ВОЗМУЩЕНИЯ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ И ПОВЕДЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

**Абунин А.А.^{1,2}, Абунина М.А.¹, Белов А.В.¹, Гайдаш С.П.¹,
Ерошенко Е.А.¹, Крякунова О.Н.³, Николаевский Н.Ф.³,
Прямушкина И.И.⁴, Янке В.Г.¹**

¹ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

²КалмГУ, г. Элиста, Россия

³ДТОО Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан

⁴ГАПОУ БНК, г. Бугуруслан, Россия

DISTURBANCES OF THE INTERPLANETARY ENVIRONMENT AND THE BEHAVIOR OF HIGH-ENERGY MAGNETOSPHERIC ELECTRONS

**Abunin A.A.^{1,2}, Abunina M.A.¹, Belov A.V.¹, Gaidash S.P.¹,
Eroshenko E.A.¹, Kryakunova O.N.³, Nikolayevskiy N.F.³,
Pryamushkina I.I.⁴, Yanke V.G.¹**

¹IZMIRAN, Moscow, Russia

²KalmSU, Elista, Russia

³DTOO Institute of the ionosphere, Almaty, Kazakhstan

⁴GAPOY BNK, Buguruslan. Russia

In this paper, we study the behavior of high-energy magnetospheric electrons ($E > 2$ MeV) during interplanetary disturbances caused by coronal mass ejections and high speed streams from coronal holes. More than thirty years of observations of such electrons are analyzed (1986–2017). It is shown that coronal mass ejections and high speed streams from coronal holes have different impact on the behavior of high-energy magnetospheric electrons. In creating electronic increases, high-speed streams from coronal holes are more effective than coronal mass ejections.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-19-22

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 вызвать 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 $^{-2}$ $\cdot$ ср $^{-1}$ $\cdot$ сут $^{-1}$. 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.

Существует два основных типа возмущений межпланетной среды: спорадические и рекуррентные. К первым относятся корональные выбросы солнечной плазмы, которые при распространении от Солнца трансформируются в межпланетные возмущения ICMEs; ко вторым – вращающиеся вместе с Солнцем высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр [6, 7]. В данном исследовании информация о межпланетных возмущениях бралась из базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html> [8]. Следует подчеркнуть, что отбирались только одиночные и однозначно отождествленные со своим солнечным источником события. Одним из условий отбора являлось то, что за 72 часа до и после события не должно было быть зарегистрировано других значительных возмущений. Таким образом было выделено 247 событий, которые были поделены на три группы: *AR* – возмущения от выбросов из активных областей (24 события); *CH* – возмущения, связанные с корональными дырами (174 события); *nonAR* – возмущения от выбросов вне активных областей, так называемые волокна (49 событий). Информация о потоке релятивистских электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарных орбитах была взята со спутника *GOES*, а о солнечном ветре – из базы данных *OMNI*.

Рис. 1. Усредненные значения суточного флюенса электронов для событий из группы AR (□), nonAR (Δ) и CH (○).

На рис. 1 представлены усредненные значения суточного флюенса электронов для выделенных групп. Из рисунка видно, что возмущения, вы-

званные высокоскоростными потоками из корональных дыр ($\odot$), сопровождаются более высокими значениями потока электронов. 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 *AR* наблюдается также резкий спад в момент прихода возмущения, но далее наблюдается плавное возрастание потока частиц. Волоконные же события (группа *nonAR*) слабо влияют на поток электронов. Из рисунка 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·см⁻²·ср⁻¹·сут⁻¹, то окажется, что из 18 событий по одному событию будут принадлежать группам *AR* и *nonAR*, а остальные группе *CH* (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Количество событий в выделенных группах с максимальным значение суточного флюенса электронов в событии более $>10^7$, $>10^8$, $>10^9$ частиц/см⁻²·ср⁻¹·сут⁻¹

	Максимальное значение суточного флюенса электронов в событии (частиц·см ⁻² ·ср ⁻¹ ·сут ⁻¹)		
	$>10^7$	$>10^8$	$>10^9$
Группа <i>AR</i>	22	9	1
Группа <i>CH</i>	151	110	16
Группа <i>nonAR</i>	35	17	1

Рис. 2 более наглядно демонстрирует разницу поведения потока высокоэнергичных электронов при различных типах возмущений межпланетной среды. На левой панели 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 до уровня более 10^4 pfu. Далее наблюдается медленный спад потока. На правой панели показано событие, в котором возмущение было вызвано корональным выбросом плазмы. В данном случае наблюдается уменьшение потока релятивистских частиц и затем восстановление до нормального уровня. Из данного рисунка хорошо видно, что при практически одинаковых параметрах возмущений (скорости солнечного ветра и уровня геомагнитной активности) поведение потока релятивистских электронов существенно отличается.

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

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

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 её 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 в рамках грантов РФФИ №17-02-00508 и РНФ №15-12-20001. Мы также признательны всему коллективу, обеспечивающему работоспособность космических аппаратов серии GOES и всем сотрудникам сети станций космических лучей <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.

Литература

1. Белов А.В. и др., 2017, Изв. РАН: Сер. физ., 81, №2, С. 244–247.
2. Gaidash S.P. et al., 2017, G&A., 57, №7, Р. 869–876.
3. Wrenn G.L. et al., 2002, Ann. Geophys., 20, Р. 953–956
4. Wrenn G.L., 2009, J. Atm. Sol.-Ter. Phys., 71, Р. 1210–1218.
5. Белов А.В. и др., 2004, ГиА, 44, № 4, С. 502–510.
6. Абунин А.А. и др., 2012, ГиА, 52, №3, С. 313–320.
7. Белов А.В. и т.д., 2001, Изв. РАН: Сер. физ., 65, №3, С. 373–376.
8. Belov A. et al., 2017, VarSITI Newsletter, V.14, Р. 8–10.
9. Webb D.F. et al., 2004, Space Weather, V. 2, I. 3, CiteID S03008.
10. Thorne R.M., 2010, Geophys. Res. Lett., V. 37, I. 22, CiteID L22107.