

УДК 550.388.2

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАБОТУ
СРЕДНЕШИРОТНЫХ КВ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

Выборнов Федор Иванович^{1,2}, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики

e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

Шейнер Ольга Александровна², доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: rji@nirfi.unn.ru

Колчев Алексей Анатольевич³, кандидат физико-математических наук, доцент

e-mail: AAKolchev@kpfu.ru

Зыков Евгений Юрьевич³, кандидат физико-математических наук, доцент

e-mail: Evgeniy.Zykov@kpfu.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

² Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ), Нижний Новгород, Россия

³ Казанский федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия

Аннотация. Приводятся результаты исследований ионосферы системой среднеширотных синхронно работающих ЛЧМ-станций наклонного и вертикального зондирования 12 сентября 2023 г., когда регистрировалась геомагнитная буря класса G1, сопровождающаяся увеличением индекса геомагнитной активности до значения 5+. Показано, что возможными причинами возникновения геомагнитной бури являлись корональный выброс массы на Солнце 11 сентября в 22:35 UT и последующее резкое увеличение скорости солнечного ветра от 340 до 450 км/с.

Ключевые слова: геомагнитные возмущения, коротковолновая (КВ) радиосвязь, транспорт, поглощение, рассеяние радиоволн, корональный выброс массы.

**INFLUENCE OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES ON THE OPERATION OF
MIDDLE-LATITUDE HF COMMUNICATION LINES**

Vybornov Fedor Ivanovich^{1,2}, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Head of the Department of Physics

e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

Sheiner Olga Aleksandrovna², Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Junior researcher

e-mail: rji@nirfi.unn.ru

Kolchev Alexey Anatolyevich³, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor

e-mail: AAKolchev@kpfu.ru

Zykov Evgeniy Yurievich³, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor

e-mail: Evgeniy.Zykov@kpfu.ru

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

² Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia

³ Kazan Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

Abstract. The results of studies of the ionosphere by a system of mid-latitude synchronously operating chirp oblique and vertical sounding stations on September 12, 2023, when a G1 class geomagnetic storm was recorded, accompanied by an increase in the geomagnetic activity index to a value of 5+, are presented. It is shown that the possible causes of the geomagnetic storm were a coronal mass ejection on the Sun on September 11 at 22:35 UT and a subsequent sharp increase in solar wind speed from 340 to 450 km/s.

Keywords: geomagnetic disturbances, shortwave (HF) radio communications, transport, absorption, scattering of radio waves, coronal mass ejection.

Введение

В ночь с 12 на 13 сентября 2023 г. на территории Нижегородской области наблюдались полярные сияния с ярко-выраженной зеленой компонентой, обусловленной свечением атомов кислорода на высотах ионосферы при взаимодействии их с энергичными частицами. С 15:00 часов (МСК) началась геомагнитная буря класса G1, сопровождающаяся увеличением индекса Kp до значения 5+. Появление полярных сияний на средних широтах является одним из возможных проявлений подобных геомагнитных возмущений.

В это время на средних широтах проводился комплексный эксперимент по исследованию ионосферы системой среднеширотных синхронно работающих ЛЧМ-станций наклонного зондирования, которые работали по специальной программе. В эксперименте были задействованы две ионосферные станции вертикального зондирования (CADI в Васильсурске и Циклон в Казани). Далее приводятся схема проведения эксперимента и первые полученные результаты.

Описание эксперимента и полученные результаты

Целью эксперимента было проведение измерений параметров естественно возмущенной ионосферы (перемещающихся ионосферных возмущений и диффузности F-слоя ионосферы) с высоким временным разрешением системой среднеширотных синхронно работающих ЛЧМ-станций на слабонаклонных трассах. Измерения проводились 12 сентября 2023 г. в г. Нижнем Новгороде, пгт Васильсурск, г. Казани и г. Йошкар-Оле. Схема взаимного расположения станций приведена на Рисунке 1, а в Таблице 1 приведены их координаты (R – приемные, T – передающие станции).

ЛЧМ ионозонды работали 12 сентября 2023 г. с 15:00 до 23:30 МСК, а 13 и 14 сентября с 17:30 до 20:00. Диапазон частот зондирования был 3 – 9 МГц. Перестройка частоты проводилась со скоростью 110 кГц/с. Станции включались на передачу последовательно каждую минуту. На прием ЛЧМ станции работали, когда не излучали.

На Рисунках 2 и 3 приведены индексы геомагнитной активности Kp [1] (для 11-13 сентября 2023 г., время московское) и DST [2] (для 12 и 13 сентября 2023 г., где синим цветом выделен интервал отрицательной фазы бури, который обсуждается далее).



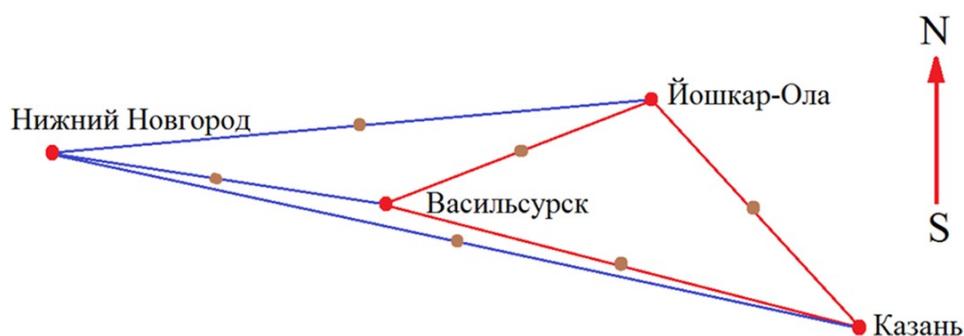


Рисунок 1 – Схема расположения ЛЧМ станций (красные точки). Средние точки трасс отмечены коричневыми точками

Таблица 1

Координаты ЛЧМ станций

№	Места расположений	Координаты
1	пгт. Васильсурск (R, T)	56,13° N; 46,08° E
2	г. Казань (R, T)	55,8° N; 49,12° E
3	г. Йошкар-Ола (R, T)	56,62° N; 47,87° E
4	г. Нижний Новгород (R)	56,32° N; 44,02° E

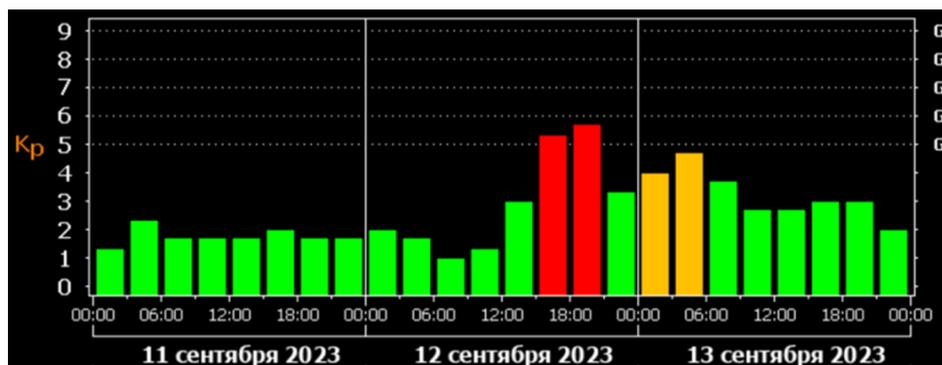


Рисунок 2 – Индекс Кр для 11-13 сентября 2023 г., время московское

12 сентября 2023 г. в 18:59 МСК на дистанционно-частотных характеристиках (ДЧХ) (см. Рисунок 4 для трассы Васильсурск – Нижний Новгород) появилась область рассеянного сигнала (задержка около 6 мс, диапазон частот 8 – 11 МГц). В 19:05 МСК область рассеяния сместилась до задержек 4 – 5 мс, а диапазон частот увеличился до 6 – 11 МГц. Далее до 19:17 МСК наблюдалось увеличение интенсивности рассеянного сигнала при непрерывном смещении области рассеяния до задержек 3,5 – 5 мс. За время с 19:23 до 19:29 МСК область рассеяния постепенно исчезла с уменьшением правой границы частотного диапазона.

На трассе Казань – Нижний Новгород похожий сигнал стал наблюдаться в 19:04 МСК с диапазоном задержек 4,5 – 8 мс в диапазоне 8 – 11 МГц. В 19:08 МСК дополнительный сигнал наблюдался только в области 11 МГц. На частоте вблизи 8 МГц рассеянный сигнал вновь стал наблюдаться в 19:20 МСК и регистрировался до 19:28 МСК.

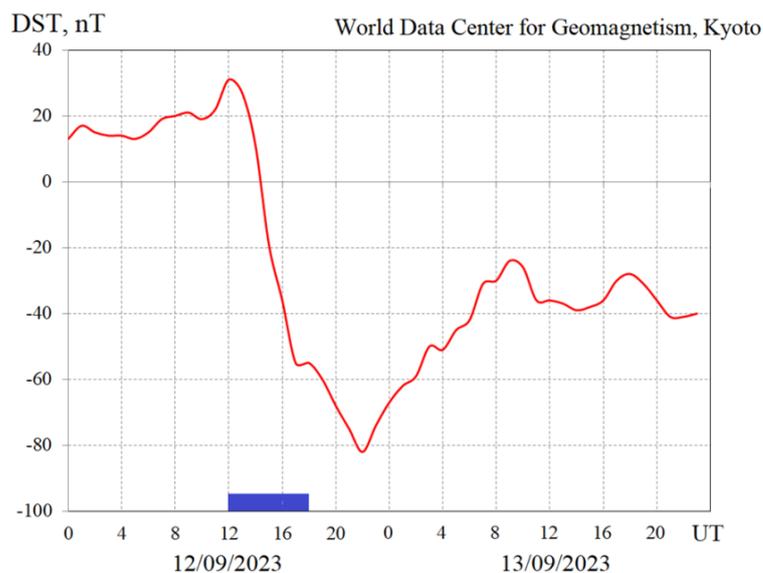


Рисунок 3 – Индекс DST для 12 и 13 сентября 2023 г.

Анализ результатов эксперимента

Зная координаты ЛЧМ станций и зарегистрированные временные задержки рассеянного сигнала были выполнены оценки высоты рассеяния ЛЧМ сигнала. Рассеяние наблюдалось от F-области ионосферы с высот 150 – 220 км. Структура диффузного сигнала позволяет предположить, что наблюдалось ракурсное рассеяние на сильно вытянутых ионосферных неоднородностях. Аналогичные эффекты ранее наблюдались во время сильной магнитной бури в 2015 году (см. подробнее [3]). Из-за разного удаления ЛЧМ-передатчиков от Нижнего Новгорода ракурсные условия выполнялись при разных углах. Это повлияло на интенсивность принимаемого сигнала и объясняет более позднее обнаружение ЛЧМ-сигнала из Казани. Область возмущения распространялась вдоль меридиана со скоростью примерно 2 м/с, а поперек – около 1 км/с и, судя по отсутствию ионосферной диффузности на первом скачке, не опустилась до наших широт. Дополнительный контроль ЛЧМ-сигналов передатчиков Васильсурска и Казани в Троицке (Московской области) показал, что область возмущения наблюдалась и там. Появление диффузности в F-слое ионосферы выше регулярного отражения по данным ионозонда вертикального зондирования CADI, расположенного в Васильсурске, подтверждает выводы, сделанные по данным сети ЛЧМ-станций. Выполненные измерения совпали с отрицательной фазой геомагнитной бури, которая повлияла на состояние среднеширотной ионосферы. Уменьшение критической частоты ионосферы и сильное поглощение (вплоть до отсутствия на ионограммах ВЗ отраженных сигналов) не позволило далее проводить эксперимент (см. Рисунок 5). Геомагнитная буря оказала негативное влияние на канал КВ связи из-за появившейся сильной диффузности (см. Рисунки 4 и 5).

Солнечная активность

10 сентября 2023 года активность Солнца была низкая, геоэффективных событий не отмечалось.

11 сентября Солнечная активность возросла до умеренного уровня благодаря трем вспышкам типа M и 8 вспышкам типа C.

Вспышка M1.3 из активной области AR3429 в 01:08 UT вызвала корональный выброс массы (CME) к востоку от Солнца (если смотреть с Земли). Корональный выброс не оказал на Землю воздействие. Вспышка M1.1 в 14:49 UT от AR3431 вызвала незначительные нарушения радиосвязи над частью северного побережьем Бразилии, т.е. могла быть

геоэффективной. Корональный выброс массы 11 сентября в 22:35 UT вызвал геомагнитную бурю, начавшуюся 12 сентября в 12:00 UT. Увеличение скорости HSS от 340 до 450 км/с также могло повлиять на возникновение геомагнитной бури.

12 сентября 2023 г. солнечная активность была умеренная. На коронографax LASCO C2 на борту космического корабля SOHO наблюдались 3 корональных выброса массы (см. Рисунок 6). По крайней мере, два из них в 19:12 и в 21:12 UTC были с обратной стороны Солнца и не оказали влияние на Землю. 13 сентября 2023г. активность Солнца была низкая.

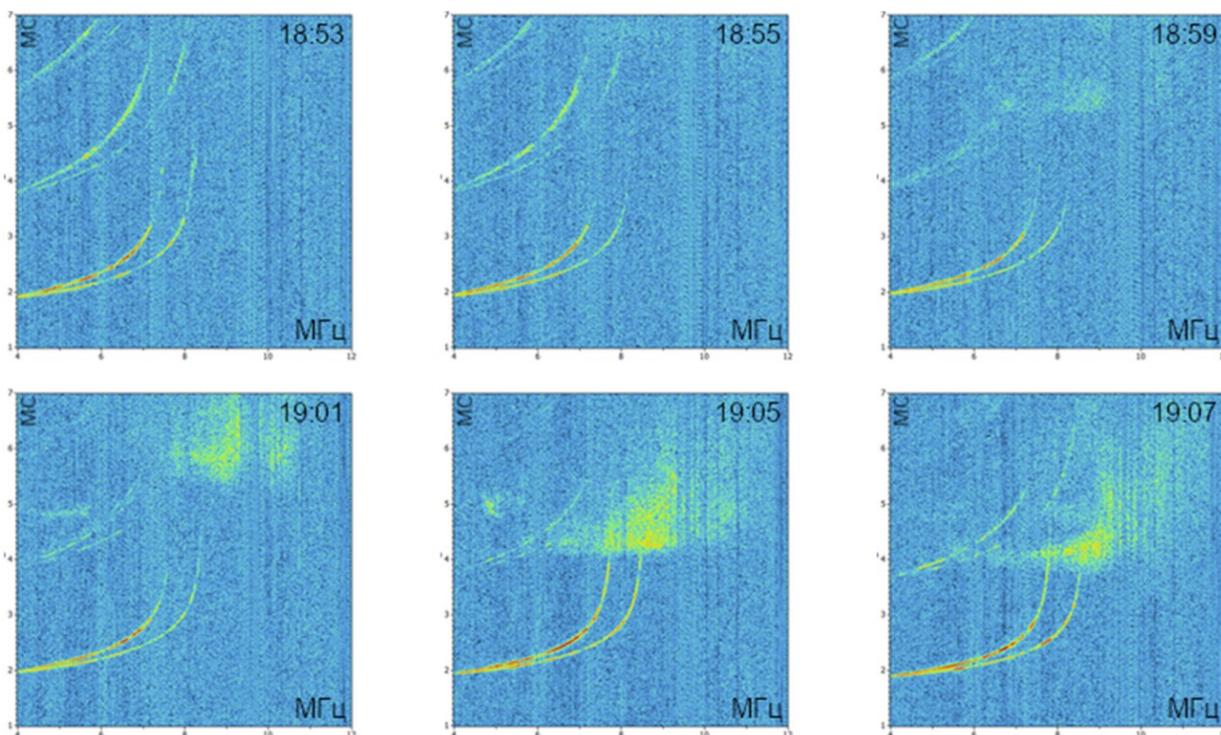


Рисунок 4 – ДЧХ ионосферы на трассе Васильсурск – Нижний Новгород

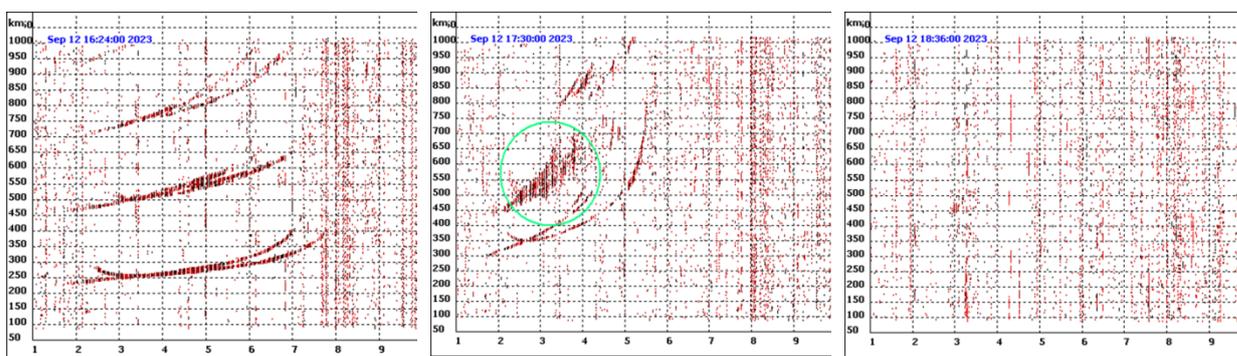


Рисунок 5 – ИONOграммы ВЗ ионосферы CAD1 (Васильсурск)

Заключение

Моделирование показало, что рассеяние радиоволн наблюдалось на высотах F-области ионосферы. Область рассеяния находилась на $59^{\circ} \div 61^{\circ}$ с. ш. Это могло происходить из-за смещения южной границы аврорального овала во время магнитной бури и высыпания заряженных частиц.

В результате проведенного эксперимента проведены измерения ДЧХ ионосферы с разрешением одна минута на ряде среднеширотных трасс во время сильного геомагнитного возмущения. Показано негативное влияние на канал КВ связи из-за

появившейся сильной диффузности и выполнены оценки скорости распространения геомагнитного возмущения в ионосфере. Сделаны предположения, что причиной возникновения геомагнитной бури 12 сентября мог быть корональный выброс массы 11 сентября в 22:35 UT на Солнце.

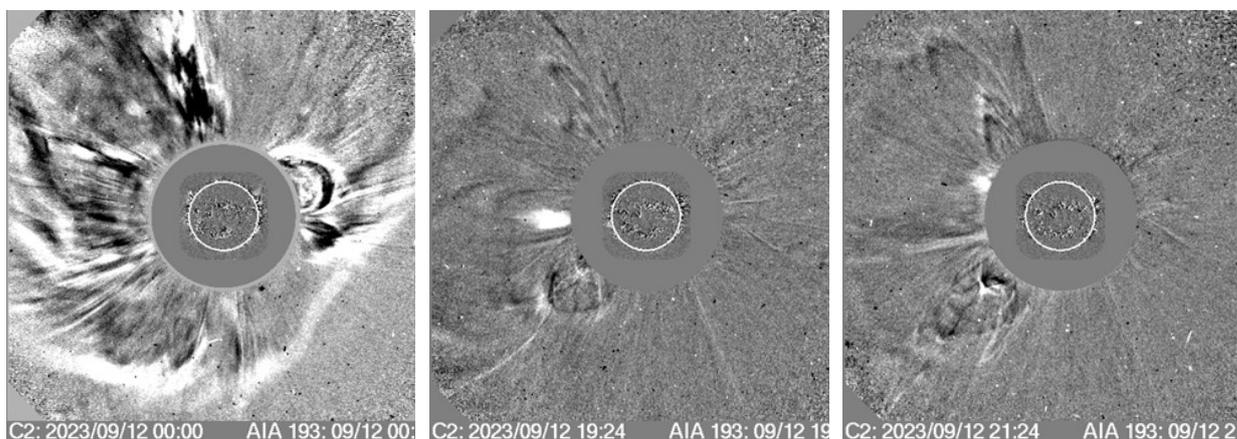


Рисунок 6 – Снимки коронографа LASCO C2 на борту спутника SOHO

Отметим, что геомагнитные бури сильно влияют на параметры коротковолнового канала связи, в том числе и на диапазон частот прохождения (см., например, [4-6]), снижают надежность коротковолновой связи.

Работа Выборнова Ф.И. и Шейнер О.А. выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект FSWR-2023-0038.

Список литературы

1. Лаборатория солнечной астрономии ИКИ РАН и ИСЗФ СО РАН. – URL: https://xras.ru/magnetic_storms.html (дата обращения: 24.05.2024)
2. World Data Center for Geomagnetism: официальный сайт. – Kyoto. URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (дата обращения: 24.05.2024).
3. Урядов В.П., Колчев А.А., Вертоградов Г.Г. и др. Воздействие на ионосферный волновой канал сильной магнитной бури и двух рентгеновских вспышек в период летнего солнцестояния 2015 года по данным наклонного зондирования в Евроазиатском регионе // Известия вузов. Радиофизика. 2017. Том LX, № 5. С. 357.
4. Выборнов Ф.И. Влияние магнитно-ионосферной возмущенности на диапазон частот прохождения коротковолнового канала связи // Транспорт. Горизонты развития. Труды 1-го Международного научно-промышленного форума. Нижний Новгород, 2021. С. 27 – 30.
5. Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин В.А. 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.
6. Выборнов Ф.И., Шейнер О.А. Влияние гелио-геофизической активности на надежность коротковолновой связи на транспорте // Научные проблемы водного транспорта. 2022. № 72. С. 249 – 259.