электронов магнитосферного происхождения с энергией >2 МэВ по данным спутника GOES в 2009 году.

Все КД очень разнообразны, и, чтобы определить численные значения, какими должен обладать поток из КД для эффективной модуляции потока электронов, для соответствующих межпланетных возмущений были рассчитаны средние значения основных параметров СВ (максимальная скорость, $V_{\max}$), ММП (максимальная индукция, $B_{\max}$), КЛ (величина вариаций КЛ во время межпланетного возмущения, CR), геомагнитной активности ($A_{p\max}$, $Dst_{\min}$) (таблица, в скобках приведено количество событий в каждой группе).

Таблица.

Параметр	I (4)	II (10)	III (21)	IV (16)
$V_{\max}$, км/с	572.3 ± 6.5	538.1 ± 20	413.9 ± 8.9	426.0 ± 10.4
$B_{\max}$, нТл	14.78 ± 2.16	9.06 ± 0.53	7.69 ± 0.47	8.76 ± 0.4
CR, %	0.95 ± 0.13	0.69 ± 0.03	0.58 ± 0.03	0.68 ± 0.05
$A_{p\max}$	39.00 ± 10.3	22.3 ± 1.78	13.62 ± 2.89	11.31 ± 0.95
$Dst_{\min}$, нТл	-45.0 ± 12.9	-22.2 ± 2.1	-15.0 ± 1.9	-12.9 ± 1.9

Из таблицы видно, что группа I значительно отличается от других (особенно от III и IV) практически по всем параметрам. В ней зарегистрированы самые большие значения скорости СВ, величины ММП и вариаций КЛ во время межпланетного возмущения, геомагнитной активности. Отличия средних значений основных параметров в группах III и IV незначительны (с учетом ошибки расчетов), поэтому события в этих группах можно рассматривать совместно.

Далее мы рассмотрели поведение скорости СВ, величины ММП, КЛ и геомагнитных индексов, используя метод наложения эпох (рис. 3а-в). Из рисунков очевидно, что возмущения из группы I значительно мощнее и дольше воздействуют на околоземное космическое пространство, чем возмущения из других групп. Отметим, что усиление геомагнитной активности до возмущенного уровня является одним из важных факторов для модуляции потока электронов до опасных значений.

Выводы

Все возрастания потока магнитосферных электронов в 2009 году связаны с межпланетными возмущениями, содержащими потоки из КД.

Возрастания потока электронов до опасного уровня (>500 ч/см²·с·ср) происходят после воздействия на Землю высокоскоростных потоков из КД

Рис. 3. Поведение основных параметров СВ (первая кривая), ММП (вторая кривая), КЛ (третья кривая) и геомагнитных индексов (четвертая кривая и столбцы) методом наложения эпох для межпланетных возмущений из выделенных групп событий: а) группа I, б) группа II, в) группы III+IV.

со скоростями, в среднем, >550 км/с, величиной ММП >10 нТл и усиления геомагнитной активности до возмущенного состояния ($K_p > 4$).

Полученные результаты можно применять для прогнозирования космической погоды. Например, ожидая воздействие потока очередной корональной дыры, обладающей невысокой скоростью (менее 420 км/с), не следует прогнозировать превышение потока магнитосферных электронов >100 ч/см²*с*ср.

Финансирование. М.А. Абунина, А.А. Абунин, А.В. Белов, Н.С. Шлык поддержаны Грантом РФФ № 20-72-10023. О.Н. Крякунова, Б.Б. Сейфуллина и И.Л. Цепаккина поддержаны грантом Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (№ AP08855916).

Литература

1. Belov A. et al. Effects of space weather on technology infrastructure. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 147.
2. Потанов А.С. // СЗФ. Т. 3. № 1. С. 46-58. 2017.
3. Базилевская Г.А., Махмутов В.С. // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 69. № 6. С. 1670. 1999.
4. Wrenn G.L. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 71. P. 1210. 2009.
5. Pinto V. et al. // JGR: Space Phys. V. 123. I. 2. P. 1134-1145. 2018.
6. Абунин А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 83. № 5. С. 638-640. 2019.
7. Крякунова О.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 85. № 8. С. 1177-1179. 2021.
8. Belov A. et al. // Solar Phys. V. 293. P.68-91. 2018.
9. <https://services.swpc.noaa.gov/json/goes/>
10. <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html>
11. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>
12. <ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc/>
13. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>
14. <http://www01.nmdb.eu/>