

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.035

О РОЛИ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ДИНАМИКЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ

О.А. Шейнер, Ф.И. Выборнов

НИРФИ ННГУ им. Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

E-mails: rff@nirfi.unn.ru, vybornov@nirfi.unn.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния солнечных явлений, таких как корональные выбросы массы (СМЕ) и высокоскоростные потоки солнечного ветра, на характеристики ионосферы. Рассмотрен набор параметров космической погоды (тип и скорость корональных выбросов массы, поток рентгеновских лучей, скорость высокоскоростного солнечного ветра), который позволил выявить доминирующие физические связи между динамикой ионосферы и этими двумя солнечными явлениями. В исследовании используются данные вертикального и наклонного зондирования ионосферы, полученные во время нескольких солнечных событий, произошедших в 24 солнечном цикле. Показано, СМЕ и высокоскоростные солнечные потоки являются глобальными событиями солнечной активности, влияющими на параметры, используемые для характеристики ионосферы.

Введение. Совокупность явлений на Солнце, в космическом пространстве и межпланетной среде оказывает воздействие на процессы в околоземном космическом пространстве. Первичным источником возмущений являются вариации солнечного излучения, а перенос возмущений осуществляется волнами и частицами в межпланетной среде, магнитосфере и ионосфере Земли. Сложность построения математической модели, описывающей всю систему, включающую в себя цепочку плазменных областей (солнечная атмосфера и межпланетная среда), где доминируют разные физические процессы, граничные и начальные условия для которых в настоящее время еще не до конца изучены, приводит к применению упрощенного подхода, описывающего вместо динамики всей совокупности физических параметров последовательность отдельных повторяющихся явлений, проявляющихся в характерном наборе этих параметров, что в ряде случаев позволяет выявлять доминирующие физические связи и строить прогностические схемы для системы «Солнце – солнечный ветер – геомагнитосфера».

С конца прошлого века проводились исследования по определению геоэффективности различных физических явлений, возникающих на Солнце, таких как интенсивные солнечные вспышки, корональные выбросы массы и высокоскоростные потоки солнечного ветра. В большинстве случаев четко прослеживается связь между вариациями данных о солнечном излучении, измеренных с помощью искусственных спутников, и параметрами, относящимися к верхним слоям атмосферы Земли.

Опубликован ряд работ, в которых рассматривается влияние интенсивных солнечных вспышек на ионизацию верхней атмосферы, а также подтверждена связь между поведением критической частоты ионосферы f_0F2 и солнечными вспышками [1]. В ряде работ представлены результаты, относящиеся к анализу косвенного воздействия СМЕ на ионосферу [2]. Однако потенциальные корреляции между СМЕ и параметрами высокоскоростного потока солнечного ветра, а также реакция ионосферных характеристик на эти явления, не рассматривались.

В данной работе представлены результаты исследования влияния корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков солнечного ветра на характеристики ионосферы.

Используемые данные. Самый простой и распространенный метод изучения ионосферы – дистанционное зондирование ее серий коротковолновых импульсов. Тогда при вертикальном зондировании ионосферы самая высокая частота отражения слоя F2, критическая частота f_0F2 , может служить индикатором уровня ионизированных частиц.

Другим наземным методом измерения параметров ионосферной плазмы является наклонное зондирование ионосферы – метод, который предоставляет в реальном времени данные о высокочастотном ионосферном распространении радиоволн. Поскольку распространение радиосигнала происходит не по вертикали, а по поверхности на наклонных трассах, это расширяет диапазон используемых частот. Максимальная частота, которая все еще может отражаться от ионосферы на заданной высоте отражения, максимальная наблюдаемая частота для траекторий наклонного зондирования (МНЧ) определяется критической частотой ионосферного слоя F2 в точке отражения (f_0F2) и геометрией трассы.

Данные критической частоты ионосферного слоя F2 (f_0F2 , в МГц) были получены в результате проведения регулярных экспериментов по вертикальному зондированию ионосферы в ионосферной и радиоастрономической обсерваториях НИРФИ вблизи Нижнего Новгорода в периоды высокой и низкой солнечной активности: Зименки (1980, 1985 и 1988), Васильсурск (2013–2017). На полигоне НИРФИ Васильсурск установлен усовершенствованный цифровой ионозонд (CADI) (www.sil.sk.ca), а рабочая программа регулярных наблюдений позволила получать ионограммы не реже одного раза в 15 мин. Выходная мощность ионозонда составляла 600 Вт, он работал в режиме импульсного кодирования с использованием 13-битного кода Баркера с усреднением по 4 принятым импульсам. Такой режим работы ионозонда позволяет получать качественные ионограммы даже в условиях сильного поглощения радиоволн в ионосфере. Точность определения критической частоты – менее 50 кГц.

Данные максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) для траекторий наклонного зондирования определялись с помощью ионозонда-пеленгатора с ЛЧМ сигналом на трассе ЛЧМ зондирования Кипр – Нижний Новгород. В этом эксперименте были использованы ЛЧМ передатчики, расположенные на Кипре (34.96°N, 34.08°E). Передатчик на Кипре работал в северном направлении с шириной луча антенны ~ 60°. Зондирование проводилось в диапазоне частот 8–30 МГц, скорость изменения частоты 100 кГц/с, период зондирования 5 мин. ЛЧМ сигнал получен в Нижнем Новгороде (56.1°N, 44.1°E) (полное описание эксперимента с использованием ЛЧМ станций приведено в [3]). Ионозонд-пеленгатор измеряет ключевые характеристики ионосферного канала одновременно в режиме реального времени во всем диапазоне частот передачи КВ радиосигналов во всех режимах распространения.

Метод анализа. Изучение влияния солнечной активности на состояние ионосферы можно упростить, если проанализировать характерные отклонения в поведении регулярной ионограммы в течение нескольких солнечных циклов. Поскольку отклонение от обычных значений параметров составляет процент от регистрируемых значений, требуется разработка точных методов измерения и анализа. В [4] был разработан метод исследования возмущений в ионосфере по данным вертикального зондирования, основанный на отклонении критической частоты ионосферного слоя F2 (Δf_0F2).

Для выяснения связи между характеристиками ионосферных возмущений и параметрами корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков солнечного ветра будет использован ионосферный индекс, основанный на отклонении первого порядка, рассчитанный по формуле:

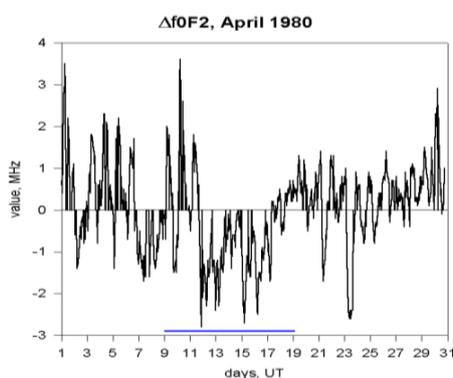
$$\Delta f_0F2_{jk} = f_0F2_{jk} - \overline{f_0F2_j}, \quad (1)$$

где f_0F2_{jk} – измеренное значение f_0F2 , j – номер точки в течение дня, k – номер дня в месяце, N – число дней в месяце, среднемесячное значение критической частоты

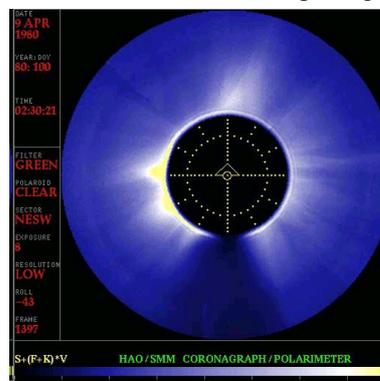
$$\overline{f_0F2_j} = \sum_{k=1}^N f_0F2_{jk} / N. \quad (2)$$

Аналогично рассчитывается Δ МНЧ – девиация максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ), полученной во время наклонного зондирования.

Проявление геоэффективности СМЕ в ионосфере. Отклонение критической частоты ионосферного слоя F2 (Δf_0F2) сравнивалось с информацией о регистрации корональных выбросов массы по Каталогам Solar Maximum Mission (SMM) и коронографа LASCO/C2 в перекрывающиеся периоды наблюдений (<https://www2.hao.ucar.edu/mlso/solar-maximum-mission/smm-cme-catalog> и https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).



а)



б)

Рисунок 1.

Оценка поведения отклонения критической частоты слоя F2 показывает, что обнаруживается отрицательное отклонение критической частоты после событий СМЕ (см. рис. 1).

На рисунке 1а мы видим отклик ионосферы на появление коронального выброса (рис. 1б) – временную зависимость, которая позволяет оценить время прихода возмущений. Здесь синей линией

отмечено характерное время проявления СМЕ в характеристике ионосферы – критической частоте слоя F2.

Подробный анализ временного поведения Δf_0F2 указывает на то, что после начала СМЕ (Loop/Cavity) прослеживается продолжительное снижение значений Δf_0F2 (рис. 2) и никаких изменений не наблюдается после обнаружения других типов выбросов (рис. 3).

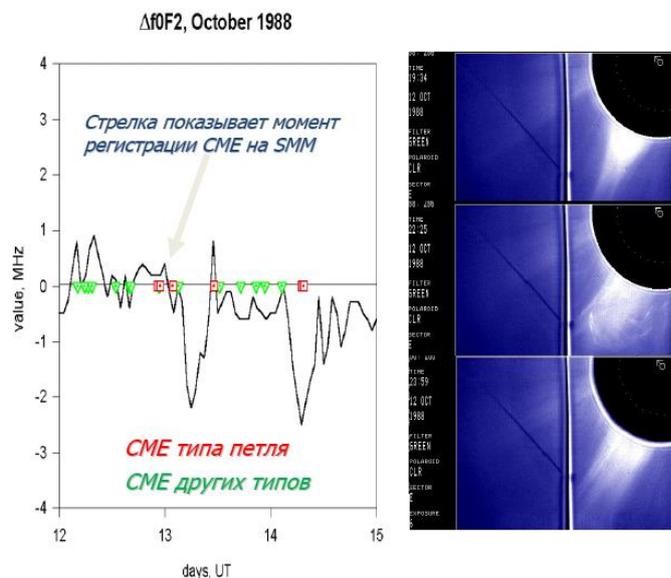


Рисунок 2.

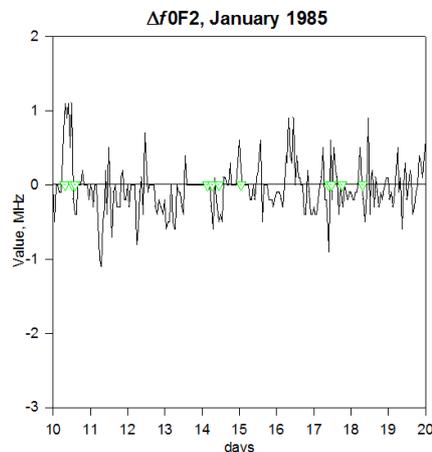


Рисунок 3.

Обнаруженный эффект был подтвержден наблюдениями в течение текущего солнечного цикла с использованием данных критической частоты f_0F2 , определенных из однородных ионограмм, полученных с помощью современного цифрового ионозонда CADI и данных LASCO/C2 (2013–2017) (SOHO LASCO CME CATALOG) (рис. 4–5).

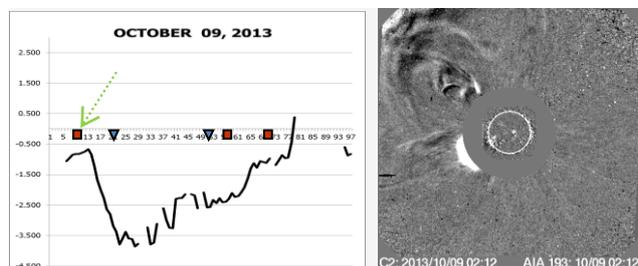


Рисунок 4.

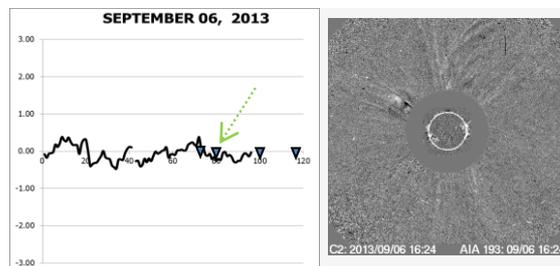


Рисунок 5.

Очевидно, что основными параметрами эффективности СМЕ должны быть ширина угла СМЕ в момент отрыва СМЕ от Солнца (как фактор распространения к орбите Земли), масса (m) и скорость (V). В работе [5] показано, что величина ионосферных возмущений (Δf_0F2) зависит от величины скорости СМЕ: амплитуда отклонения мала как для очень высокой ($V > 800$ км/с), так и для низкой ($V < 100$ км/с) скорости СМЕ, наибольшие амплитуды отклонения наблюдаются для СМЕ со скоростями от 100 до 700 км/с.

Проявление геоэффективности высокоскоростных потоков солнечного ветра в ионосфере

Особый интерес представляет анализ реакции ионосферы на высокоскоростные потоки солнечного ветра (HSS), поскольку есть сведения, что ионосферные бури, связанные с HSS, сопоставимы и иногда превосходят бури, связанные с СМЕ.

Анализ отклонений частоты f_0F2 и МНЧ и характеристик солнечной активности, зарегистрированных в передней точке либрации (L1), где расположен спутник ACE, может выявить наличие корреляций между параметрами высокоскоростных потоков солнечного ветра, например, скоростью, и откликом ионосферы.

На рисунке 6 приведены параметры околоземного космического пространства, измеренные на геостационарных спутниках GOES (поток рентгеновских лучей, поток протонов), данные о скорости протонов солнечного ветра со спутника ACE RTSW и данные наклонного зондирования ионосферы на трассе Кипр–Нижегород за ноябрь 2016 г. Обычно сравнение поведения Δ МНЧ с измеренными параметрами околоземного пространства (Proton Flux, X-ray), показывает хорошую взаимную корреляцию в большинстве случаев. Но иногда можно увидеть, что изменения в поведении Δ МНЧ лишь частично коррелируют с поведением характеристик околоземного космического пространства, измеренными на

спутниках GOES (см. рис. 6). Совместный анализ $\Delta MНЧ$ с данными о скорости протонов солнечного ветра со спутника ACE RTSW демонстрирует потенциальную роль высокоскоростного солнечного ветра в изменениях параметров ионосферы: уменьшение мгновенного $\Delta MНЧ$ на несколько МГц (синий цвет) может быть следствием высокоскоростного потока солнечного ветра 14–26 ноября 2016 г.

На рисунке 7 показаны параметры околоземного космического пространства, измеренные на геостационарных спутниках GOES (поток рентгеновских лучей, поток протонов), данные о скорости протонов солнечного ветра со спутника ACE RTSW и данные вертикального зондирования ионосферы, полученные на ионосферной станции Васильсурск в мае 2017 г. Горизонтальная ось в обоих рисунках – дни месяца; вертикальная ось для Δf_0F2 и $\Delta MНЧ$ – время суток. На верхней панели рисунка 7 наблюдаются отрицательные отклонения девиации частоты f_0F2 после дней высокоскоростного солнечного ветра.

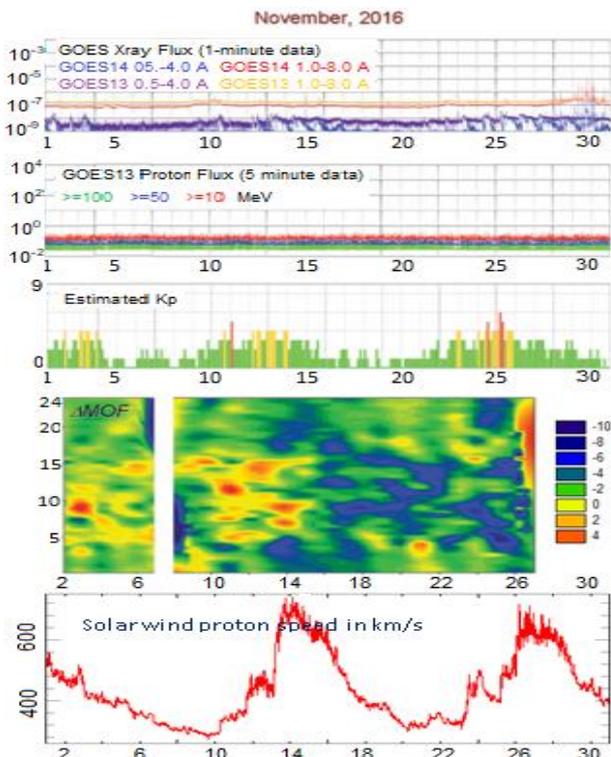


Рисунок 6.

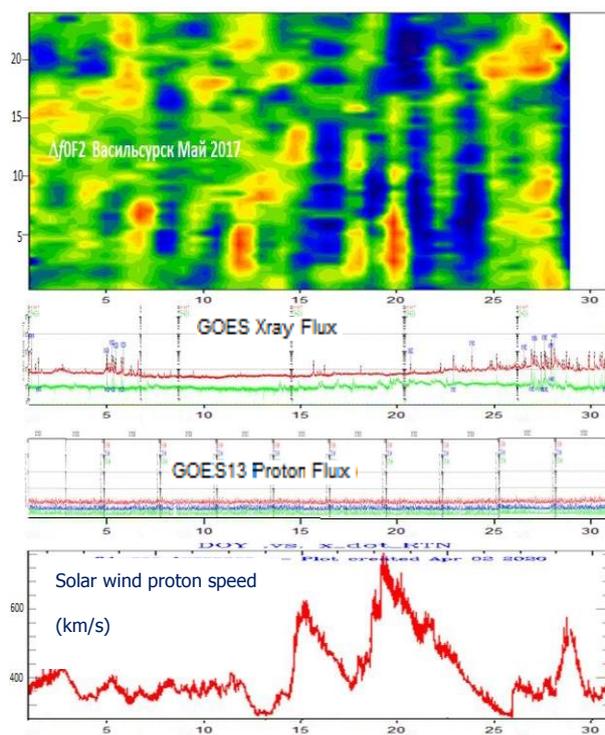


Рисунок 7.

Выводы. Отклик ионосферы на мощные явления солнечной активности (СМЕ и высокоскоростные потоки солнечного ветра) подтвержден с использованием результатов наземных измерений параметров ионосферной плазмы с помощью наклонного и вертикального зондирования ионосферы. Наблюдается продолжительное снижение значений Δf_0F2 после начала СМЕ (типа петля), тогда как после обнаружения других типов СМЕ значительных изменений не наблюдается. Ионосферные возмущения (Δf_0F2) зависят от величины скорости СМЕ: большие амплитуды отклонений наблюдаются для СМЕ с $100 < V < 700$ км/с, а СМЕ с очень высокой и низкой скоростью оказывают меньшее влияние. Реакция ионосферы на высокоскоростные потоки солнечного ветра сложна и неоднозначна. Показано, что уменьшение (увеличение) на несколько МГц мгновенных значений Δf_0F2 или $\Delta MНЧ$ может быть связано с последствием высокоскоростных потоков солнечного ветра.

Благодарности. Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057.

Список литературы

1. Hanaise C., Cerisier J.C., Auchère F. et al. From the Sun to the Earth: impact of the 27-28 May 2003 solar proton events on the magnetosphere, ionosphere and thermosphere // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P.129-151.
2. Fujiwara H., Nozawa S., Ogawa Y. et al. Extreme ion heating in the dayside ionosphere in response to the arrival of a Coronal Mass Ejection on 12 March 2012 // Ann. Geophys. 2014. V. 32. P. 831-839.
3. Uryadov V.P., Vybornov F.I., Kolchev A.A. et al. Impact of heliogeophysical disturbances on ionospheric HF channels // Adv. Space Res. 2018. V. 61. P.1837-1849.
4. Sheiner O.A., Fridman V.M., Krupenya N.D. et al. Effect of solar activity on the Earth' environment // Second Solar Cycle and Space Weather / ed. Huguette Sawaya-Lacoste. Proc. Euroconference ESA SP-477. 2002. P.479-481.
5. Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F. New ionospheric index for Space Weather service // Adv. Space Res. 2020. V. 66, N 6. P.1415-1426.