

УДК 621.371+550.388.2

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

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

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-ИОНОСФЕРНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ НА ДИАПАЗОН ЧАСТОТ ПРОХОЖДЕНИЯ КОРОТКОВОЛНОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования вариаций характеристик ионосферного коротковолнового канала связи в условиях переменной магнитной активности. Проведено сопоставление изменений F- и Es- мод распространения в зависимости от индексов геомагнитной активности.

Ключевые слова: радиосвязь, коротковолновый диапазон длин волн, распространение радиоволн, ионосфера, ионосферные возмущения, коротковолновый канал связи.

Введение

Для работы радиоэлектронных систем связи необходимо установить диапазоны и пределы ионосферной изменчивости для различных регионов и солнечно-магнитной активности [1, 2]. Оценки изменчивости диапазона частот прохождения коротковолновых (КВ) сигналов от максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) до наименьшей наблюдаемой частоты (ННЧ) в различных гелиогеофизических условиях особенно важны при планирования КВ радиосвязи.

Изменчивость ионосферы, в основном, связана с солнечной и геомагнитной активностью. Вклад солнечной активности меняется в зависимости от солнечного цикла и связан с ультрафиолетовым и рентгеновским излучением, которое ионизирует атмосферу, в то время как влияние геомагнитной активности обусловлено солнечным ветром и магнитосферно-ионосферным взаимодействием, приводящим к геомагнитным бурям. В высоких широтах ионосферная изменчивость дополнительно связана с высыпанием частиц и дрейфом плазмы вследствие магнитосферной конвекции [3,4]. Считается, что ионосферные возмущения возникают всякий раз, когда возникают магнитные возмущения. В условиях магнитно-ионосферных возмущений для обеспечения требуемой надежности необходимо нейтрализовать неблагоприятное воздействие таких возмущений на работу радиоэлектронных систем.

В этой связи весьма актуальными являются исследования диапазона изменений параметров ионосферного КВ канала в различных гелиогеофизических условиях и разработка рекомендаций для прогнозирования и предупреждения нарушений ионосферных условий.

В статье представлены результаты наблюдений вариаций параметров ионосферного КВ канала на субавроральных трассах во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года.

1. Описание эксперимента и гелиогеофизической обстановки

Измерения проводились с 1 по 31 октября 2016 г. на субавроральной трассе наклонного ЛЧМ-зондирования Салехард (66.5°N, 66.37°E) – Васильсурск (56.1°N, 46.1°E). Передатчик работал в диапазоне частот 2.0 – 29.0 МГц, скорость перестройки частоты составляла 550 кГц/с, интервал зондирования 15 минут.

Период наблюдений в октябре 2016 г. характеризовался переменной магнитной активностью. Согласно [5] в это время происходила неоднократная смена знака V_z компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) с северного на южное направление и обратно. Известно [6], что при отрицательных значениях V_z происходит пересоединение ММП с геомагнитным полем Земли и энергия солнечного ветра в виде заряженных частиц поступает в магнитосферу. Согласно [5] значительные и длительные отрицательные значения компоненты V_z компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) имели место 13 октября, когда они достигали значений 10-18 нТл.

Общая геофизическая обстановка в период проведения эксперимента показана на рис.1. Во время наблюдений имели место несколько периодов магнитной активности. Первый в начале октября приходился на фазу восстановления умеренной магнитной бури, главная фаза которой продолжалась с 06 UT 29.09.16 г. до 09 UT 29.09.16 г., когда индекс Dst достиг минимального значения – 66 нТл (см. рис.1а).

Слабая магнитная буря имела место 04 октября, когда индекс Dst достиг минимального значения – 43 нТл (см. рис.1а).

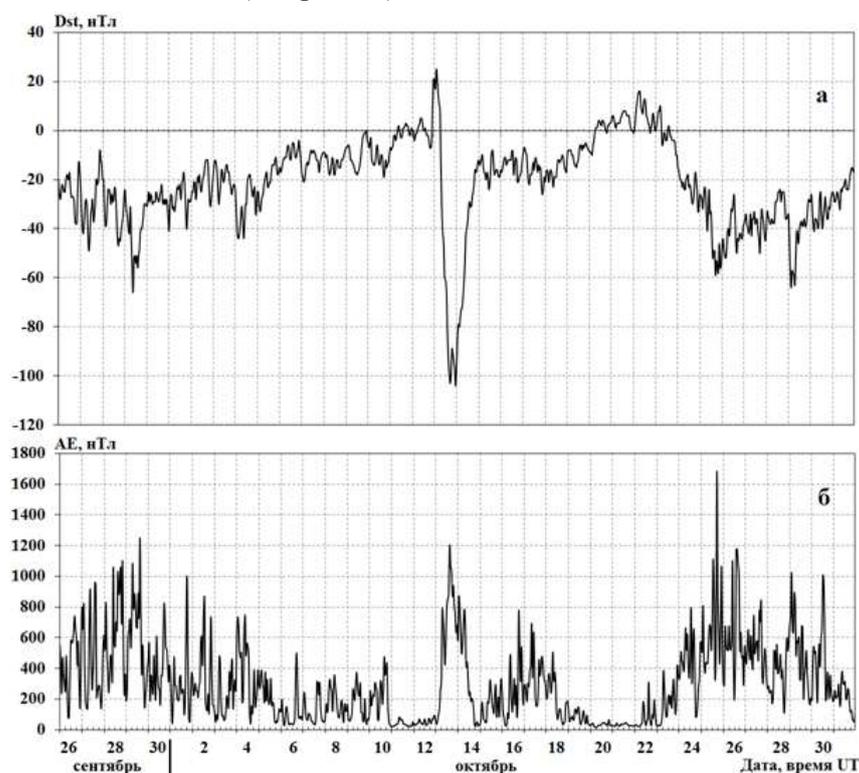


Рис.1. Геофизическая обстановка 24 сентября - 31 октября 2016г.: а – магнитный индекс Dst, б – авроральный индекс АЕ.

Сильная магнитная буря началась в 00 UT 13.10.16 г. с резкого возрастания Dst, затем с резкого уменьшения Dst началась главная фаза бури, которая продолжалась до 00 UT 14.10.16 г., когда индекс Dst достиг минимального значения –103 нТл. Затем началась фаза восстановления бури (см. рис.1а). Умеренная магнитная буря имела место 24 – 29 октября, когда индекс Dst достигал минимального значения – 59 нТл и – 63 нТл в 21:30 UT 24.10.16 г. и 04:00 UT 28.10.16 г. соответственно (см. рис.1а).

На фазе восстановления магнитных бурь произошло несколько магнитосферных суббурь различной интенсивности (2, 4, 16, 17 и в период 26-29 октября), которые идентифицированы по усилению аврорального индекса АЕ [7]. (см. рис.1б). Как видно из рис. 1а, 1б отрицательные значения магнитного индекса Dst, характеризующего уровень магнитной возмущенности и фазу развития магнитной бури, хорошо коррелируют с увеличением аврорального индекса АЕ. Значения индекса Kp составляли величины 5-7.

2. Результаты наблюдений

На рис. 2 и 3 показан временной ход максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) и наиминимей наблюдаемой частоты (ННЧ) моды 1F и на трассе Салехард – Васильсурск для периода наблюдений с 10 по 20 октября 2016 г. На рисунках интервал частот прохождения КВ-сигналов закрашен синим фоном.

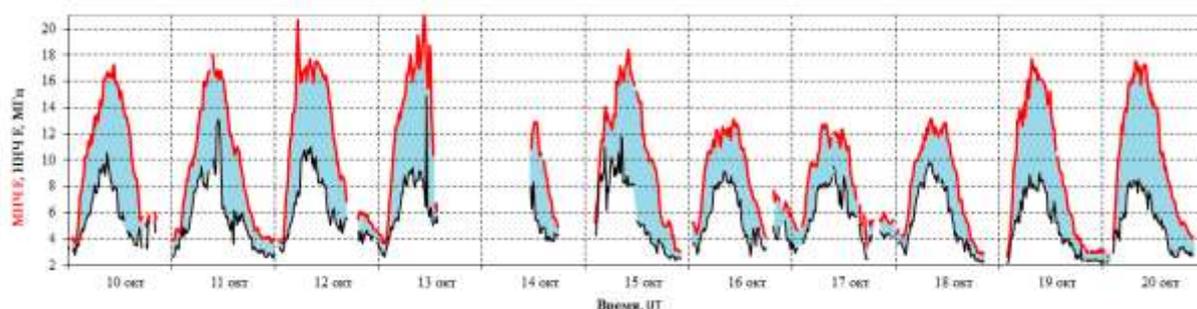


Рис. 2. МНЧ (красный) и ННЧ (черный) F слоя ионосферы по трассе Салехард-Васильсурск 10 – 20 октября 2016 года.

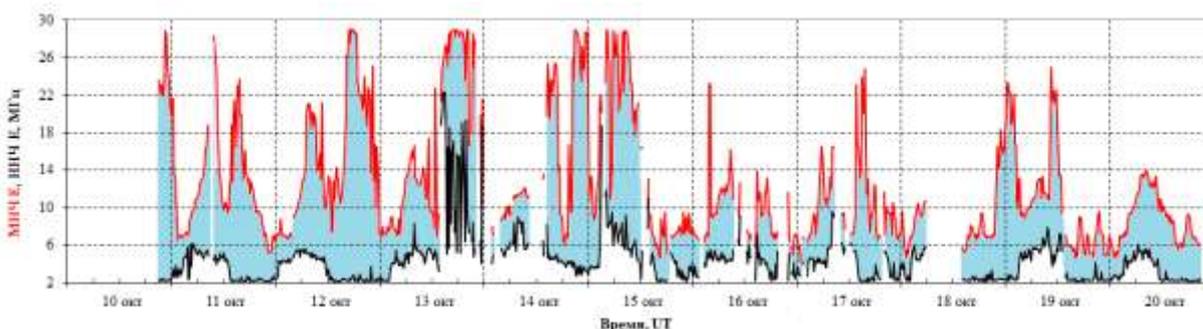


Рис. 3. МНЧ (красный) и ННЧ (черный) E/Es слоя ионосферы по трассе Салехард-Васильсурск 10 – 20 октября 2016 года

Наиболее сильное воздействие на F-моду оказала магнитная буря, начавшаяся 13 октября (см. рис.1а), на фазе восстановления которой произошла депрессия электронной концентрации в верхней ионосферы и в результате отрицательной фазы бури [17] имел место блэкаут – непрохождение сигнала F-модой с 13 UT 13.10.16 до 12 UT 14.10.16. Существенные вариации параметров F-моды наблюдались 16-18 и 26-29 октября на стадии развития магнитосферных суббурь и умеренной магнитной бури 24-29 октября. Заметные изменения диапазона частот произошли на фазе восстановления умеренной бури 1 октября и во время слабой магнитной бури 4 октября, когда диапазон частот сократился до 1-2 МГц, в первую очередь за счет уменьшения МНЧF, что связано с отрицательной фазой бури.

По результатам наблюдений можно сделать вывод о существенном влиянии геомагнитной активности на условия распространения КВ-сигналов посредством F-моды. Умеренные магнитные бури с индексом Dst 40-60 нТл могут приводить к уменьшению электронной концентрации в верхней ионосфере. При этом на субавроральной трассе

уменьшается МНЧФ и сокращается диапазон частот прохождения КВ-сигналов. Сильная магнитная буря с $Dst < 100$ нТл привела к блэкауту - непрохождению КВ-сигналов на достаточно длительный интервал времени.

В авроральной ионосфере во время роста геомагнитной активности в условиях высыпания заряженных частиц из магнитосферы образуются интенсивные спорадические слои в E-области [18]. В высокоширотной ионосфере существует прямая связь между состоянием геомагнитного поля и появлением спорадической ионизации, когда с ростом Kp увеличивается вероятность образования Es. Вероятность образования аврорального Es велика в ночное время. Величина электронной концентрации в E области тесно связана с поведением геомагнитной активности и особенно сильно реагирует на появление магнитосферной суббури. Во время магнитной активности в околополуденном секторе экваториальная граница появления аврорального Es смещается на $2-4^\circ$ на более низкие широты. В околополуденном секторе зависимость от магнитной активности проявляется меньше.

Известно, что мощный слой Es оказывает существенное влияние на ионосферный КВ канал на субавроральных трассах.

Согласно нашим данным (см. рис.2,3), наряду с регулярными отражениями от E-слоя с типичным суточным ходом, наблюдаются отражения, в основном, в вечерние и ночные часы, с высокими значениями МНЧ, достигающие до 24-29 МГц и большим диапазоном частот прохождения КВ-сигналов 16-20 МГц. Такие отражения обусловлены отражением от мощного спорадического слоя Es. Это особенно хорошо видно из сравнения данных за 20 – 22 и 26 – 29 октября, т.е. для данных с очень низкой и высокой геомагнитной активностью (см. рис.1,2).

Пространственно-временная изменчивость высыпания заряженных частиц может приводить к тому, что ионизация спорадического слоя E неоднородна, в ней могут формироваться области с ограниченными горизонтальными размерами, в которых плотность электронов больше, чем в окружающем слое. Это может приводить к заметному эффекту появления достаточно сильного отражения от Es в условиях отсутствия четко выраженной зависимости от геомагнитной активности (см. например, данные за 9 – 11 октября и геомагнитные данные (рис.1,2)).

Заключение

На субавроральной трассе Салехард – Васильсурск в условиях спокойной геомагнитной обстановки основной модой распространения является F-мода. В околополуденные часы 11-13 UT величина МНЧФ варьируется от 15-16 МГц до 16-19 МГц. В эти же часы наблюдается наибольший диапазон частот, который варьируется в отдельные дни в интервале 6-10 МГц.

Умеренные магнитные бури с индексом Dst 40-60 нТл могут приводить к уменьшению электронной концентрации в верхней ионосфере. При этом на субавроральной трассе в результате отрицательной фазы магнитной бури уменьшается МНЧФ до 10-12 МГц и сокращается диапазон частот прохождения КВ-сигналов F слоя до 1-3 МГц. Сильная магнитная буря, имевшая место 13 – 14 октября, привела к блэкауту - непрохождению КВ-сигналов на достаточно длительный интервал времени.

На субавроральной трассе Салехард – Васильсурск во время магнитосферных суббурь и высыпания заряженных частиц в результате образования мощного спорадического слоя Es существенно улучшаются условия распространения радиоволн. Диапазон частот прохождения КВ-сигналов Es возрастает до значений 10, а МНЧ Es достигает верхнего предела частоты ЛЧМ-зондирования 29 МГц.

Результаты исследований показывают, что КВ-сигналы весьма чувствительны к геомагнитным условиям распространения радиоволн во время магнитной бури, приводящей к сужению диапазона частот прохождения F-модой, вплоть до блэкаута.



Вместе с тем, на субавроральных трассах в период высыпания заряженных частиц, когда в авроральной E области образуется интенсивный спорадический слой Es существенно улучшаются условия распространения посредством отражения от Es, что в значительной мере может нейтрализовать неблагоприятное воздействие магнитной бури на работу радиоэлектронных систем различного назначения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 20-17-00050.

Список литературы:

1. Kouris S.S., Fotiadis D.N., Hanbaba R. On the day-to-day variation of the MUF over Europe// Phys.Chem.Earth, 2000. V.25, no.4, pp.319–325.
2. McNamara, L.F., The Ionosphere: Communications, Surveillance, and Direction Finding, Krieger, Malabar, Fla.1990.
3. Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A. Dependencies of high-latitude plasma convection: Consideration of interplanetary magnetic field, seasonal, and universal time factors in statistical patterns. // J. Geophys. Res., 2005, Vol.110, A09204. doi:10.1029/2004JA010815.
4. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М. Наука. 1988. - 527с.
5. www.swpc.noaa.gov, 28.02.2021.
6. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир. 1980. - 299 с.
7. wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp, 28.02.2021.

INFLUENCE OF MAGNETIC-IONOSPHERIC DISTURBANCES ON THE FREQUENCY RANGE OF A SHORT-WAVE COMMUNICATION CHANNEL

Fedor I. Vybornov

Abstract. The article presents the results of a study of variations in the characteristics of the ionospheric short-wave communication channel under conditions of variable magnetic activity. The comparison of changes in the F- and Es-propagation modes depending on the indices of geomagnetic activity is carried out.

Keywords: radio communication, short-wavelength range of wavelengths, propagation of radio waves, ionosphere, ionospheric disturbances, short-wave communication channel.

