

УДК 550.388.2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЙ ГЕЛИОГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ КАНАЛОВ КОРОТКОВОЛНОВОЙ СВЯЗИ

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

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

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

² НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В докладе рассмотрен отклик ионосферы на трассе Кипр – Нижний Новгород на серию корональных выбросов массы (КВМ), зарегистрированных в мае 2024 года и вызвавших чрезвычайно сильную магнитную бурю. Приводятся схема эксперимента и результаты анализа полученных ионосферных данных.

Ключевые слова: корональные выбросы массы (КВМ), магнитная буря, ионосфера, коротковолновый канал связи.

RESULTS OF A STUDY OF THE INFLUENCE OF HIGH HELIOGEOMAGNETIC ACTIVITY ON THE PARAMETERS OF HF COMMUNICATION CHANNELS

Fedor I. Vybornov^{1,2}, Head of the Physics Department, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

Olga A. Sheyner², Leading Researcher, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

e-mail: rfj@nirfi.unn.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

² Radiophysical Research Institute of Nizhny Novgorod Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This report examines the ionospheric response along the Cyprus-Nizhny Novgorod route to a series of coronal mass ejections (CMEs) recorded in May 2024, which triggered an extremely strong magnetic storm. The experimental design and analysis of the obtained ionospheric data are presented.

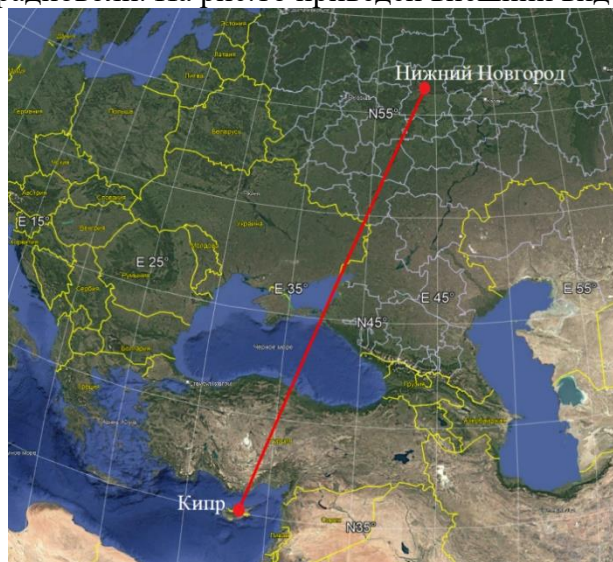
Keywords: CMEs, magnetic storm, ionosphere, HF communication channel.

Введение

В настоящее время для передачи информации на большие расстояния, как правило, используются скоростные спутниковые системы связи. Они заменили коротковолновые (КВ) линии связи, позволили обеспечить надежной радиосвязью наземный, авиационный и морской транспорт. Тем не менее, коротковолновая связь продолжает использоваться, играя роль резервного канала связи, а в чрезвычайных условиях часто оказывается единственным способом передачи необходимой информации. У аппаратуры КВ-связи есть ряд достоинств, которых лишены скоростные спутниковые системы связи: низкая стоимость, быстрая восстанавливаемость, дешевая эксплуатация и высокая надежность. Необходимо отметить, что надежность скоростных систем связи и КВ-связи одинаковая – 95%, а принципиально отличаются они скоростными характеристиками, но и применяются они для разных целей. Обычно, рассматривая особенности КВ-радиосвязи, отмечают, что ее параметры зависят от состояния ионосферы, которая в свою очередь зависит от солнечной активности. Активность Солнца – главный источник возмущений в ионосфере Земли. Корональные выбросы массы (КВМ) и высокоскоростные потоки солнечного ветра, приближаясь к Земле, вызывают магнитные бури и сильные возмущения ионосферы. Прогнозирование параметров КВ-связи для конкретных трасс распространения требует постоянного изучения Солнечно-Земных связей. Далее рассматривается влияние чрезвычайно высокой геомагнитной активности 8-14 мая 2024 года, вызванной корональными выбросами массы, на состояние среднеширотной трассы зондирования ионосферы Кипр – г. Нижний Новгород. В качестве параметров ионосферного канала рассматривается поведение во времени критических частот F, E и Es слоев ионосферы.

Геометрия эксперимента и геофизическая обстановка

Длина трассы Кипр – г. Нижний Новгород составляет 2492 км, а азимут из пункта передачи в пункт приема $\Psi=15^\circ$ (см. рис. 1а). Передатчики располагаются на острове Кипр и излучают линейно-частотно-модулированный сигнал каждые 5 минут в диапазоне от 8 до 33 МГц. Мощность излучения около 800 кВт позволяет принимать сигнал в любой точке земного шара, что очень хорошо для проведения исследований в области распространения радиоволн. На рис.1б приведен внешний вид ЛЧМ-станции.



а



б

Рисунок 1 – Геометрия эксперимента (а) и ЛЧМ-станция (б)

Геофизическая обстановка с 10 по 20 мая 2024 года представлена на рис. 2 по данным [1], где приведены значения скорости солнечного ветра V_{sw} (а – черная линия), давление потока солнечного ветра (а – красная линия), межпланетное магнитное поле B и его z -компонента B_z (б – черным цветом и красным соответственно), Dst индекс геомагнитной активности и индекс $SUM-H$, характеризующий интенсивность симметричного кольцевого тока в магнитосфере Земли (в – черным и красным цветами соответственно) и K_p – индекс геомагнитной активности (г), который по девяти бальной шкале отражает степень возмущенности магнитного поля Земли за каждые 3 часа.

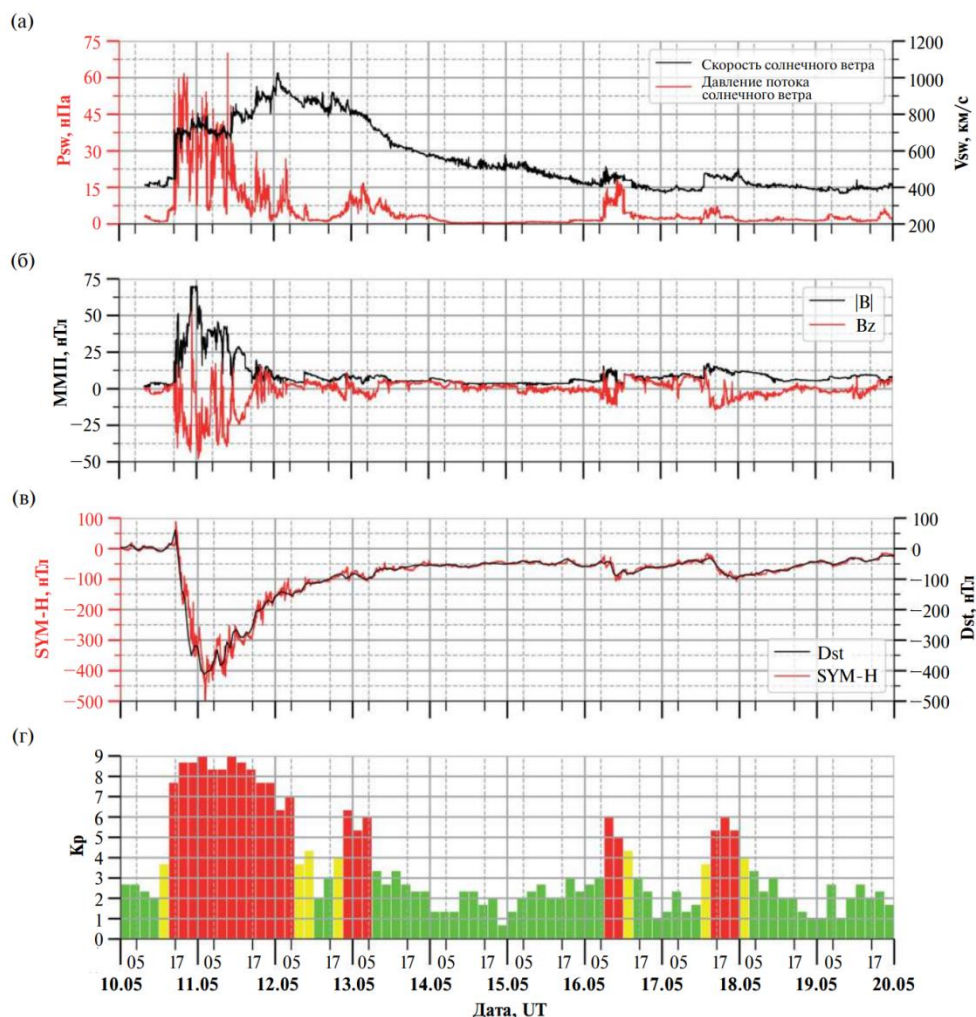


Рисунок 2 – Геофизическая обстановка с 10 по 20 мая 2024 года [1]

Магнитная буря началась 10 мая около 17 часов с возрастания индекса геомагнитной активности до 60 нТл, а затем резкого уменьшения 11 мая до -407 нТл. В это время K_p индекс достиг наибольшего возможного значения 9, что привело к резкому уменьшению критической частоты F-слоя ионосферы. Произошли изменения в структуре ионосферы, которые детально проанализированы в работе [1], а их причины подробно рассмотрены нами в работе [2]. Показано, что сначала первые четыре корональных выброса массы типа гало (08 мая в 05.36 UT; в 12.24 UT; в 22.24 UT и 09 мая в 05.36 UT) накапливаются и взаимодействуют друг с другом по мере приближения к Земле и образуют первый сложный выброс. А затем формируется следующий сложный выброс от слияния еще трех корональных выбросов массы типа гало (09 мая в 18.52 UT, 10 мая в 07.12 UT и 11 мая в 01.36 UT). Вызванная ими геомагнитная буря с K_p индексом, равным 9, привела 11 мая 2024

г. к уменьшению критических частот F-слоя ионосферы в два раза относительно предыдущих значений. На рис. 3 приведены примеры дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) ионосферы для 10 и 11 мая 2024 г. в разное время суток; точное время в UTC и координаты приемной и передающих точек трассы приводятся вверху каждой ДЧХ.

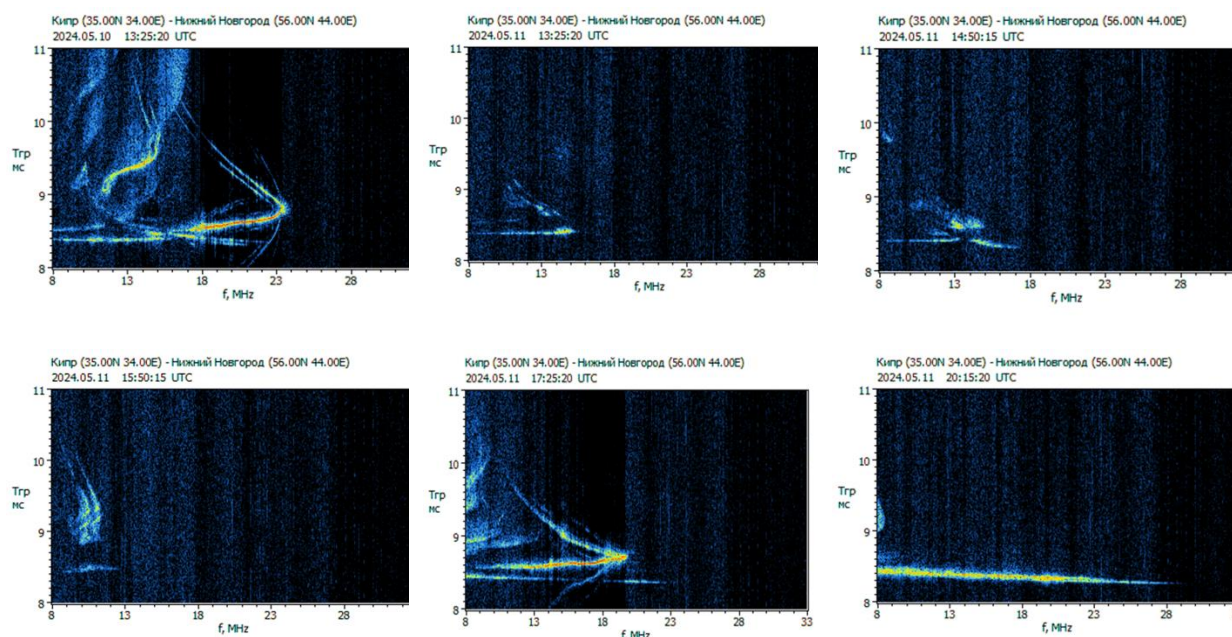


Рисунок 3 – ДЧХ ионосферы за 10 и 11 мая 2024 г.

На Рис. 4 приводятся результаты обработки всех ДЧХ для всех наблюдаемых слоев ионосферы с 8 по 14 мая 2024 г. и представлен временной ход максимально применимых частот для канала связи Кипр - г. Нижний Новгород (МПЧ F, МПЧ E и МПЧ Es соответственно синим, красным и зеленым цветами).

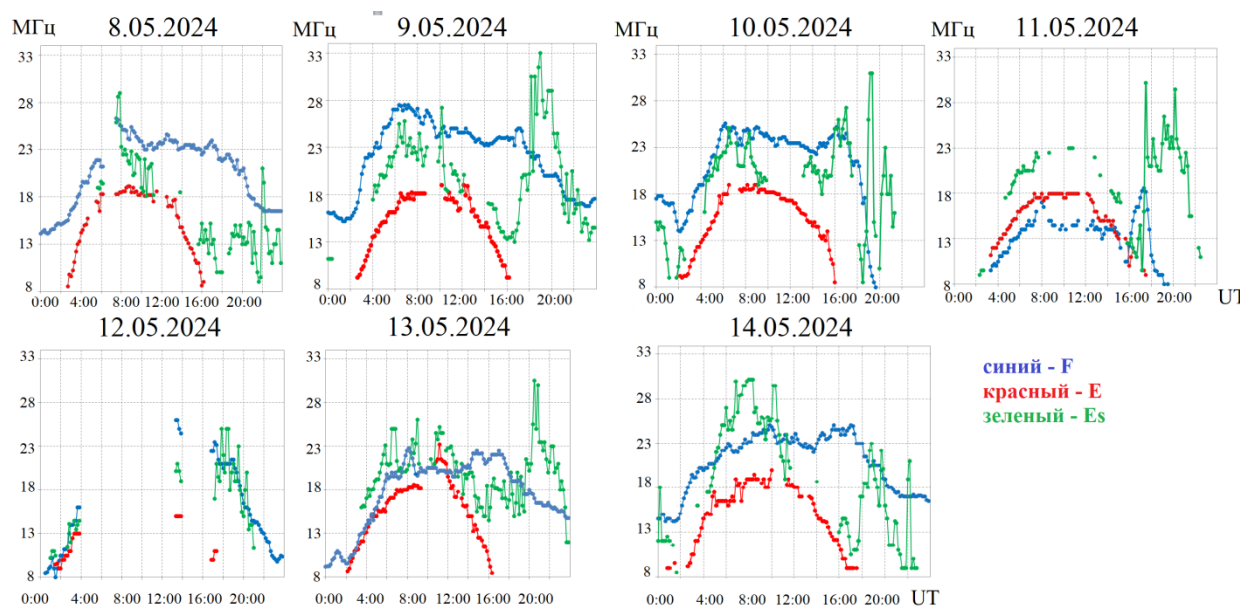


Рисунок 4 – Временной ход МПЧ для канала связи Кипр - г. Нижний Новгород

Отсутствие части данных 12 мая объясняется сбоем в работе приемной ЛЧМ-станции из-за потери сигнала GPS (вероятно, из-за сложной геомагнитной обстановки). 11 мая наблюдается резкое уменьшение МПЧ F почти в два раза, а ДЧХ (см. рис. 3) показывают сильное поглощение (отсутствуют кратные отражения) и уменьшение высот отражения для F-слоя ионосферы.

Ранее, в работе [3] уже рассматривалось поведение Es-слоя ионосферы во время высокой геомагнитной активности – на заключительной стадии развития магнитной бури резко возрастали его критические частоты. Раньше это явление наблюдалось для субполярных трасс распространения радиоволн и рекомендовалось во время высокой геомагнитной активности использовать Es-слой для КВ-связи, увеличивая рабочие частоты канала связи до 30-60 МГц. В нашем случае повышение рабочих частот до 20 МГц (см. рис. 3 для 11 мая) и использование Es-слоя ионосферы позволяет восстановить работоспособность КВ канала при деградации F-слоя ионосферы.

Заключение

Рассмотрен отклик ионосферы на трассе Кипр – Нижний Новгород на серию корональных выбросов массы (КВМ), зарегистрированных в мае 2024 года и вызвавших чрезвычайно сильную магнитную бурю ($K_p=9$). Приводятся схема эксперимента и результаты анализа полученных ионосферных данных. На заключительной стадии развития магнитной бури 11 мая 2024 г. наблюдалось сильная деградация F-слоя ионосферы и резкое возрастание МПЧ Es-слоя ионосферы. Предлагается использовать это явление для повышения надежности работы коротковолновой связи не только на приполярных трассах, но и на средних широтах.

*Работа Выборнова Ф.И. выполнена при поддержке Российского научного фонда
(проект №25-72-20019)*

*Работа Шейнер О.А. выполнена в рамках Государственного задания,
проект FSWR-2026-0011*

Список литературы:

1. Ясюкевич Ю. В., Васильев Р. В., Рубцов А. В. и др. Экстремальная магнитная буря 10-19 мая 2024 г.: взаимодействие нейтральной и заряженной компонент верхней атмосферы и воздействие на радиотехнические системы. // Доклады Академии Наук. Науки о Земле, 2025, т. 521, № 1, с. 123–135. DOI: 10.31857/S2686739725030161
2. Шейнер О.А., Выборнов Ф.И. Особенности работы коротковолновой связи в периоды высокой геомагнитной активности. – Сб. трудов конференции Транспорт. Горизонты развития [6, 2026]. Секция 3 (в печати).
3. Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. Вариации диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов на субавроральной трассе во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 2. С. 83–94.

