

УДК 550.388.2

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КОРОТКОВОЛНОВОЙ СВЯЗИ В ПЕРИОДЫ ВЫСОКОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Шейнер Ольга Александровна¹, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: rfj@nirfi.unn.ru

Выборнов Федор Иванович^{1,2}, доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой физики
e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

¹ НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Проводятся результаты анализа данных станций вертикального зондирования ионосферы в периоды высокой геомагнитной активности 2001 и 2024 гг. Показано, что взаимодействие нескольких последовательных корональных выбросов массы разных типов приводит к чрезвычайно сильным ионосферным возмущениям, влияющих на работу КВ-связи.

Ключевые слова: корональные выбросы массы (КВМ), магнитная буря, ионосфера, коротковолновая связь.

FEATURES OF THE OPERATION OF SHORTWAVE COMMUNICATIONS DURING PERIODS OF HIGH GEOMAGNETIC ACTIVITY

Olga A. Sheyner¹, Leading Researcher, Doctor of Physical and Mathematical Sciences
e-mail: rfj@nirfi.unn.ru

Fedor I. Vybornov^{1,2}, Head of the Physics Department, Doctor of Physical and Mathematical Sciences
e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

¹ Radiophysical Research Institute of Nizhny Novgorod Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia

² Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The results of the analysis of data from vertical ionospheric sounding stations during periods of high geomagnetic activity in 2001 and 2024 are presented. It is shown that the interaction of several successive coronal mass ejections of different types leads to extremely strong ionospheric disturbances affecting the operation of HF communications.

Keywords: CMEs, magnetic storm, ionosphere, shortwave communication.

Введение

Известно, что коротковолновая связь относится к методу связи, который использует ионосферное отражение для передачи информации. Её главная особенность — способность передавать сигналы на огромные расстояния, являясь важным средством дальнего радиосообщения, особенно на высокоширотных, морских трассах, включая трассы берег–судно в северных морях России.

Во время магнитной бури усиливается высыпание частиц и возрастает ионосферное поглощение, особенно в области F-слоя, поэтому рабочие частоты могут перестать обеспечивать связь. В периоды высокой геомагнитной активности коротковолновая связь обычно становится менее стабильной. И состояние ионосферы – важный фактор оценки.

Источниками возмущений в ионосфере являются различные явления солнечной активности: солнечные вспышки, корональные выбросы массы и высокоскоростные потоки солнечного ветра. В последние годы особое внимание посвящено таким нерегулярным мощным явлениям, как корональные выбросы массы (КВМ) и высокоскоростные потоки солнечного ветра (HSS), которые вызывают магнитные бури и сильные возмущения в ионосфере Земли, влияющие на параметры дальней коротковолновой (КВ) связи, приводящие к сбоям в работе спутниковых группировок, навигационных систем и даже электроэнергетических систем.

При распространении корональных выбросов массы в межпланетном пространстве может произойти поглощение одного выброса другим. Это – так называемый «каннибализм» корональных выбросов массы, когда быстрый выброс догоняет медленный в короне или в межпланетном пространстве, их структуры сталкиваются и сливаются в один. Исследования показывают: самые мощные события и ряд сильных бурь сопровождались именно взаимодействием нескольких последовательных КВМ, а не одним изолированным событием.

Приведем примеры реакции ионосферы на некоторые явления «каннибализма» корональных выбросов массы, зарегистрированные в 2001 и 2004 гг.

Данные и метод

В качестве параметров ионосферы рассматривается поведение во времени критической частоты f_0 слоя F_2 ионосферы, используя предложенный авторами ранее ионосферный индекс [1].

Как было показано в [1], для повышения точности предпочтительно анализировать поведение во времени величин отклонения измеренных значений частот от их средних значений по предложенной методике для исследования возмущений критической частоты ионосферного слоя F_2 ($\Delta f_0 F_2$).

При регулярных наблюдениях обеспечивается непрерывная временная запись критических частот в течение дня. Каждое измеренное значение отмечается как f_{0jk} , где j – номер точки в течение дня, k – номер дня в месяце. Отклонения критических частот ионосферы рассчитываются как $\Delta f_{0jk} = f_{0jk} - \overline{f_{0j}}$, где

$$\overline{f_{0j}} = \sum_{k=1}^N f_{0jk} / N, \quad (1)$$

N – количество дней в месяце.

Дифференциальный параметр, предлагаемый нами для исследования ионосферы, позволяет устранить стационарные зависимости, а используемая цветовая гамма – проиллюстрировать чувствительность определения девиации $\Delta f_0 F_2$.



Результаты для 09 -10.04.2001 г.

Событие типа Гало 9 апреля 2001 г. с $V_1=1192$ км/с (КВМ1) впервые было зафиксировано в 15:54 UT в виде яркого широкого фронта на юге и юго-западе. Событие 10 апреля 2001 г. с $V_2=2411$ км/с тоже типа Гало (КВМ2) впервые было зафиксировано в 05:30 UT, при этом над Южным полюсом появился большой петлеобразный фронт с ярким ядром.

КВМ2 догоняет КВМ1 и происходит слияние за счёт разности скоростей: фронт ударной волны и магнитное облако быстрого КВМ врезаются в более медленный, сжимая и переформируя его магнитные структуры и плазму. Их воздействие на магнитосферу вызывает геомагнитную бурю и перестройку электронной структуры ионосферы, особенно в области слоя F2. Для подтверждения рассмотрим данные вертикального зондирования ионосферы на станциях Juliusruh (54.6 N, 13.4 E) и Rome (41.9 N, 12.5 E), которые представлены в виде частотно-временной диаграммы (рис. 1).

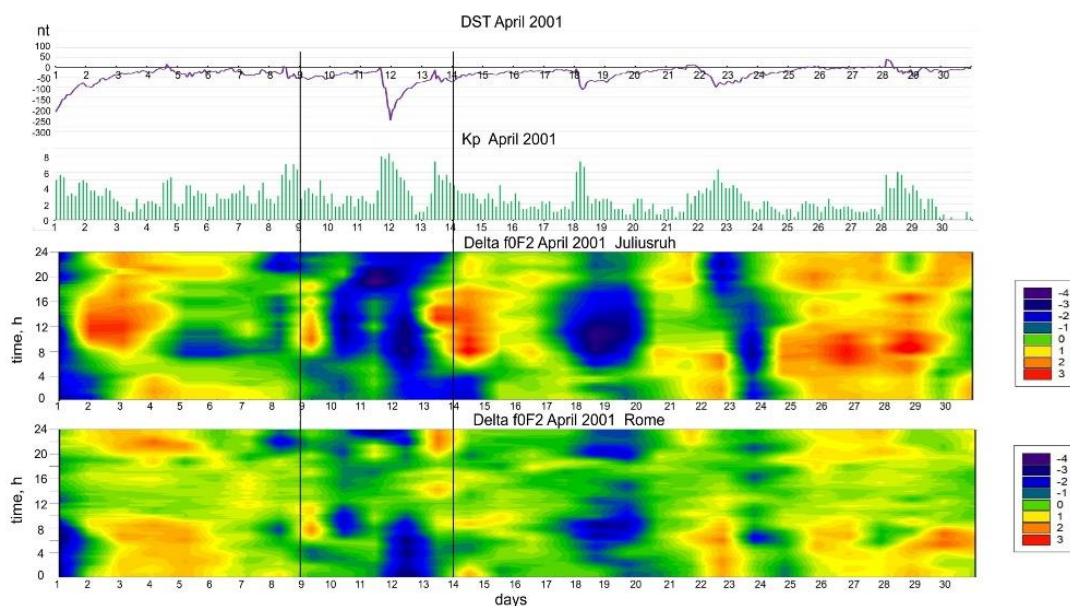


Рисунок 1 – Частотно-временная диаграмма вертикального зондирования ионосферы на станциях Juliusruh и Rome для апреля 2001 г.

Вертикальными линиями обозначен интервал регистрации обоих КВМ и отклика ионосферы на них. Возмущения в ионосфере проявляются в виде резкого уменьшения величин Δf_0F_2 на обеих станциях, причем, на Juliusruh в большей степени. В ионосфере можно проследить и реакцию на каждый из взаимодействующих корональных выбросов.

Результаты для 10–13 мая 2024 г.

Май 2024 г. характеризовался чрезвычайно высокой солнечной и геомагнитной активностью в начале месяца: наблюдалось несколько мощных солнечных вспышек, корональных выбросов массы и геомагнитных бурь (рис.2).

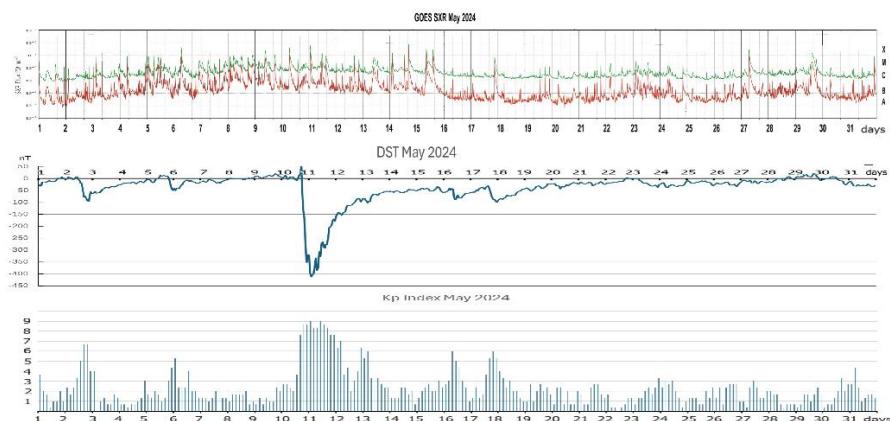


Рисунок 2 – Временной ход рентгеновского излучения, индексов Dst и Kp за май 2024г.

Редкий «каннибалистический» шторм был зарегистрирован 08-11.05 2024. Если предыдущее событие – это, когда один КВМ догоняет другой и происходит слияние, то в данном случае зарегистрировано несколько корональных выбросов массы, которые взаимодействуют группами.

Сначала первые четыре корональных выброса массы типа Гало (08.V.2024 в 05.36 UT; 08.V.2024 в 12.24 UT; 08.V.2024 в 22.24 UT и 09.V.2024 в 05.36 UT) накапливаются, взаимодействуют друг с другом по мере приближения к Земле и образуют первый сложный выброс. Потом формируется следующий сложный выброс от слияния следующих трех корональных выбросов массы типа Гало (09.V.2024 в 18.52 UT, 10.V.2024 в 07.12 UT и 11.V.2024 в 01.36 UT). Эти корональные выбросы массы и привели к сильному геомагнитному отклику, когда индекс Dst достиг -412 нТл.

Одновременная реакция ионосферы в слое F_2 прослеживается на основе анализа данных вертикального зондирования ионосферы, полученных на станциях, расположенных вдоль меридиана. Значительные уменьшения критических частот слоя F_2 наблюдались на всех используемых станциях на интервале 10–13 мая 2024 г. (рис.3).

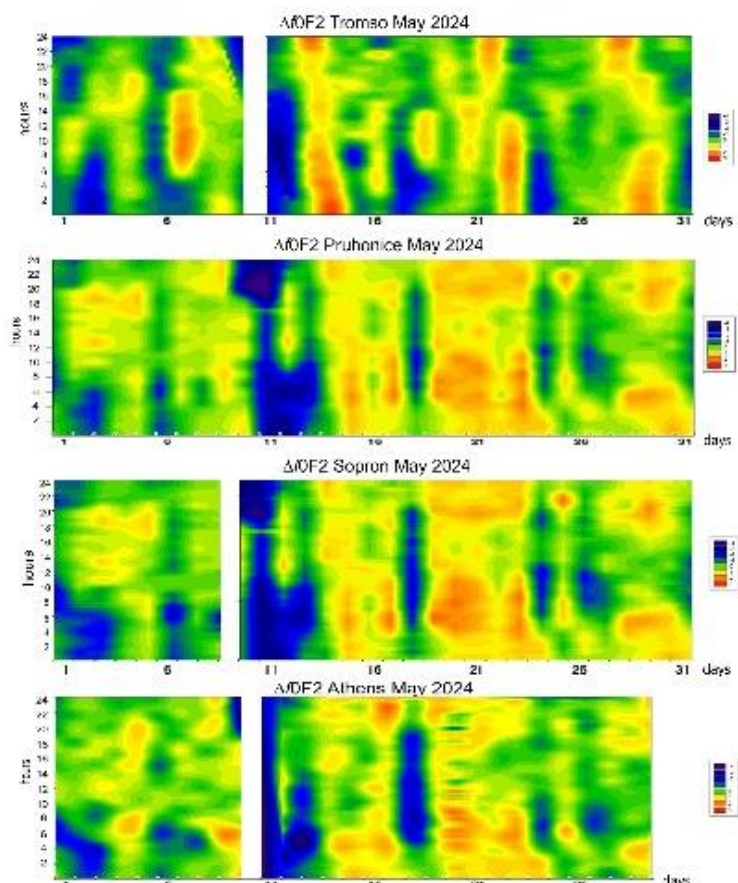


Рисунок 3 – Частотно-временная диаграмма данных вертикального зондирования ионосферы на станциях Tromsø, Pruhonice, Sopron и Athens 08-11 мая 2024 г.

Исходя из частотно-временной диаграммы данных вертикального зондирования (рис.3), отклик в ионосфере на каждый из сложных выбросов хорошо прослеживается. Для примера (см. рис.4) приведено сопоставление результатов обработки данных обсерваторий Vasilsursk и Juliusruh с зарегистрированными корональными выбросами, участвующими в процессе «каннибализма», отклики приведены овалами разных цветов.

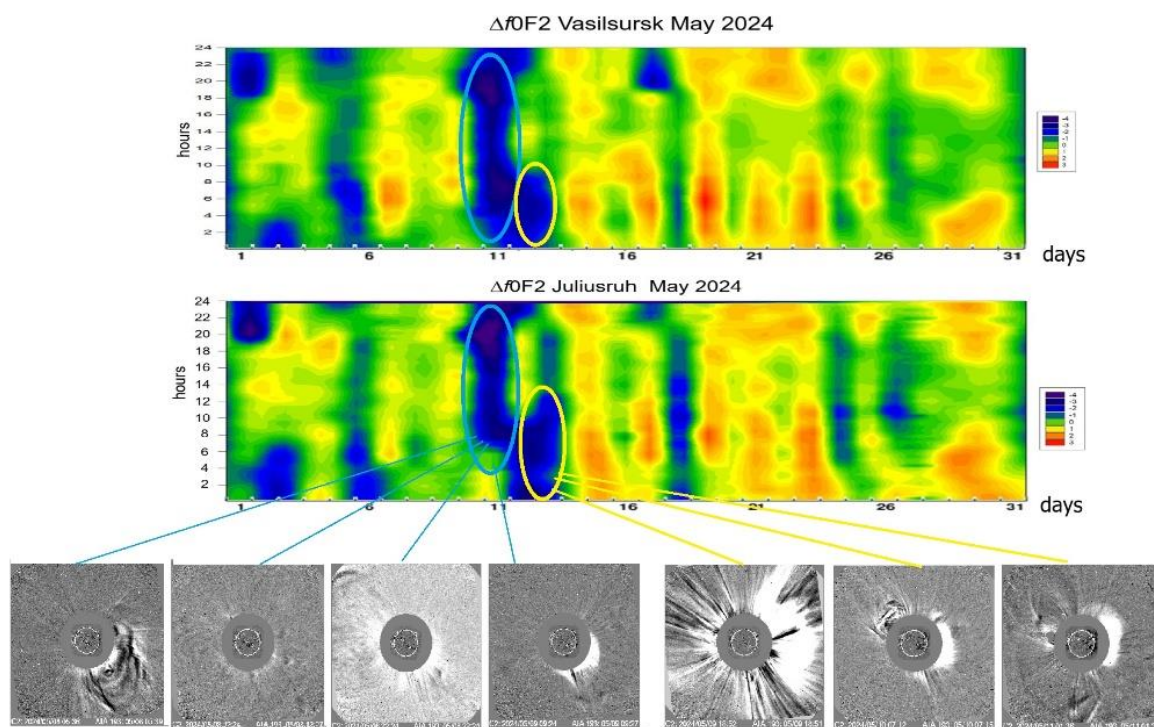


Рисунок 4 – Частотно-временная диаграмма данных вертикального зондирования ионосферы на станции Васильсурск и Juliusruh и разностные изображения солнечной короны, полученные в белом свете с помощью коронографа LASCO/C2, для мая 2024 года

Поскольку корональные выбросы массы, создающие сложные выбросы, распространяются из одной и той же активной области через небольшие временные интервалы, каждый из КВМ не успевает отразиться в ионосфере – проявляются уже объединённые структуры.

Заключение

Приведенные примеры взаимодействующих корональных выбросов массы в апреле 2001 г. и мае 2024 г. показывают, что они сопровождаются сильными геомагнитными бурями.

На основании анализа данных вертикального зондирования ионосферы (Δf_0F_2), полученных из регулярных наблюдений на нескольких мировых станциях в 2001 и 2024 гг., показано: взаимодействие нескольких последовательных корональных выбросов разных типов проявляется в сильных негативных ионосферных возмущениях.

Таким образом, высокая геомагнитная активность приводит к существенной перестройке ионосферы и делает коротковолновый радиоканал резко нестационарным.

Работа выполнена в рамках Государственного задания, проект FSWR-2026-0011

Список литературы:

1. Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F. Adv.Sp.Res. 2020. Vol. 66, № 6. P. 1415.