

УДК 524.1-52

ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ МАГНИТОСФЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ И РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ ВОЗМУЩЕНИЯ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

© 2019 г. А. А. Абуни^{1, 2, *}, М. А. Абунина¹, А. В. Белов¹, С. П. Гайдаш¹,
О. Н. Крякунова^{3, 4}, Н. Ф. Николаевский³, И. И. Прямушкина¹, Л. А. Трефилова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, Элиста, Россия

³Дочернее товарищество с ограниченной ответственностью “Институт ионосферы”, Алматы, Казахстан

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: abunin@izmiran.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Исследуются особенности поведения высокоэнергичных магнитосферных электронов (с энергиями более 2 МэВ) во время межпланетных возмущений, вызванных корональными выбросами плазмы и высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр. Анализируется более чем тридцатилетний период наблюдений таких электронов (1986–2017 гг.). Показано, что корональные выбросы плазмы и высокоскоростные потоки из корональных дыр по-разному влияют на поведение высокоэнергичных электронов. В создании электронных возрастных высокоскоростных потоков из дыр эффективнее корональных выбросов.

DOI: 10.1134/S036767651905003X

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее актуальных задач солнечно-земной физики является заблаговременное прогнозирование поведения потока высокоэнергичных электронов с энергиями более 2 МэВ в околоземном пространстве [1, 2]. Прежде всего это связано с тем, что эти релятивистские частицы могут вызывать сбои в работе космических аппаратов вплоть до их полной потери [3–5, 9]. Особенно это касается аппаратов, которые расположены на геостационарных орбитах. Тем не менее, несмотря на множество проведенных исследований в этой области, на данный момент нет четкого понимания, каким образом происходит генерация этих частиц в околоземном пространстве во время межпланетных возмущений (см., напр., [10]), но на практике определены условные пороги, при превышении которых начинают наблюдаться неполадки в работе космических аппаратов. Большинство таких неполадок наблюдается, когда суточный флюенс релятивистских электронов с энергиями более 2 МэВ превышает значение 10^9 частиц \cdot см⁻² \cdot сут⁻¹ \cdot ср⁻¹. Но не все межпланетные возмущения сопровождаются сильным возрастанием потока этих высокоэнергичных частиц.

В данной работе представлен сравнительный анализ того, как различные типы возмущений влияют на поведение потока электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарных орбитах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Существует два основных типа возмущений межпланетной среды: спорадические и рекуррентные. К первому относятся корональные выбросы солнечной плазмы, которые при распространении от Солнца трансформируются в межпланетные возмущения ICMEs; ко второму – вращающиеся вместе с Солнцем высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр [6, 7]. В данном исследовании информация о межпланетных возмущениях бралась из сетевой открытой базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html> [8]. Представленная база данных охватывает более полувековой период (1957–2017 гг.) и содержит около 7500 событий. Следует подчеркнуть, что отбирались только изолированные и однозначно отождествленные со своим солнечным источником события. Одним из условий отбора являлось то, что за 72 ч до и после события не должно было

быть зарегистрировано других значительных возмущений. Таким образом, было выделено 247 событий, которые были поделены на три группы: *АО* – возмущения от выбросов из активных областей (24 события); *КД* – возмущения, связанные с корональными дырами (174 события); *ВВ* – возмущения от волоконных выбросов вне активных областей (49 событий). Информация о потоке релятивистских электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарных орбитах была взята со спутников серии *GOES* (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/xray/>), а о солнечном ветре – из базы данных *OMNI* (<ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/>).

На рис. 1 представлены усредненные значения суточного флюенса электронов для выделенных групп. Нулевым днем обозначается день прихода возмущения к Земле (момент прихода ударной волны, момент внезапного начала геомагнитной бури и т.д.). Из рисунка видно, что возмущения, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр (о), сопровождаются более высокими значениями потока электронов (группа *КД*). В момент прихода возмущения (нулевой и первый день) наблюдается резкий спад, затем резкое возрастание и далее, в течение нескольких дней, медленная релаксация к нормальным значениям потока электронов. В случае событий группы *АО* наблюдается также резкий спад в момент прихода возмущения, но далее наблюдается плавное возрастание потока частиц. Волоконные же события (группа *ВВ*) слабо влияют на поток электронов. Из рисунка также видно, что максимальные значения суточного флюенса электронов в возмущении во всех трех группах существенно различаются. Высокие значения флюенса рассматриваемых высокоэнергичных частиц типичны для возмущений, вызванных влиянием от корональных дыр и не типичны для возмущений от волоконных выбросов. Более того, если выделить только те возмущения, в которых суточный флюенс электронов превышал значение 10^9 частиц \cdot см $^{-2}$ \cdot сут $^{-1}$ \cdot ср $^{-1}$, то окажется, что из 18 событий по одному событию будут принадлежать группам *АО* и *ВВ*, а остальные группе *КД* (см. таблицу).

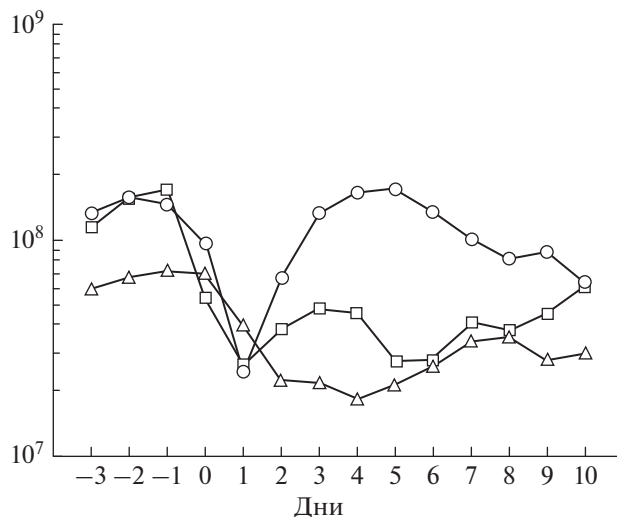


Рис. 1. Усредненные значения суточного флюенса электронов для событий из группы *АО* (□), *ВВ* (△) и *КД* (○). Нулевой день соответствует приходу возмущения к Земле.

Рисунок 2 более наглядно демонстрирует разницу поведения потока высокоэнергичных электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарных орбитах при различных типах возмущений межпланетной среды. На левой панели (а) показано событие, в котором возмущение было вызвано корональным выбросом плазмы. В данном случае наблюдается уменьшение потока релятивистских частиц и затем восстановление до нормального уровня. На правой панели рисунка (б) показано возмущение, вызванное высокоскоростным потоком из корональной дыры. Видно, что в момент прихода возмущения наблюдается резкий спад потока электронов, а далее резкое возрастание потока электронов (*F*) до уровня более 10^4 частиц \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$ \cdot ср $^{-1}$. Далее наблюдается медленный спад потока.

Из данного рисунка хорошо видно, что при практически одинаковых параметрах возмущений (скорости солнечного ветра (*V*) и уровня геомагнитной активности (индекса *Kp*)) поведение

Таблица. Количество событий в выделенных группах с максимальным значением суточного флюенса электронов в событии более $>10^7$, $>10^8$, $>10^9$ частиц \cdot см $^{-2}$ \cdot сут $^{-1}$ \cdot ср $^{-1}$

	Максимальное значение суточного флюенса электронов в событии (частиц \cdot см $^{-2}$ \cdot сут $^{-1}$ \cdot ср $^{-1}$)		
	$>10^7$	$>10^8$	$>10^9$
Группа <i>АО</i>	22	9	1
Группа <i>КД</i>	151	110	16
Группа <i>ВВ</i>	35	17	1

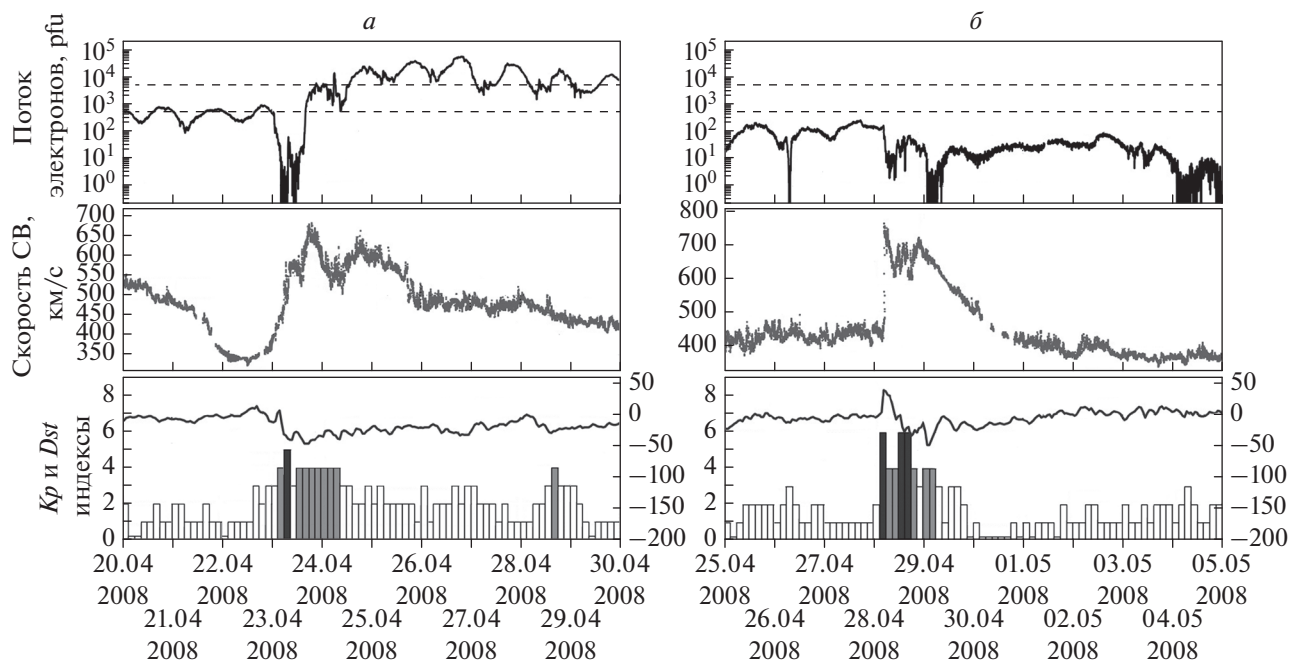


Рис. 2. Поведение потока высокоэнергичных электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарных орбитах во время межпланетных возмущений, вызванных корональным выбросом солнечной плазмы из активной области (а) и высокоскоростным потоком из корональной дыры (б).

потока релятивистских электронов существенно различается.

космических аппаратов серии *GOES* и всем сотрудникам сети станций космических лучей [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе представленного выше анализа можно сделать вывод, что возмущения межпланетной среды, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр, более эффективны в создании больших значений потока высокоэнергичных электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарных орбитах, чем возмущения от выбросов из активных областей и вне их. Это позволяет строить достаточно надежные модели для краткосрочного и среднесрочного прогнозирования поведения электронов, используя в ее основе информацию о рекуррентных источниках возмущения межпланетной среды. Подобная методика была разработана сотрудниками ИЗМИРАН, успешно апробирована и внедрена в работу Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ «Сеть СКЛ». Работа частично поддержана грантами РФФИ № 17-02-00508 и РНФ № 15-12-20001. Мы также признательны всему коллективу, обеспечивающему работоспособность

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов А.В., Крякунова О.Н., Абунин А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 231; Belov A.V., Kryakunova O.N., Abunin A.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 2. P. 211.
2. Gaidash S.P., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A. // Geomagn. Aeron. 2017. V. 57. № 7. P. 869.
3. Wrenn G.L., Rodgers D.J., Ryden K.A. // Ann. Geophys. 2002. V. 20. I. 7. P. 953.
4. Wrenn G.L. // J. Atm. Sol.-Ter. Phys. 2009. V. 71. № 10–11. P. 1210.
5. Белов А.В., Вилорези Дж., Дорман Л.И. и др. // Геомагн. и аэрон. 2004. Т. 44. № 4. С. 502; Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A. et al. // Geomagn. Aeron. 2004. V. 44. № 4. P. 461.
6. Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В. и др. // Геомагн. и аэрон. 2012. Т. 52. № 3. С. 313; Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V. et al. // Geomagn. Aeron. 2012. V. 52. № 3. P. 292.
7. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65. № 3. С. 373; Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2001. V. 65. № 3. P. 411.
8. Belov A., Abunin A., Eroshenko E. et al. // VarSITI Newsletter. 2017. V. 14. P. 8.
9. Webb D.F., Allen J.H. // Space Weather. 2004. V. 2. № 3. P. S03008.
10. Thorne R.M. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. L. 22107.
11. <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.