

К ВОПРОСУ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ФЛЮЕНСА ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

^{1,2}А.А. Абунин, ¹М.А. Абунина, ¹А.В. Белов,
¹С.П. Гайдаш, ^{3,4}О.Н. Крякунова, ¹И.И. Прямушкина, ¹Е.И. Гамза

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия
abunin@izmiran.ru

²Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова, Элиста, Россия

³Институт ионосферы, Алматы, Казахстан

⁴Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

ON FORECASTING THE FLUENCE OF HIGH-ENERGY MAGNETOSPHERIC ELECTRONS

^{1,2}A.A. Abunin, ¹M.A. Abunina, ¹A.V. Belov,
¹S.P. Gaidash, ^{3,4}O.N. Kryakunova, ¹I.I. Pryamushkina, ¹E.I. Gamza

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow, Russia
abunin@izmiran.ru

²Gorodovikov Kalmyk State University, Elista, Russia

³Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan

⁴P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

Аннотация. В работе исследуются особенности поведения потоков релятивистских магнитосферных электронов на геостационарной орбите во время различных типов межпланетных возмущений. Анализируется более чем тридцатилетний период наблюдений этих частиц (1986–2019 гг.) на спутниках серии GOES. Показано, что корональные выбросы плазмы и высокоскоростные потоки из корональных дыр по-разному влияют на поведение высокоэнергичных электронов.

Ключевые слова: корональные выбросы массы, корональные дыры, магнитосферные электроны.

Abstract. In this paper, we study the behavior of high-energy magnetospheric electrons on geostationary orbit 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 (1986–2019) by GOES. 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.

Keywords: coronal mass ejections, coronal holes, high-energy magnetospheric electrons.

ВВЕДЕНИЕ

Заблаговременное прогнозирование флюенса высокоэнергичных магнитосферных электронов в околоземном пространстве является крайне важной задачей солнечно-земной физики. Прежде всего, это связано с тем, что эти частицы могут вызывать сбои в работе космических аппаратов вплоть до их полной потери [Белов и др., 2004; Wrenn, 2009]. Особенно это касается аппаратов, которые расположены на геостационарной орбите. 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. Кроме того, 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.

ДААННЫЕ И МЕТОДЫ

В качестве основной анализируемой характеристики поведения электронов магнитосферного происхождения на геостационарной орбите был выбран суточный флюенс (суммарный поток за сутки) магнитосферных электронов ($E > 2$ МэВ) на геостационарной орбите. Именно флюенс электронов прогно-

зируется в основных мировых центрах прогнозов космической погоды и именно эта характеристика тесно связана с неполадками электроники на космических аппаратах. Вся информация о высокоэнергичных электронах была взята из базы данных солнечной и геомагнитной активности (SGA), которая ранее была разработана сотрудниками ИЗМИРАН. Помимо данных об индексах геомагнитной активности и сопутствующих характеристиках солнечной активности (числа и площади солнечных пятен, поток радиоизлучения Солнца и т. д.), база данных SGA содержит информацию о суточных флюенсах электронов, полученную на космических аппаратах серии GOES [<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/particle>] за более чем тридцатилетний период (1986–2019 гг.).

Другой базой данных, используемой при анализе поведения электронов, является база данных форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID) [Belov et al., 2017; Абунин и др., 2018; <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html>]. Эта база данных охватывает период в 60 лет (1957–2017 гг.) и содержит информацию по около 7500 межпланетным возмущениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ отдельных событий показал, что магнитосферные электроны с энергиями более 2 МэВ на геостационарной орбите по-разному реагируют на различные типы возмущений в межпланетной среде.

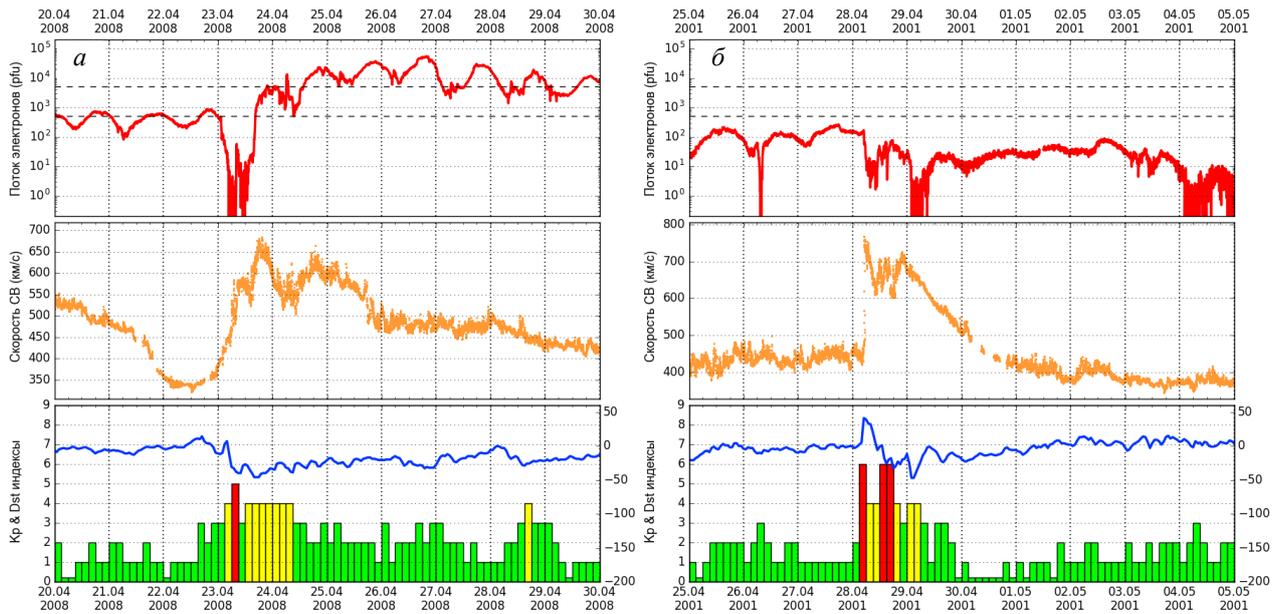


Рис. 1. Поведение потока магнитосферных электронов ($E > 2$ МэВ) на геостационарной орбите во время межпланетных возмущений, вызванных высокоскоростным потоком из корональной дыры (а) и корональным выбросом солнечной плазмы из активной области (б)

Существуют два основных типа межпланетных возмущений: рекуррентные (высокоскоростные потоки плазмы из корональных дыр) и спорадические (корональные выбросы плазмы) [Belov, 2009; Абуни и др., 2012]. Оба типа межпланетных возмущений способны вызвать отклик в магнитосфере и ионосфере Земли. Однако механизмы этих воздействий качественно отличаются друг от друга.

На рис. 1, а показано поведение потока электронов во время межпланетного возмущения, вызванного высокоскоростным потоком из корональной дыры, которая пересекала центральный меридиан видимой солнечной полусферы в ночь на 19 апреля 2008 г. Приход возмущения к Земле от нее был зарегистрирован в середине 22 апреля. Из рисунка видно, что в момент, когда регистрируется увеличение скорости солнечного ветра и геомагнитной активности, наблюдается резкий спад потока электронов на три порядка, а затем резкое возрастание практически до уровня 10^4 pfu. В последующие трое суток наблюдается тенденция плавного увеличения потока и только на четвертые сутки он начинает плавно снижаться. В данном событии была зарегистрирована малая магнитная буря ($K_p=5$), а скорость солнечного ветра превышала значение 650 км/с. Следует отметить, что во время межпланетных возмущений, вызванных высокоскоростными потоками из корональных дыр, поток электронов может держаться на высоком уровне до десяти и более суток.

На рис. 1, б показано другое событие, в котором межпланетное возмущение было вызвано корональным выбросом плазмы. 24 апреля 2001 г. в южной части видимой солнечной полусферы было зарегистрировано эрупция солнечной волокна. Спустя четверо суток оно достигло орбиты Земли, сопровождаясь резким скачком скорости солнечного ветра, а также геомагнитной бурей. В это же время наблюдался резкий спад потока электронов более чем на два

порядка, а затем последовало восстановление потока до уровня 10^2 pfu. В данном событии была зарегистрирована большая магнитная буря ($K_p=6$), а скорость солнечного ветра превышала значение 750 км/с.

Рис. 1, а, б на конкретных примерах качественно показывают различия в поведении высокоэнергичных электронов во время межпланетных возмущений различных типов. Несмотря на то, что второе событие, вызванное корональным выбросом массы, сопровождалось более высокой скоростью солнечного ветра и геомагнитной активностью, тем не менее, оно было менее эффективно в создании большого потока релятивистских электронов с энергиями более 2 МэВ.

Для того, чтобы показать как различные типы возмущений влияют на поведение потока высокоэнергичных электронов на геостационарных орбитах из базы данных FEID были отобраны все изолированные межпланетные возмущения, которые были однозначно отождествлены со своим солнечным источником. Было выделено 247 межпланетных возмущения, из которых у 74 событий источником являлись корональные выбросы массы (группа CMEs) и 173 события — связанные с высокоскоростными потоками из корональных дыр (группа CHs). Для каждого отобранного события информация о флюенсах электронов была взята из базы данных SGA.

На рис. 2 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.), левее от нулевого дня — дни до прихода возмущения, правее — дни после прихода возмущения. Из рисунка видно, что возмущения, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр (○), сопровождаются более высокими значениями потока

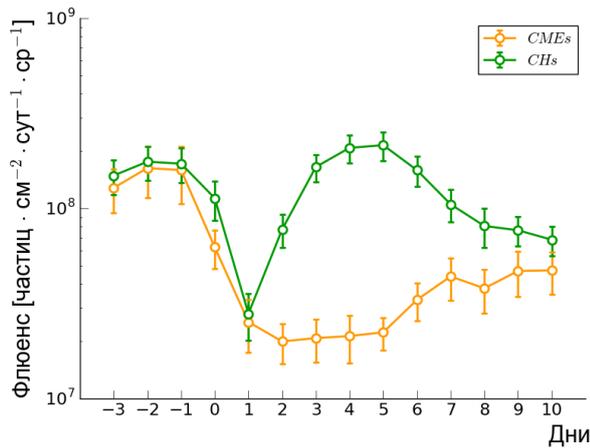


Рис. 2. Усредненные значения суточного флюенса электронов во время межпланетных возмущений, вызванных корональными выбросами (группа CMEs — Δ) и высокоскоростными потоками из корональных дыр (группа CHs — \circ)

электронов (группа CHs). В момент прихода возмущения (нулевой и первый день) наблюдается резкий спад флюенса электронов, а затем его резкое возрастание. Далее, в течение трех суток, наблюдается медленное увеличение значений флюенса частиц, а затем плавная релаксация к нормальным значениям.

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 корональных выбросов. 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.

Авторы работы признательны всему коллективу, обеспечивающему работоспособность космических аппаратов серии GOES. Работа частично поддержана в рамках грантов РФФИ №17-02-00508 и РНФ № 15-12-20001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // Геомагнетизм и аэрномия. 2012. Т. 52, № 3. С. 313–320.
- Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Гайдаш С.П., Ерошенко Е.А., Прямушкина И.И., Янке В.Г. Возможности базы данных для изучения форбуш-эффектов и межпланетных возмущений // Солнечная и солнечно-земная физика. 2018. С. 23–27.
- Белов А.В., Вилорези Дж., Дорман Л.И., Ерошенко Е.А., Левитин А.Е., Паризи М., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Чижиков В.А., Ючи Н., Янке В.Г. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли // Геомагнетизм и аэрномия. 2004. Т. 44, № 4. С. 502–510.
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Proc. IAU Symp. 2009. V. 257. P. 439-450.
- Belov A., Abunin A., Eroshenko E., Abunina M., Oleneva V., Yanke V. Database on the Forbush-effects and interplanetary disturbances to study Earth-affecting solar transients // VarSITI Newsletter. 2017. V. 14. P. 8–10.
- Wrenn G.L. Chronology of «killer» electrons: Solar cycles 22 and 23 // J. Atmos. Solar.-Terr. Phys. 2009. V. 71, N 1. P. 10–11. P. 1210–1218.