

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.202-205

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ И МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ИОНОСФЕРНЫЙ КВ КАНАЛ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В СЕНТЯБРЕ 2017 г.

В.П. Урядов, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин

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

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований вариаций параметров ионосферного КВ канала во время солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 г. по данным наклонного ЛЧМ-зондирования. Обнаружен предбулевой эффект повышения максимальной наблюдаемой частоты F -слоя ионосферы ($F_{MНЧ}$) на трассах наклонного зондирования. Установлено, что отрицательная фаза магнитной бури привела к сильной деградации ионосферного канала и длительному отсутствию приема КВ-сигналов на субавроральных трассах и в меньшей степени на среднеширотной трассе. В активный период бури диапазон частот прохождения КВ сигналов $\Delta f = F_{MНЧ} - F_{HНЧ}$ сократился в 2-3 раза по сравнению с невозмущенной ионосферой. Показано, что во время магнитной бури на субавроральной трассе условия распространения через спорадический слой E_s существенно лучше, чем распространение F -модой через верхнюю ионосферу.

Введение

Результаты многочисленных исследований научного и прикладного характера в области ионосферного распространения КВ свидетельствуют, что наиболее опасными для эффективной работы связных систем являются условия во время сильных геомагнитных возмущений, когда отрицательная фаза магнитной бури и сильное поглощение захватывают обширные регионы, где проходят трассы систем КВ радиосвязи [Goodman et al., 2006; Uryadov et al., 2018]. В этой связи, актуальными являются исследования особенностей распространения КВ-сигналов в условиях различной солнечной и магнитной активности и выработка рекомендаций для нейтрализации неблагоприятных воздействий магнитно-ионосферных возмущений на работу радиоэлектронных систем различного назначения.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований влияния солнечной и магнитной активности, имевшей место в сентябре 2017 г., на характеристики КВ-сигналов по данным наклонного ЛЧМ-зондирования субавроральной и среднеширотной ионосферы.

Описание эксперимента и гелиогеофизические условия наблюдений

Наблюдения проводились на сети трасс наклонного зондирования (НЗ) в Евроазиатском регионе. ЛЧМ-передатчики в Ловозеро (Мурманская обл., 68°N, 35°E), Салехарде (66.5°N, 66.4°E), Диксоне (73.5°N, 80.7°E) и ст. Горьковская (Ленинградская обл., 60.27°N, 29.38°E) работали круглосуточно с интервалом зондирования 15 минут; диапазон частот 2-30 МГц, скорость перестройки частоты 550 кГц/с. Передатчик в Соданкюля (Финляндия, 67.4°N, 26.6°E) работал в диапазоне частот 2 – 16 МГц, скорость перестройки частоты составляла 500 кГц/с, интервал зондирования – 5 минут. Прием ЛЧМ-сигналов проводился в Васильсурске (Нижегородская обл., 56.1°N, 46.1°E).

Сентябрь 2017 г. интересен с гелиогеофизической точки зрения, когда наряду со спокойными условиями имели место магнитные бури, серия магнитосферных суббурь и ряд достаточно интенсивных рентгеновских вспышек.

В данной работе мы приводим, в основном, данные наблюдений на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск и среднеширотной трассе Горьковская – Васильсурск, которые наиболее полно отражают особенности поведения КВ-сигналов во время магнитной бури с 6 по 9 сентября 2017 г. В дальнейшем планируется более полный анализ данных, полученных в течение всего сентября 2017 г. на различных трассах ЛЧМ-зондирования в Евроазиатском регионе.

На рис. 1 показана гелиогеофизическая обстановка 6 – 10 сентября (*wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp; sec.noaa.gov*). В этот период наблюдались сильная "ночная" и умеренная "дневная" магнитные бури (см. рис.1а). В этот же период были зарегистрированы рентгеновские вспышки классов M2 – M7 и сильные вспышки классов X9.3 и X8.2 (*sec.noaa.gov*). 7 и 8 сентября наблюдались заметные колебания ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) (см. рис. 1б), 7 сентября южная компонента ММП держалась в течение 5 часов, достигая максимального отрицательного значения -32 нТл, скорость солнечного ветра увеличилась до 840 км/с в 08:48UT 8 сентября с постепенным уменьшением до 530 км/с для 10 сентября. Компонента V_z оставалась

отрицательной в течение второй половины 8 сентября (см. рис. 1б). Наиболее чувствительным наземным индикатором интенсивности магнитных возмущений является авроральный индекс АЕ (см. рис. 1в). Как видно из рис. 1в наиболее сильные вариации АЕ имели место 7 и 8 сентября, когда максимальное значение АЕ достигало значений ~1000 – 1400 нТл.

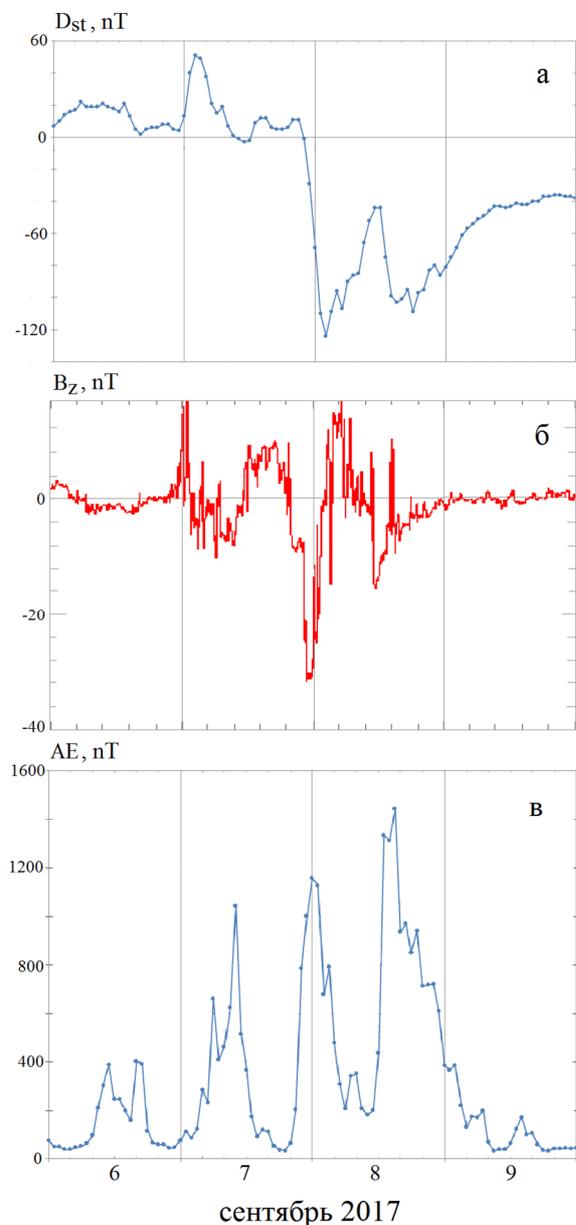


Рисунок 1. Индексы Dst, Bz и АЕ во время магнитной бури в сентябре 2017 г.

несколько меньше по сравнению со спокойными условиями, что, вероятно, связано с ростом поглощения радиоволн в период высыпания заряженных частиц, о чем свидетельствуют результаты наблюдений свечения и данные риометра в Соданкюля и Оулу (www.sgo.fi). В этот день проявилось воздействие рентгеновских вспышек на прохождение КВ-сигналов. На более протяженной субавроральной трассе в дневное время 10:11-10:18 UT (вспышка M7.3) сигнал не принимался. На среднеширотной трассе наблюдался рост FННЧ на 4-5 МГц и существенно уменьшился (вплоть до непрохождения) диапазон частот $\Delta f = F_{MНЧ} - F_{HНЧ}$. В вечернее время 14:20-14:55 UT (вспышка X1.3) сигнал принимался на обеих трассах, но наблюдался заметный рост FННЧ и имело место сужение (вплоть до непрохождения на среднеширотной трассе) диапазона частот Δf .

Результаты наблюдений

На рис. 2 для трасс Ловозеро – Васильсурск (рис. а, б, д, е) и Горьковская – Васильсурск (рис. в, г, ж, з) показан временной ход наибольшей (FМНЧ) и наименьшей (FННЧ) наблюдаемых частот F-слоя ионосферы для спокойных условий (пунктиром показаны усредненные данные для 03, 23 и 24 сентября) и периода солнечной и магнитной активности с 6 по 9 сентября, когда наблюдалось сильное возмущение ионосферы.

Как видно из рис. 2а, в на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск (в меньшей степени на среднеширотной трассе Горьковская – Сура) 6 сентября до начала магнитной бури в течение всего временного интервала прохождения КВ-сигналов с 01 до 21 UT наблюдалось возрастание FМНЧ. Такой же эффект роста FМНЧ наблюдался на субавроральных трассах Соданкюля – Васильсурск, Салехард – Васильсурск и Диксон – Васильсурск. В среднем возрастание FМНЧ на различных трассах по сравнению со средним (спокойным) уровнем достигало ~8±22%. Отметим, что 6 сентября магнитные индексы Dst и АЕ были на спокойном уровне (см. рис.1). Эффект предбуревого возрастания критической частоты f_oF2 наблюдался многими авторами (см., например, [Данилов, 2013] и цитируемую там литературу), но механизм этого явления окончательно еще не установлен.

6 сентября в 08:57 – 09:17 UT и в 11:53 – 12:10 UT на обеих трассах наблюдалось влияние рентгеновских вспышек классов X2.2 и X9.3, соответственно, на поглощение радиоволн, когда во всем диапазоне частот ЛЧМ-зондирования КВ-сигналы не принимались. На более протяженной субавроральной трассе во время вспышек значения FМНЧ и FННЧ выше, а временной интервал отсутствия сигнала меньше, чем на среднеширотной трассе и хорошо видна релаксация сигнала на стадии восстановления, особенно заметная для FННЧ (см рис. 2а, в).

7 сентября на начальной стадии "ночной" магнитной бури до ее взрывной фазы КВ-сигналы принимались на обеих трассах во всем временном интервале. Как видно из рис. 2б диапазон частот прохождения Δf для субавроральной трассы

8 сентября на главной фазе "ночной" магнитной бури и начальной фазе ее восстановления до 08:30 UT на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск сигнал не принимался, что связано с отрицательной фазой бури и ростом поглощения. Сигнал начал приниматься с 08:30 UT до начала взрывной фазы "дневной" магнитной бури (11:50 UT). Частоты были на 2-3 МГц меньше, чем для спокойных условий. После 11:50 UT, когда началась взрывная фаза "дневной" магнитной бури, сигнал не принимался. На среднеширотной трассе 8 сентября сигнал принимался с 3 до 6:30 UT и с 08:30 до 12 UT. На обеих трассах диапазон частот прохождения Δf был в 2-3 раза меньше, чем в невозмущенной ионосфере. Отсутствие сигнала 8 сентября после 12 UT связано с развитием отрицательной фазы "дневной" бури и ростом поглощения по данным риометров в Соданкюля и Оулу (www.sgo.fi). В этот день рентгеновские вспышки в 07:40-07:58 UT (вспышка M8.1) и в 15:09-16:04 UT (вспышка M2.9) пришлись на отрицательные фазы "ночной" и "дневной" магнитных бурь, когда КВ-сигналы не принимались на обеих трассах.

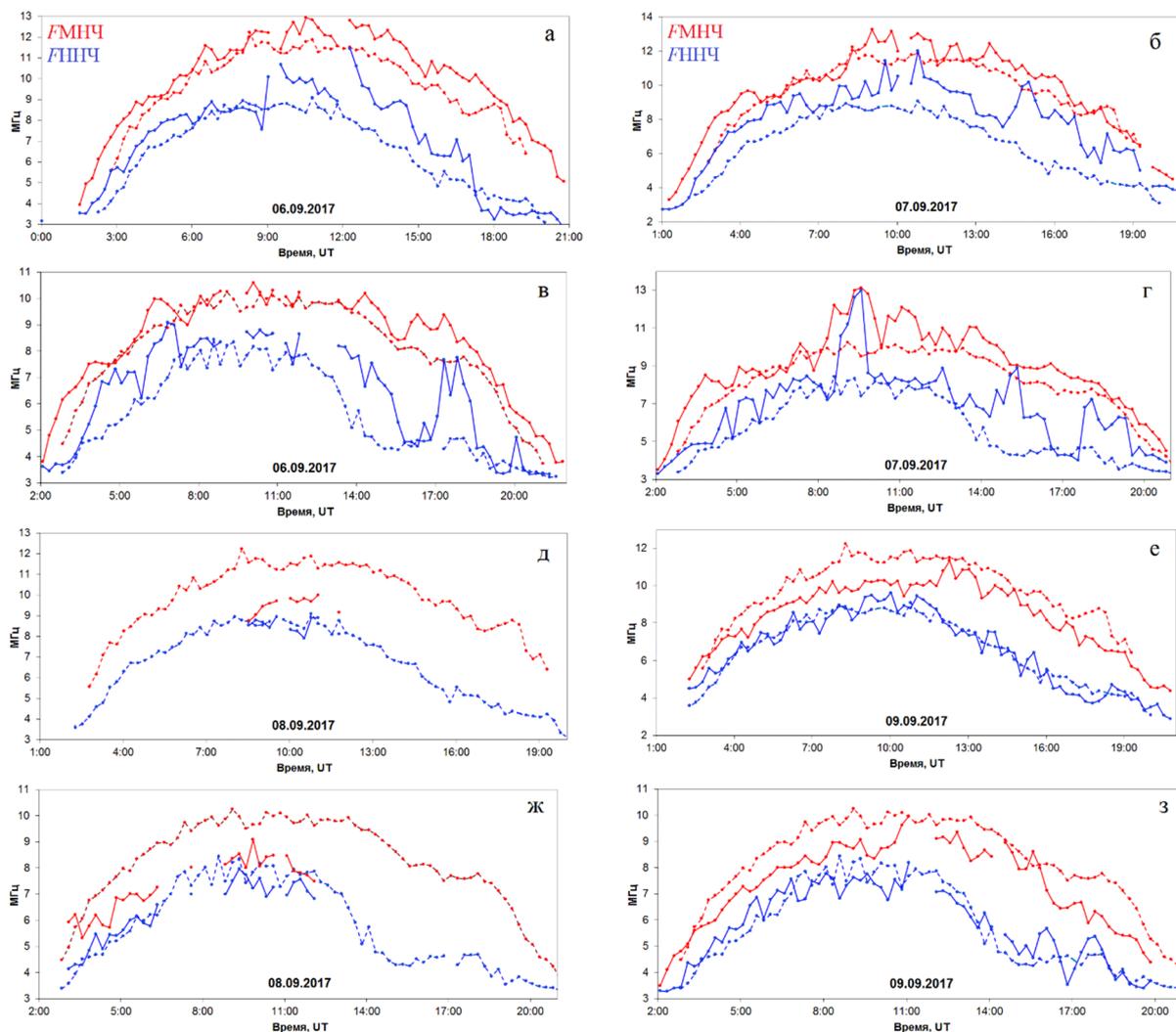


Рисунок 2. Временной ход $F_{min}F$ (красный) и $F_{min}H$ (синий) для возмущенных (сплошные линии) и спокойных (пунктир) дней на трассах Ловозеро – Васильсурск (рис. а, б, д, е) и Горьковская – Васильсурск (рис. в, г, ж, з).

9 сентября магнитная активность существенно снизилась, свечение не наблюдалось и по данным риометра Соданкюля поглощение было на низком уровне ~ 1 дБ (www.sgo.fi). На обеих трассах сигнал принимался в течение всего временного интервала с 2 до 20 UT и во второй половине 9 сентября сигналы восстановились практически до невозмущенного уровня. В этот день на среднеширотной трассе в 10:50-11:42 UT КВ-сигналы не принимались, что вероятно связано с воздействием рентгеновской вспышки класса M2.9.

С пространственно-временной изменчивостью высыпания заряженных частиц из магнитосферы связано существование спорадических слоев в области E авроральной ионосферы.

На рис. 3 показан временной ход максимальной и наименьшей наблюдаемых частот E_s слоя ($E_sMНЧ$ – красный, $E_sHНЧ$ - синий) во время магнитной бури (сплошные линии) и в спокойных (пунктир) условиях на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск. Как видно из рисунка 7 сентября после 6 UT значения $E_sMНЧ$ существенно (на 5 – 15 МГц) больше, чем в невозмущенной ионосфере. При этом значительно возрастает диапазон частот прохождения КВ-сигналов через спорадический слой E_s . 8 сентября после 2 UT на фазе восстановления "ночной" магнитной бури растет поглощение и сигнал не принимался. После 12 UT наблюдался рост $E_sMНЧ$ и $E_sHНЧ$. Из рис. 3б и 2д видно, что во время магнитной бури на субавроральной трассе существуют более благоприятные условия для распространения КВ-сигналов через E_s по сравнению с распространением через F -область возмущенной ионосферы, что можно использовать для нейтрализации отрицательного влияния магнитно-ионосферных возмущений на работу систем КВ радиосвязи.

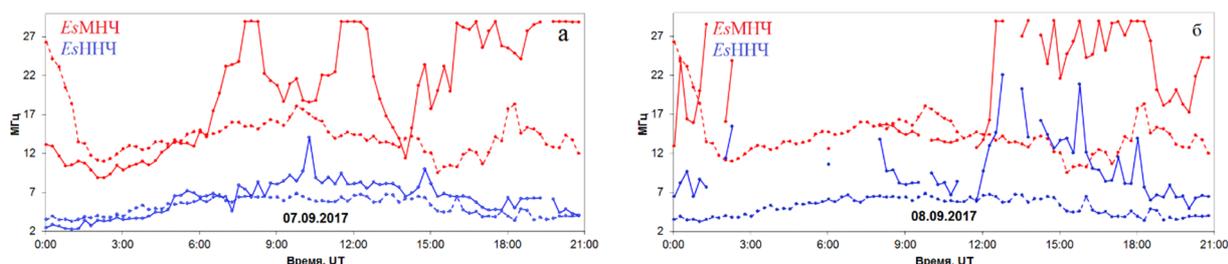


Рисунок 3. Временной ход $E_sMНЧ$ (красный) и $E_sHНЧ$ (синий) во время магнитной бури (сплошные линии) и в спокойных (пунктир) условиях на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск 7.09.2017 г. (а) и 8.09.2017 г. (б).

Выводы

Отрицательная фаза магнитной бури 7-8 сентября 2017 г. и сопровождающее ее усиление поглощения радиоволн оказали негативное влияние на ионосферный КВ канал и привели к сокращению диапазона частот прохождения радиоволн, деградации ионосферного канала, вплоть до блэкаута.

В активный период бури диапазон частот прохождения КВ сигналов $\Delta f = FМНЧ - FННЧ$, как на субавроральной, так и на среднеширотной трассах сократился в 2-3 раза по сравнению с невозмущенной ионосферой. Понятно, что в таких условиях КВ радиосвязь через F -слой ионосферы не будет надежной.

С другой стороны, при образовании сильных спорадических слоев E_s во время магнитной бури появляется возможность использовать для радиосвязи в высокоширотной ионосфере канал распространения через E_s . Об этом свидетельствуют результаты наших исследований. Так, в отличие от полного блэкаута моды F в течение второй половины 8 сентября распространение через слой E_s не было подвержено полному блэкауту. Диапазон частот прохождения через спорадический слой E_s на 5 – 15 МГц превышал диапазон частот прохождения КВ-сигналов в невозмущенной ионосфере.

Благодарности. Авторы благодарят всех сотрудников, обеспечивавших работу ЛЧМ передатчиков, благодарят сервисную службу World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (Japan) за возможность получения данных по индексам Dst, AE и сервисную службу Space Weather Prediction Center (USA) за возможность получения данных GOES Satellite X-ray и данных ACE по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля и сервисную службу Sodankyla Geophysical Observatory (Finland) за возможность получения данных сети риометров по поглощению радиоволн. Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (шифр 3.7939.2017/8.9).

Список литературы

- Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения // Гелиогеофизические исследования. 2013, вып. 5. С. 1-33.
- Goodman J.M., Ballard J.W., Patterson J.D., Gaffney B. Practical measures for combating communication system impairments caused by large magnetic storms // Radio Sci. 2006. V. 41. RS6S41. doi:10.1029/2005RS003404.
- Uryadov V.P., Vybormov F.I., Kolchev A.A. et al. Impact of heliogeophysical disturbances on ionospheric HF channels // Advances in Space Research. 2018. V. 61. P.1837-1849.