



УДК 551.510.535+537.877

Выборнов Федор Иванович¹, зав. кафедрой Физики,
e-mail: kaf_phys@vsuwt.ru

Шейнер Ольга Александровна², ведущий научный сотрудник
e-mail: rfj@nirfi.unn.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

²Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ИОНОСФЕРНЫЙ КАНАЛ СВЯЗИ В КВ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Аннотация. В данной статье приводится анализ степени влияния солнечных корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков солнечного ветра на ионосферный канал связи в КВ диапазоне длин волн по наблюдениям ионосферы с использованием вертикального и наклонного зондирования.

Ключевые слова: радиосвязь, КВ диапазон длин волн, распространение радиоволн, ионосфера, ионосферные возмущения, Солнце, корональные выбросы массы, солнечный ветер.

Введение:

Известно, что коротковолновое (КВ) радиоизлучение – важный метод связи, который не требует дополнительных устройств, систем для передачи информации на далекие расстояния [1]. Этот канал связи активно используется самолетами, морскими и речными судами, для оказания помощи при бедствиях. КВ-радиосвязь особенно привлекательна как резервное или аварийное средство связи. Даже в современную эпоху космических ретрансляторов и широко распространенного Интернета связь в КВ диапазоне длин волн остается ключевой технологией для дальней связи. В то же время, коротковолновая связь с помощью ионосферного канала во многом зависит от физических свойств канала связи – ионосферы [2, 3]. Самый верхний из ионизированных слоёв ионосферы, слой F2, наиболее важен с точки зрения распространения пространственных волн КВ диапазона, состояние его зависит от многих факторов как естественного, так и антропогенного характера. В частности, электронная концентрация слоя F2 больше, чем нижележащих слоев, зависит от мгновенных изменений солнечной активности [4]. Во время рентгеновских вспышек на Солнце может внезапно увеличиваться ионосферное поглощение, изменяя свойства отражения радиоволн: в годы высокой солнечной активности, все КВ радиоволны, достигающие дневной ионосферы, поглощаются [5, 6]. В последние годы большое внимание уделяется исследованиям геоэффективности наиболее мощных солнечных явлений, возникающих на Солнце и проявляющихся в солнечном ветре: корональным выбросам массы (СМЕ) и потокам высокоскоростного солнечного ветра (HSS),



характеризующимся мощным излучением в широком диапазоне электромагнитных волн, образованием ускоренных заряженных частиц, образованием ударных волн в межпланетном пространстве [7, 8].

Для иллюстрации влияния солнечных корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков солнечного ветра на характеристики ионосферных возмущений будем опираться на данные наблюдений параметров ионосферы в сентябре 2017 г. В [9] проведен анализ качества КВ радиосвязи в период с 4 по 14 сентября 2017 г. по наблюдениям RBN и WSPRNet. Многочисленные солнечные вспышки класса X (6, 7 и 10 сентября), связанные с солнечной активной областью AR12673, вызвали нарушения наземной радиосвязи в диапазоне высоких частот (3–30 МГц).

Результаты:

В данной статье для анализа используются данные наклонного и вертикального зондирования ионосферы, полученные в сентябре 2017 г. Наблюдения проводились на трех субавроральных (Ловозеро-Васильсурск, Соданкюля-Васильсурск и Салехард-Васильсурск) и одной среднеширотной (Горьковская, Ленинградская область-Васильсурск) трассах. Данные вертикального зондирования ионосферы f_0F_2 получены из регулярных наблюдений в среднеширотной ионосферной и радиоастрономической обсерватории НИРФИ ННГУ «Васильсурск» (56.15° с.ш., 46.10° в.д., вблизи Нижнего Новгорода). Схематически сеть трасс наклонного зондирования и пункт вертикального зондирования представлены на Рисунке 1. Параметры пунктов приема-передачи приведены в Таблице 1.



Рисунок 1 – Карта с изображением пунктов приема-передачи

Таблица 1. Параметры пунктов приема-передачи

Трассы	Расстояние, км	Координаты передающих ЛЧМ-станций
Ловозеро-Васильсурск	1767	68.00°N , 35.02°E
Соданкюля-Васильсурск	1236	67.4°N , 26.6°E
Салехард-Васильсурск	1581	66.52°N , 66.37°E
Горьковская – Васильсурск	1500	60.27°N , 29.38°E

Будет использован предложенный в [10] новый ионосферный индекс, основанный на отклонении первого порядка: а) критической частоты ионосферного слоя F2 (f_0F_2), измеренной с помощью вертикального зондирования ионосферы, и б) максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ), полученной во время наклонного зондирования.

Девияция f_0F_2 в каждый момент регистрации ионограммы определяется как $\Delta f_0F_2_{jk} = f_0F_2_{jk} - \overline{f_0F_2_j}$, где $\overline{f_0F_2_j} = \sum_{k=1}^N f_0F_2_{jk} / N$, $f_0F_2_{jk}$ – измеренное значение, j – номер точки в течение дня, k – номер дня в месяце, N – число дней в месяце. Аналогичная процедура используется для определения $\Delta\text{МНЧ}$.

На Рисунке 2 приведены результаты совместного анализа ионосферных индексов Δf_0F_2 и $\Delta\text{МНЧ}$ (5 нижних панелей), скорости протонов солнечного ветра (сиреневая кривая) и регистрации СМЕ (цветные отрезки) – верхняя панель – за сентябрь 2017 г.



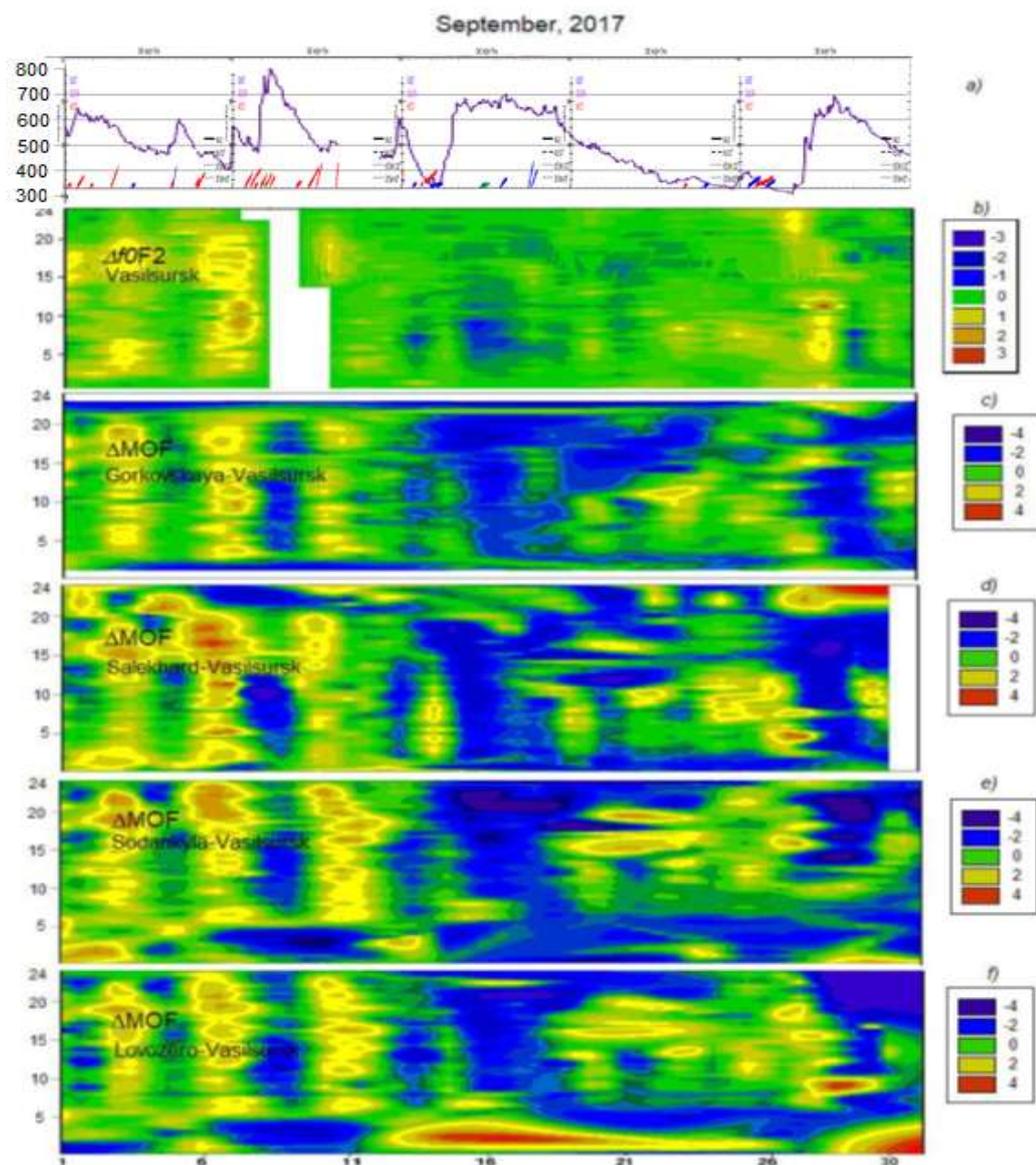


Рисунок 2 – Результаты совместного анализа, горизонтальная ось – дни месяца; левая вертикальная ось: время суток (UT) для ионосферных индексов, скорость HSS на верхней панели.

Наблюдаемое 8 сентября сильное уменьшение ΔMUF является реакцией на приход СМЕ, связанных с мощными вспышками класса X, распространяющихся от Солнца 6 сентября (гало) и/или 7 сентября (красные отрезки), и HSS с высокой скоростью – до 800 км/с. Самый интересный временной интервал 12–30 сентября: отсутствие регистрации вспышечной активности в рентгеновских лучах. В то же время, на всех трассах и в пункте вертикального зондирования наблюдается сильное уменьшение на несколько МГц мгновенных значений ΔMOF и $\Delta fOF2$ во время прохождения HSS со скоростью около 700 км/с. Свой вклад в уменьшение ΔMOF и $\Delta fOF2$ 16 сентября внесли и СМЕ, выброшенные из Солнца 10 сентября (гало) или 12 сентября (другие типы). Резкое уменьшение ΔMOF и $\Delta fOF2$ на всех трассах 28,29 сентября также связано с влиянием корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков солнечного ветра на ионосферный канал связи.

Работа выполнялась в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 0729-2020-0057.

Список литературы:

1. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. – Москва: Наука, 1984. – 392 с.
2. Березин Ю.В., Вылегжанин И.С. Декаметровые ионосферные линии радиосвязи с высокой пропускной способностью // Журнал радиоэлектроники. – 2004. – № 5.
3. Выборнов Ф.И., Дудина А.В., Малышева А.В. Влияние гелио и геофизических возмущений на среднеширотную ионосферу. // Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек: Труды международного научно-промышленного форума. ВГБОУ ВО «ННГАСУ», ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2017. – С. 126.
4. Bhawre P., Kishore K., Dogra S.K., Purohit P.K., Waheed M.A., Khatarkar P., Atulkar R. Characteristic of Ionospheric f_0F_2 and Solar Indices during the 23rd Solar Cycle over High Latitude Station, Syowa, Antarctica // American Journal of Climate Change. – 2015. – Vol. 4. – № 5. – P.408-416.
5. Куницын В.Е., Назаренко М.О., Нестеров И.А., Падохин А.М. Влияние солнечных вспышек на ионизацию верхней атмосферы. Анализ ряда значительных событий 23-го и 24-го солнечных циклов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 2015. – № 4. – С.95-101.
6. Contreira D.B., Rodrigues F.S., Makita K., Brum C.G.M., Gonzalez W., Trivedi N.B., da Silva M.R., Schuch N.J. An experiment to study solar flare effects on radio-communication signals // Advances in Space Research. – 2005. – Vol. 36 – P. 2455–2459.
7. Fujiwara H., Nozawa S., Ogawa Y., Kataoka R., Miyoshi Y., Jin H., Shinagawa H. Extreme ion heating in the dayside ionosphere in response to the arrival of a Coronal Mass Ejection on 12 March 2012 // Ann. Geophys. – 2014. – Vol. 32. – № 7. – P. 831-839.
8. Grandin M., Aikio A.T., Kozlovsky A. Properties and geoeffectiveness of solar wind high-speed streams and stream interaction regions during solar cycles 23 and 24 // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2019. – Vol. 124 – № 6. – P.3871–3892.
9. Frissell, N. A., Vega, J. S., Markowitz, E., Gerrard, A. J., Engelke, W. D., Erickson, P. J., et al. High-frequency communications response to solar activity in September 2017 as observed by amateur radio networks. // Space Weather. – 2019. – Vol. 17. – P.118–132.
10. Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F. New ionospheric index for Space Weather service // Advances in Space Research. – 2020. – Vol. 66. – № 6. – P.1415-1426.

CORONAL MASS EJECTIONS AND HIGH-SPEED SOLAR WIND STREAMS EFFECT ON HF IONOSPHERIC COMMUNICATION CHANNEL

Fedor I. Vybornov, Olga A. Sheiner

Abstract. This article analyzes the degree of influence of solar coronal mass ejections and high-speed solar wind streams on the ionospheric communication channel in the HF wavelength range based on observations of the ionosphere using vertical and oblique sounding.

Keywords: radio communications, HF wavelength range, radio wave propagation, ionosphere, ionospheric disturbances, the Sun, coronal mass ejections, solar wind.

