

УДК 550.388.2

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ НА ТРАССАХ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ И МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ В СЕНТЯБРЕ 2017 ГОДА

В. П. Урядов^{1,2}, Ф. И. Выборнов^{1*}, А. В. Першин¹

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского;

² Научно-производственное предприятие «Полёт», г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты исследования влияния солнечной и магнитной активности в сентябре 2017 года на характеристики коротковолновых сигналов на субавроральных и среднеширотной трассах. Установлена связь ионосферных эффектов, обусловленных магнитной бурей, с интенсивностью магнитного возмущения. Показано, что образование сильного спорадического слоя E_s в авроральной ионосфере во время магнитной бури позволяет осуществлять коротковолновую связь с помощью отражения от него в условиях, когда эффекты отрицательной фазы бури и роста поглощения делают затруднительным или невозможным распространение F -моды с отражением от верхней ионосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Для динамического управления частотным ресурсом и обеспечения устойчивой работы радиоэлектронных систем различного назначения (коротковолновая радиосвязь, загоризонтная коротковолновая радиолокация) необходимо иметь надёжные данные о диапазоне ионосферных изменений в различных гелиогеофизических условиях. Изменчивость ионосферы связана с солнечной и магнитной активностью. Вклад солнечной активности определяется ионизацией различных слоёв атмосферы в результате действия ультрафиолетового и рентгеновского излучения, в то время как влияние геомагнитной активности обусловлено солнечным ветром и магнитосферно-ионосферным взаимодействием, приводящим к магнитно-ионосферным возмущениям [1]. В авроральной области ионосферная изменчивость дополнительно связана с высыпанием заряженных частиц и дрейфом плазмы из-за магнитосферной конвекции [2, 3]. В изменчивости ионосферы важную роль играют гравитационные, приливные и планетарные волны, которые переносят энергию из нижних слоёв атмосферы, вызывая возмущения в верхней атмосфере [4].

Для повышения надёжности радиоэлектронных систем коротковолновой радиосвязи и загоризонтной коротковолновой радиолокации в различных гелиогеофизических условиях применяется их адаптация к условиям распространения радиоволн и изменению уровня случайных и преднамеренных помех. Широкое применение получили системы наклонного и возвратно-наклонного зондирования на базе ионозонда с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) для диагностики ионосферного канала и оперативной оценки его качества и выбора оптимальных рабочих частот [5–7].

Существенное повышение качества коротковолновой радиосвязи было достигнуто благодаря использованию метода автоматического установления канала (automatic link establishment, ALE), когда зондирование ионосферного канала осуществляется самим связным сигналом из группы выделенных частот [8]. При умеренных возмущениях система ALE может работать достаточно хорошо, однако в сильно возмущённых условиях требуется значительное время на переход системы в оптимальный режим работы, поскольку используемый диапазон частот может находиться вне полосы прохождения коротковолновых сигналов.

* vybornov@nirfi.unn.ru

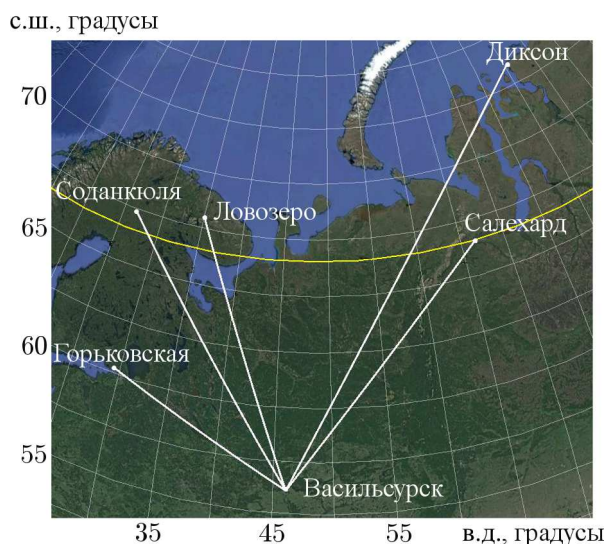


Рис. 1. Схема эксперимента

Таблица 1. Координаты приёмопередающих пунктов

Приёмопередающие пункты	Географические координаты
Васильсурск	56,15° с. ш., 46,10° в. д.
НИС «Горьковская»	60,27° с. ш., 29,38° в. д.
Диксон	73,50° с. ш., 80,70° в. д.
Ловозеро	68,00° с. ш., 35,02° в. д.
Салехард	66,52° с. ш., 66,37° в. д.
Соданкюля	67,40° с. ш., 26,60° в. д.

Достаточно эффективной мерой повышения качества канала является создание сети ретрансляционных пунктов с определённой конфигурацией для организации связи путём обхода «поражённой» области ионосферы, например во время сильных геомагнитных бурь [9].

В обеспечении устойчивой работы коротковолновой радиосвязи большую роль играет прогнозирование динамики изменения ионосферного канала. Результаты зондирования используются для прогнозирования и экстраполяции параметров ионосферного канала на трассы, не оснащённые средствами диагностики, путём коррекции модели ионосферы с целью её адаптации к условиям распространения радиоволн и определения оптимальных диапазонов частот для обеспечения требуемой надёжности коротковолновой радиосвязи [10, 11].

Магнитно-ионосферные возмущения существенно влияют на распространение коротких волн в ионосфере, вызывая дополнительное поглощение, сокращение диапазона частот прохождения сигнала (вплоть до блэкаута), рассеяние, появление аномальных мод и связанное с ними увеличение интервала группового запаздывания, снижение скорости передачи информации, усиление замираний сигнала и отклонение направления прихода сигнала от дуги большого круга между передатчиком и приёмником [12–16]. Результаты многочисленных исследований научного и прикладного характера в области распространения коротких волн в ионосфере 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 коротковолновой радиосвязи.

В этом отношении актуальными являются исследования особенностей распространения коротковолновых сигналов на стратегически важных субавторальных трассах наклонного зондирования для определения границ ионосферной изменчивости во время солнечной и магнитной активности различной интенсивности и выработка рекомендаций для нейтрализации неблагоприятных воздействий магнитно-ионосферных возмущений на работу радиоэлектронных систем различного назначения.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование влияния солнечной и магнитной активности различной интенсивности в сентябре 2017 года на ключевые характеристики коротковолновых сигналов на сети субавторальных и среднеширотной трасс наклонного зондирования ионосферы в Евразийском регионе.

В работе представлены результаты, полученные на сети трасс наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы во время солнечной и магнитной активности 6–9 и 14–17 сентября 2017 года.

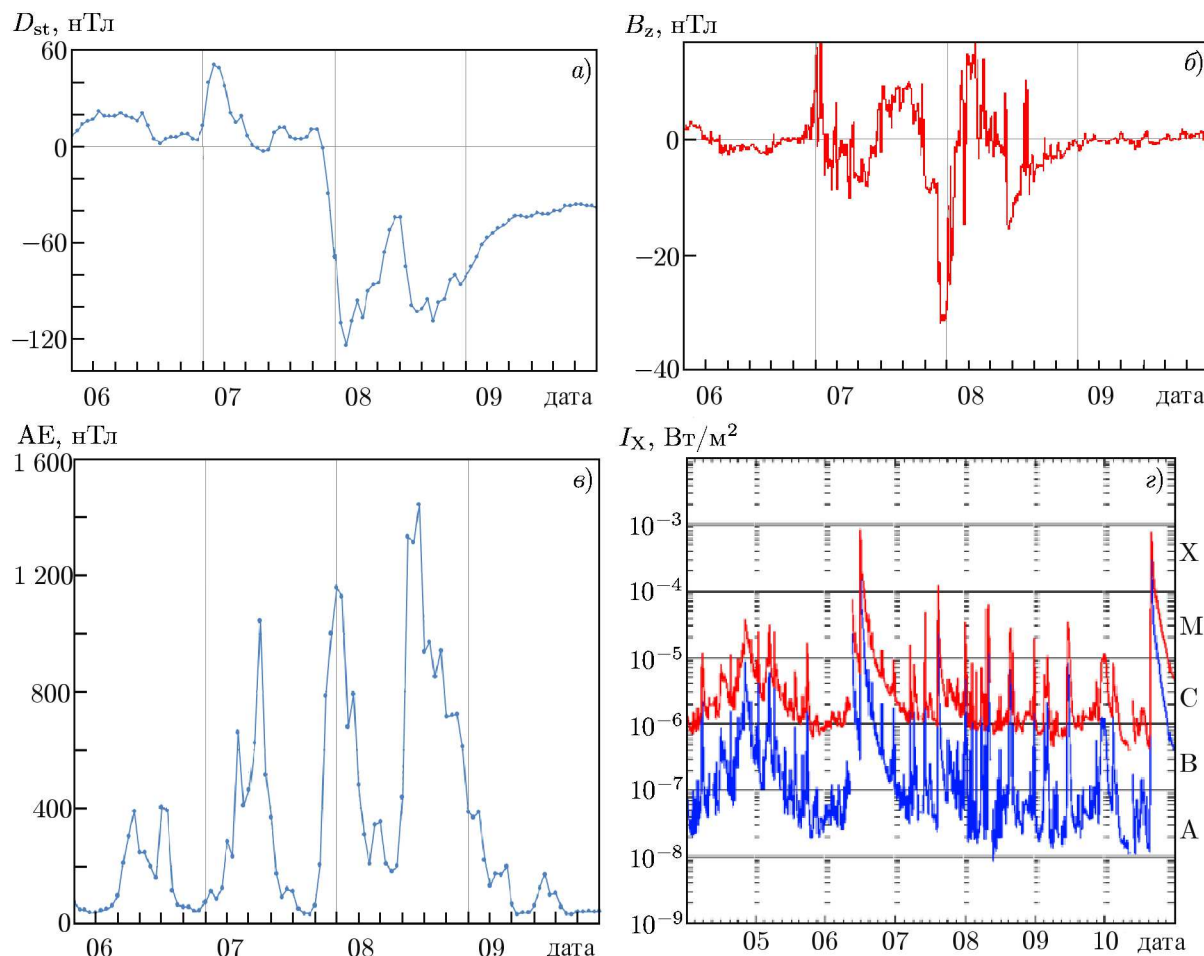


Рис. 2. Гелиогеофизическая обстановка в сентябре 2017 года: магнитный индекс D_{st} (а), B_z -компонента межпланетного магнитного поля (б), индекс AE (в) и плотность потока рентгеновских лучей по данным спутника GOES (нижняя кривая — диапазон длин волн $0,5 \div 4,0 \text{ \AA}$, верхняя кривая — диапазон длин волн $1,0 \div 8,0 \text{ \AA}$) (г)

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения проводились на сети трасс наклонного зондирования, схема эксперимента показана на рис. 1, координаты приёмо-передающих пунктов приведены в табл. 1.

В Ловозере, Салехарде, Диксоне и на НИС «Горьковская» (Ленинградская область) ЛЧМ-передатчики работали круглосуточно с интервалом зондирования 15 мин; диапазон частот $2 \div 30 \text{ МГц}$, скорость перестройки частоты 550 кГц/с . Передатчик в Соданкюля работал в диапазоне частот $2 \div 16 \text{ МГц}$, скорость перестройки частоты составляла 500 кГц/с , интервал зондирования 5 мин. Приём ЛЧМ-сигналов проводился в Васильсурске (Нижегородская область).

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

На рис. 2 и 3 показана гелиогеофизическая обстановка с 6 по 9 (для рентгеновского излучения с 4 по 11) и с 14 по 17 сентября 2017 года, соответственно по данным [17, 18].

индекса D_{st} . Наблюдались вариации межпланетного магнитного поля по величине и ориентации, компонента B_z уменьшилась до минимального значения -18 нТл во время главной фазы бури (см. рис. 3б), а скорость солнечного ветра 15–17 сентября достигла максимума (около 775 км/с) [18]. В период 15–17 сентября наблюдалась серия магнитосферных суббурь, инициированных поворотом к югу компоненты B_z , индекс АЕ достигал максимальных значений $600 \div 900$ нТл (см. рис. 3в) тогда же, когда реализовались минимальные значения компоненты B_z . Во время магнитной активности 15 и 16 сентября максимальные значения индекса K_p составляли $5 \div 6$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В работе представлены результаты, полученные на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск и среднеширотной трассе НИС «Горьковская»—Васильсурск. Поскольку на всех субавроральных трассах, в том числе на трассах Соданкюля—Васильсурск, Салехард—Васильсурск и Диксон—Васильсурск, результаты зондирования, в основном, подобны, то они используются для дополнения данных, полученных на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск.

2.1. Период 6–9 сентября 2017 года

На рис. 4 и 5 для трасс Ловозеро—Васильсурск и НИС «Горьковская»—Васильсурск соответственно показан временной ход максимальной (МНЧ- F) и наименьшей (ННЧ- F) наблюдаемых частот при отражении от F области для спокойных условий (штриховые линии, данные усреднены для 3, 23 и 24 сентября) и периода солнечной и магнитной активности с 6 по 9 сентября (сплошные линии), когда наблюдалось сильное возмущение ионосферы.

Как видно из рис. 4а и 5а, на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск и в меньшей степени на среднеширотной трассе НИС «Горьковская»—Васильсурск 6 сентября до начала магнитной бури в течение всего временного интервала прохождения коротковолновых сигналов с 01:00 до 21:00 UT наблюдалось возрастание МНЧ- F по сравнению со средним (спокойным) уровнем. Такой же эффект роста МНЧ- F наблюдался на субавроральных трассах Соданкюля—Васильсурск, Салехард—Васильсурск и Диксон—Васильсурск. В среднем возрастание МНЧ- F на различных трассах по сравнению со средним уровнем достигало $8 \div 22\%$. Отметим, что 6 сентября магнитные индексы D_{st} и АЕ соответствовали спокойному уровню (см. рис. 2). Эффект предбурового возрастания критической частоты f_{oF_2} наблюдался многими авторами (см., например, [20] и цитируемую там литературу), но механизм этого явления окончательно ещё не установлен.

Влияние рентгеновских вспышек X2.2 и X9.3 на распространение радиоволн на обеих трассах было зарегистрировано 6 сентября в 08:57÷09:17 UT и 11:53÷12:10 UT соответственно: во всём диапазоне частот ЛЧМ-зондирования коротковолновые сигналы не принимались из-за сильного поглощения. На субавроральной трассе во время вспышек временной интервал отсутствия сигнала меньше, чем на среднеширотной трассе и хорошо видна релаксация сигнала на стадии восстановления, особенно заметная для ННЧ- F (см. рис. 4а, 5а).

В течение суток 7 сентября на начальной стадии «ночной» магнитной бури до её взрывной фазы коротковолновые сигналы принимались на обеих трассах во всём временном интервале. Как видно из рис. 4б, на субавроральной трассе диапазон частот прохождения $\Delta f = \text{МНЧ-}F - \text{ННЧ-}F$ несколько меньше по сравнению со спокойными условиями, что, вероятно, связано с ростом поглощения радиоволн в период высыпания заряженных частиц, о чём свидетельствуют результаты наблюдений свечения и данные риометров в Соданкюля и Оулу [21]. В этот день проявилось воздействие рентгеновских вспышек на прохождение коротковолновых сигналов. На более протяжённой субавроральной трассе в дневное время 10:11÷10:18 UT (вспышка M7.3) сигнал

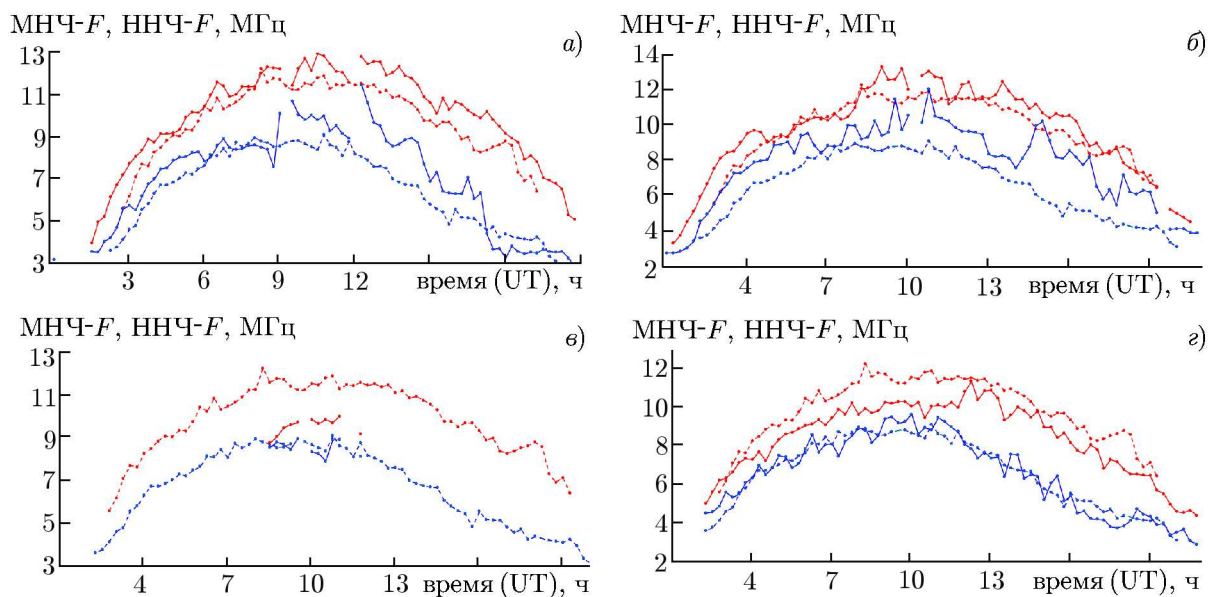


Рис. 4. Временной ход МНЧ- F (красные линии) и ННЧ- F (синие линии) во время магнитной бури (сплошные линии) и в спокойных условиях (штриховые линии) на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск 6–9 сентября 2017 года: (а) 06.09.2017, (б) 07.09.2017, (в) 08.09.2017, (г) 09.09.2017

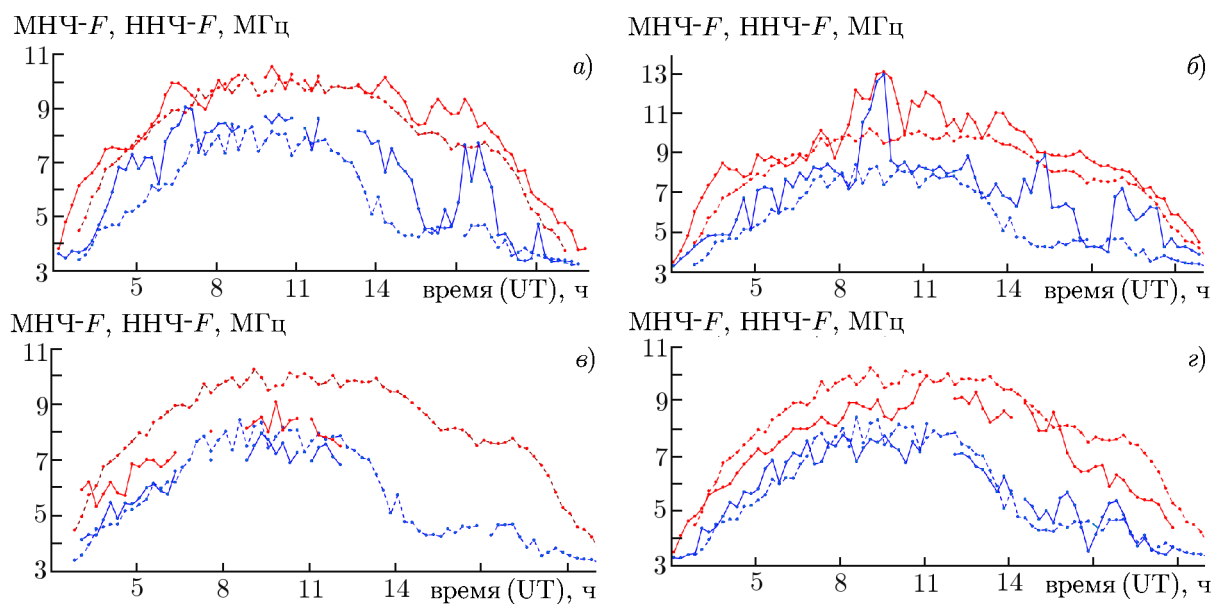


Рис. 5. Временной ход МНЧ- F (красные линии) и ННЧ- F (синие линии) во время магнитной бури (сплошные линии) и в спокойных условиях (штриховые линии) на среднеширотной трассе НИС «Горьковская»—Васильсурск 6–9 сентября 2017 года: (а) 06.09.2017, (б) 07.09.2017, (в) 08.09.2017, (г) 09.09.2017

не принимался. На среднеширотной трассе наблюдался рост ННЧ- F на $4\div 5$ МГц и существенно уменьшился (вплоть до отсутствия прохождения сигнала) диапазон частот $\Delta f = \text{МНЧ-}F - \text{ННЧ-}F$. В вечернее время 14:20÷14:55 UT (вспышка X1.3) сигнал принимался на обеих трассах, но наблюдался заметный рост ННЧ- F и имело место сужение (вплоть до отсутствия прохождения сигнала на среднеширотной трассе) диапазона частот Δf .

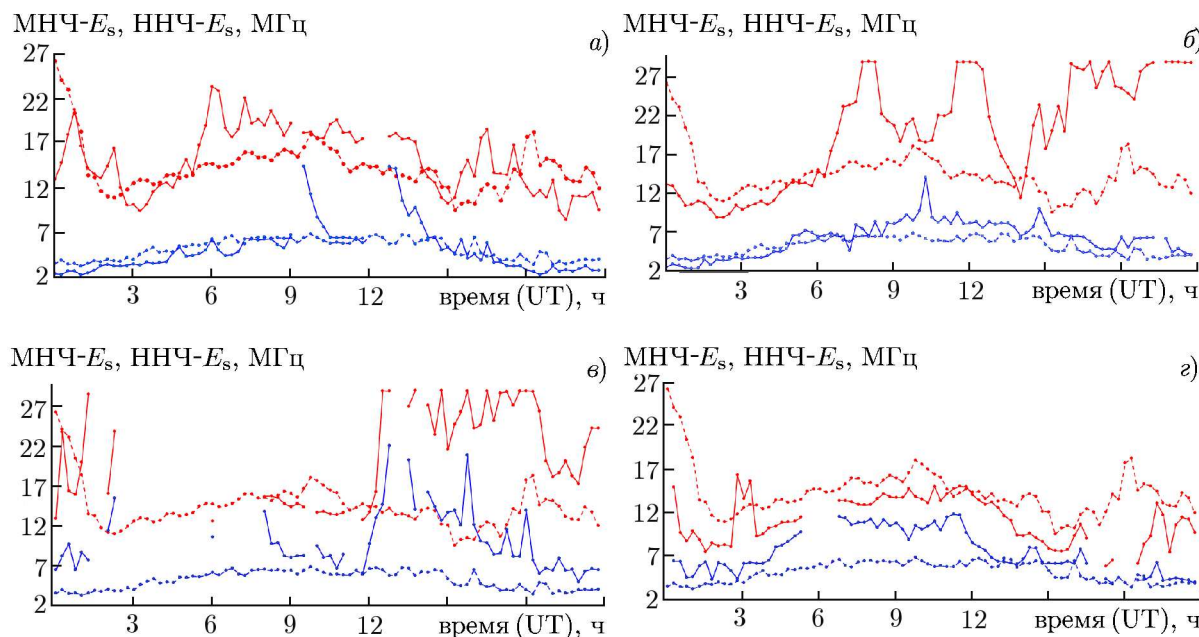


Рис. 6. Временной ход МНЧ- E_s (красные линии) и ННЧ- E_s (синие линии) во время магнитной бури (сплошные линии) и в спокойных условиях (штриховые линии) на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск 6–9 сентября 2017 года: (а) 06.09.2017, (б) 07.09.2017, (в) 08.09.2017, (з) 09.09.2017

В течение суток 8 сентября в главной фазе «ночной» магнитной бури и начальной фазе её восстановления до 08:30 UT на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск сигнал не принимался, что связано с отрицательной фазой бури и ростом поглощения. Отрицательная фаза магнитной бури, вызвавшая уменьшение МНЧ- F вплоть до блэкаута, обусловлена изменениями в термосферной циркуляции и молекулярном составе на высотах F -области из-за нагрева термосферы во время геомагнитных возмущений [20]. Сигнал начал приниматься с 08:30 UT до начала взрывной фазы «дневной» магнитной бури (11:50 UT). Значения МНЧ- F 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 03:00 до 06:30 UT и с 08:30 до 12:00 UT. На обеих трассах диапазон частот прохождения Δf был в 2–3 раза меньше, чем в невозмущённой ионосфере. Отсутствие сигнала 8 сентября после 12:00 UT связано с развитием отрицательной фазы «дневной» бури и ростом поглощения, о котором свидетельствовали данные риометров в Соданкюля и Оулу [21]. 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 соответственно, когда коротковолновые сигналы не принимались на обеих трассах.

В течение суток 9 сентября магнитная активность существенно снизилась, свечение не наблюдалось и, согласно данным риометра в Соданкюля, поглощение было на низком уровне около 1 дБ [21]. На обеих трассах сигнал принимался в течение всего временного интервала с 02:00 до 20:00 UT и во второй половине 9 сентября сигналы восстановились практически до невозмущённого уровня. В этот день на среднеширотной трассе в 10:50÷11:42 UT коротковолновые сигналы не принимались, что, вероятно, связано с воздействием рентгеновской вспышки класса M2.9.

С пространственно-временной изменчивостью высыпания заряженных частиц из магнитосферы во время магнитной бури связано существование спорадических слоёв в области E авроральной ионосферы.

На рис. 6 показан временной ход максимальной (МНЧ- E_s) и наименьшей (ННЧ- E_s) частот при распространении с отражением от слоя E_s для субавроральной трассы Ловозеро—Васильсурск. Из него видно, что 6 сентября после 06:00 UT значения МНЧ- E_s существенно (на $5\div 15$ МГц) больше, чем в невозмущенной ионосфере. При этом значительно возрастает диапазон частот прохождения коротковолновых сигналов через спорадический слой E_s . В течение суток 8 сентября после 02:00 UT на фазе восстановления «ночной» магнитной бури увеличилось поглощение и сигнал не принимался. После 12:00 UT наблюдался рост значений МНЧ- E_s и ННЧ- E_s . Из рис. 6б и 4в видно, что во время магнитной бури на субавроральной трассе реализуются более благоприятные условия для распространения коротковолновых сигналов посредством отражения от слоя E_s по сравнению с распространением через F -область возмущенной ионосферы, что можно использовать для нейтрализации отрицательного влияния магнитно-ионосферных возмущений на работу систем коротковолновой радиосвязи.

2.2. Период 14–17 сентября 2017 года

На рис. 7 и 8 для трасс Ловозеро—Васильсурск и НИС «Горьковская»—Васильсурск соответственно показан временной ход МНЧ- F и ННЧ- F для спокойных условий (штриховые линии) и периода магнитной активности с 14 по 17 сентября (сплошные линии), когда наблюдалось возмущение ионосферы. Как видно из рис. 7, в этот период на субавроральной трассе регистрировались существенные вариации временного хода основных параметров ионосферного коротковолнового канала по сравнению со спокойными условиями: в первую очередь, следует отметить существенное снижение значений МНЧ- F на $2\div 3$ МГц. Мы полагаем, что этот эффект связан с отрицательной фазой магнитной бури, начавшейся в 12:00 UT 14 сентября (см. рис. 3а), развитием серии магнитосферных суббурь 14–17 сентября (см. рис. 3б), усилением аврорального электроджета и ростом поглощения. Отсутствие сигнала с 15:00 UT 14 сентября и практически до 12:00 UT 15 сентября, с 15:00 UT 15 сентября до 07:00 UT 16 сентября и с 16:00 UT 16 сентября до 05:00 UT 17 сентября хорошо коррелирует с сильным поглощением радиоволн в эти периоды по данным риометров в Соданкюля и Оулу [21] (см. рис. 9). Данное поглощение обусловлено дополнительной ионизацией в нижней ионосфере при высыпании заряженных частиц из магнитосферы, когда с ростом магнитной активности зона аврорального поглощения смещается на более низкие широты [1]. При этом первая половина субавроральной трассы Ловозеро—Васильсурск проходит через область интенсивного поглощения в интервале широт от широты Соданкюля до широты Оулу. Как видно из рис. 7, развитие магнитосферных суббурь 15–17 сентября, обусловленных неоднократной сменой направления компоненты B_z с северного на южное и обратно (см. рис. 3б), привело к сильной деградации ионосферного коротковолнового канала, вплоть до блэкаута на длительных временных интервалах, и существенному сужению диапазона частот прохождения радиоволн $\Delta f = \text{МНЧ-}F - \text{ННЧ-}F$. Таким образом, учитывая предысторию солнечно-магнитной активности в первой декаде сентября 2017 года, когда существенно вырос поток протонов и наблюдались заметные вариации скорости солнечного ветра и межпланетного магнитного поля по величине и ориентации, можно сделать следующий вывод. Слабая по классификации [19] магнитная буря в последующий период привела к развитию отрицательного возмущения, снижению МНЧ- F , усилению поглощения и сильной деградации ионосферного коротковолнового канала на субавроральной трассе.

В отличие от субавроральной трассы, на среднеширотной трассе НИС «Горьковская»—Васильсурск коротковолновые сигналы, распространяющиеся через F -область, в основном принимались, но имел место эффект отрицательной фазы магнитной бури (см. рис. 8). Наиболее ярко он проявился 15 и 16 сентября, когда значения МНЧ- F заметно уменьшились по сравнению с невоз-

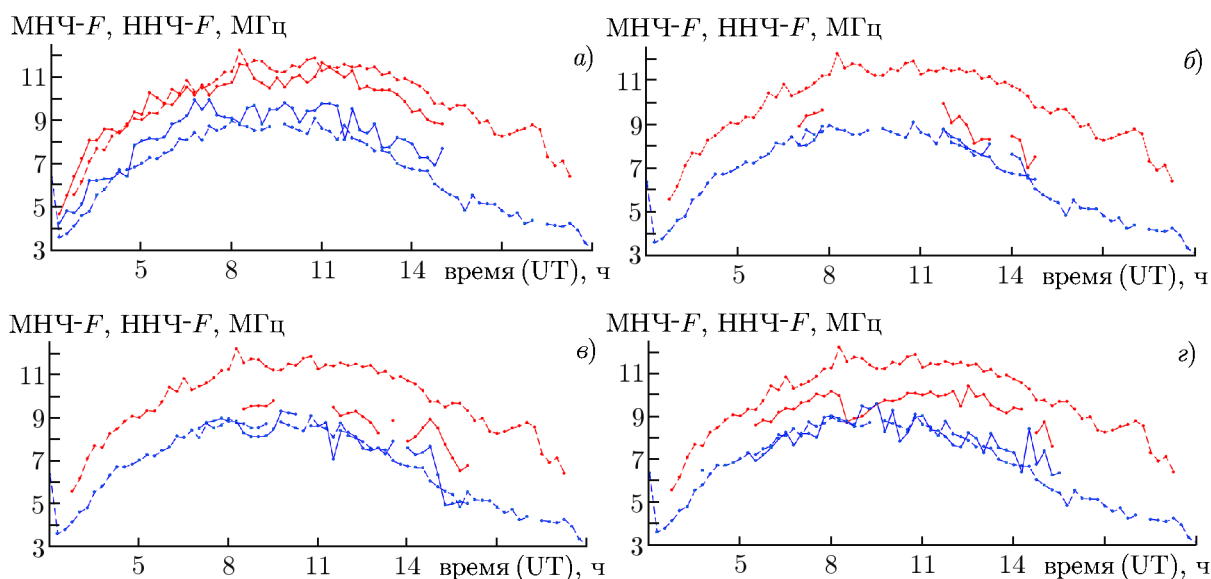


Рис. 7. Временной ход МНЧ- F (красные линии) и ННЧ- F (синие линии) для спокойных условий (штриховые линии) и периода магнитной активности с 14 по 17 сентября (сплошные линии) на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск: (а) 14.09.2017, (б) 15.09.2017, (в) 16.09.2017, (г) 17.09.2017

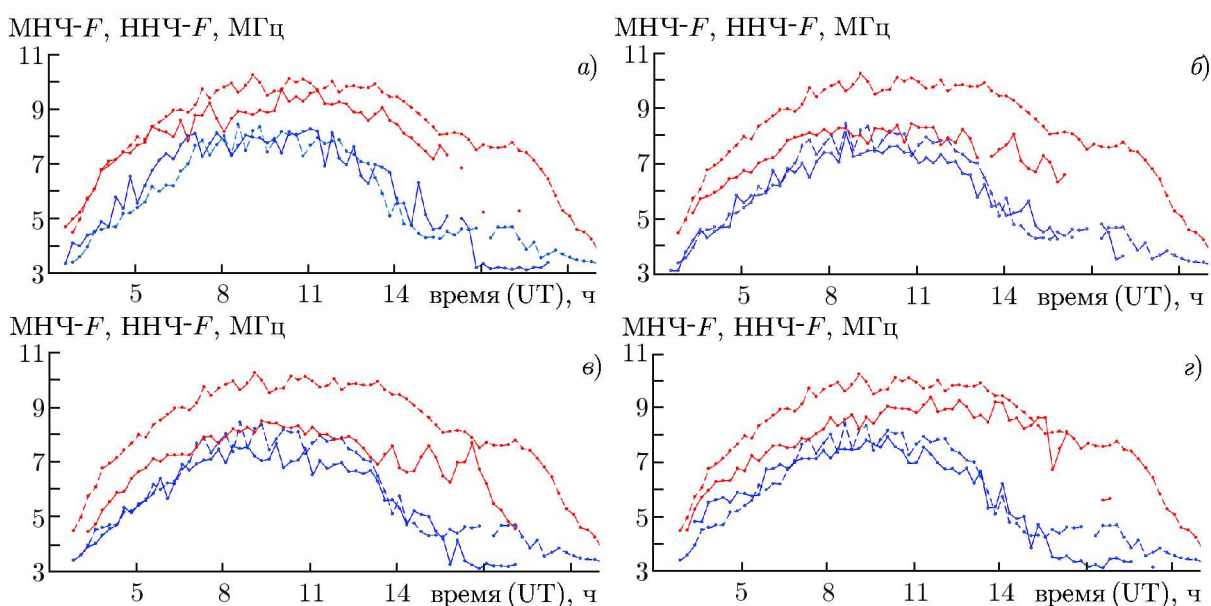


Рис. 8. Временной ход МНЧ- F (красные линии) и ННЧ- F (синие линии) для спокойных условий (штриховые линии) и периода магнитной активности с 14 по 17 сентября (сплошные линии) на среднеширотной трассе НИС «Горьковская»—Васильсурск: (а) 14.09.2017, (б) 15.09.2017, (в) 16.09.2017, (г) 17.09.2017

мущёнными условиями (на $1\div 2$ МГц), а диапазон частот прохождения Δf сузился с $3\div 4$ МГц до $1\div 2$ МГц. В этот период значения ННЧ- F практически не изменились по сравнению со спокойными условиями. Таким образом, на среднеширотной трассе влияние умеренной магнитной активности 14–17 сентября проявилось только в верхней ионосфере (отрицательная фаза магнитной бури).

Образование спорадических слоёв в E -области авроральной ионосферы во время магнитной

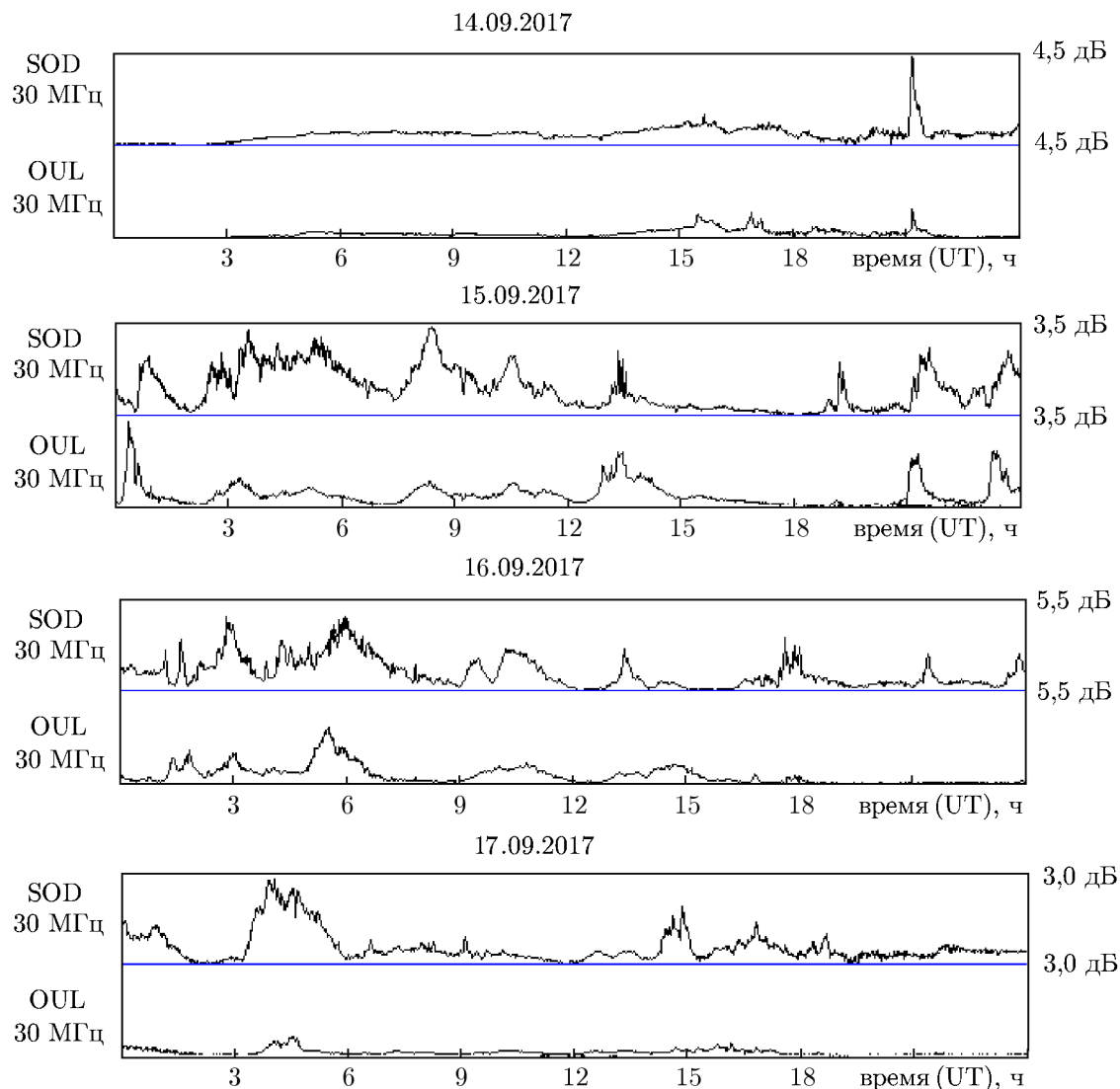


Рис. 9. Коэффициент поглощения радиоволн по данным риометров в Соданкюля ($67,4^\circ$ с. ш., $26,6^\circ$ в. д.) и Оулу ($65,0^\circ$ с. ш., $25,47^\circ$ в. д.) [21]

бури существенно влияет на распространение радиоволн на авроральных и субавроральных трассах.

На рис. 10а, б показан временной ход максимальной (МНЧ- E_s) и наименьшей (ННЧ- E_s) наблюдаемых частот моды E (E_s) на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск для периода активной фазы магнитной бури 14–17 сентября 2017 года. Из-за трудности разделения в ряде случаев мод E и E_s значения частот для этих мод объединены (в основном это мода E_s). В период магнитосферных суббурь развивается интенсивный спорадический слой E_s , при этом наблюдается рост МНЧ- E_s , что особенно проявилось в вечернее время с 15:00 до 20:00 UT 14 и 17 сентября, когда увеличение МНЧ- E_s по сравнению с невозмущёнными условиями достигало значений $7 \div 13$ МГц. Как видно из сравнения рис. 10 и рис. 7, в отличие от распространения через F -область, при распространении через слой E_s коротковолновые сигналы в основном принимались. Приёма сигналов не было только 15 и 16 сентября примерно с 02:00÷03:00 до 06:00÷07 UT и с 13:00÷14:00 до 17:00÷19:00 UT. В течение суток 17 сентября сигнал принимался в течение всего времени наблюдений, при этом с 18:00 до 20:00 UT наблюдался резкий рост МНЧ- E_s .

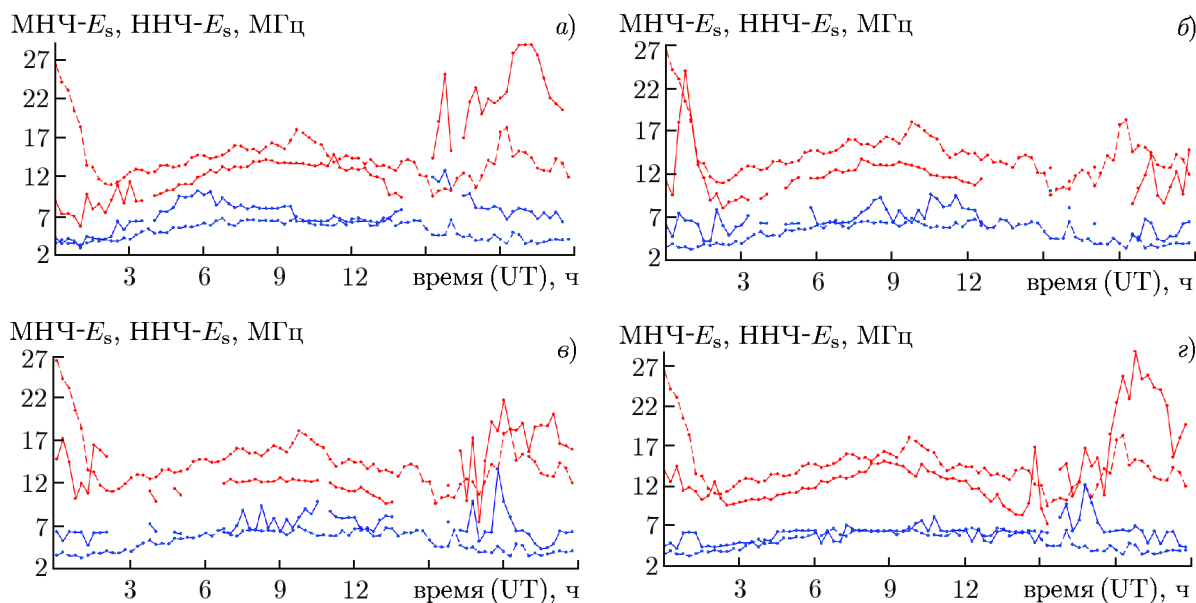


Рис. 10. Временной ход МНЧ- E_s (красные линии) и ННЧ- E_s (синие линии) во время магнитной бури (сплошные линии) и в спокойных условиях (пунктирные линии) на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск: (а) 14.09.2017, (б) 15.09.2017, (в) 16.09.2017, (з) 17.09.2017

Таким образом, во время слабой магнитной бури и серии магнитосферных суббурь условия распространения коротковолновых сигналов на субавроральной трассе через спорадический слой E_s были существенно лучше, чем распространение модой F через верхнюю ионосферу.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Ионосферные эффекты геомагнитной активности проявляются сначала в высоких широтах в результате магнитосферно-ионосферного взаимодействия электрического и магнитного полей в условиях усиления солнечного ветра и высыпания заряженных частиц. Вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля играют ключевую роль в развитии магнитной бури [3].

В течение суток 7 сентября примерно в 00:00 UT произошёл скачок скорости солнечного ветра с 400 до 600 км/с и резкое изменение направления компоненты B_z межпланетного магнитного поля с северного на южное. Скачок скорости с 480 до 800 км/с произошёл также 8 сентября в 00:00 UT. Эти резкие возрастания можно отождествить с ударной волной и её воздействием на магнитосферу. С поворотом B_z -компоненты к югу в магнитосфере усиливается крупномасштабное электрическое поле конвекции, которое приводит к увеличению энергии солнечного ветра, поступающей в магнитосферу, и к возникновению магнитосферных суббурь.

В течение суток 14 сентября в 15:00 UT произошёл скачок скорости солнечного ветра с 400 до 680 км/с. В период 14–17 сентября имела место неоднократная смена направления B_z -компоненты с северного на южное и обратно, что вызвало последовательность магнитосферных суббурь.

Во время магнитной бури имеются отличия в поведении электронной концентрации в различных ионосферных слоях. В результате высыпания заряженных частиц и усиления авроральных токов реакция нижней ионосферы (слои D и E) проявляется в увеличении электронной концентрации и росте поглощения радиоволн. В верхней ионосфере (F -слой) имеет место как уменьшение, так и рост электронной концентрации. Наибольшую опасность для прохождения сигнала

представляет отрицательная фаза ионосферных возмущений, которая приводит к уменьшению максимальных наблюдаемых частот при распространении сигнала в виде F -моды, сокращению диапазона используемых рабочих частот связи и ограничению возможности управления частотным ресурсом радиолиний.

Магнитные бури и магнитосферные суббури, имевшие место 7–8 и 14–17 сентября, существенно повлияли на распространение коротковолновых сигналов на субавроральных и среднеширотной трассах и привели к сокращению диапазона частот прохождения сигналов и деградации ионосферного канала.

В период 6, 7 и 9 сентября во время воздействия рентгеновских вспышек на нижнюю ионосферу и увеличения поглощения радиоволн коротковолновые сигналы не принимались. Длительность временного интервала непрохождения сигнала зависела от мощности вспышки и варьировалась от $10 \div 15$ до $30 \div 40$ мин.

На субавроральных трассах Ловозеро–Васильсурск, Соданкюля–Васильсурск, Салехард–Васильсурск и Диксон–Васильсурск и, в меньшей степени, на среднеширотной трассе НИС «Горьковская»–Васильсурск 6 сентября до начала магнитной бури в течение всего временного интервала прохождения коротковолновых сигналов с 01:00 до 21:00 UT наблюдался предбуревой эффект возрастания $MUF-F$. В среднем увеличение $MUF-F$ на различных трассах по сравнению со средним (спокойным) уровнем достигало $8 \div 22\%$.

В течение суток 7 сентября сигналы принимались на обеих трассах (Ловозеро–Васильсурск и НИС «Горьковская»–Васильсурск) практически в течение всего времени наблюдений с 02:00 до 21:00 UT. На субавроральной трассе регистрировался рост $MUF-F$ и уменьшение диапазона частот прохождения сигналов $\Delta f = MUF-F - M3000-F$ с $2 \div 4$ до $1 \div 2$ МГц.

На субавроральной трассе 8 сентября вследствие отрицательной фазы магнитной бури, усиления авроральных токов и роста поглощения сигналы не принимались до 08:30 и после 11:00 UT. Эти периоды совпадали с периодами, когда компонента B_z была направлена на юг и авроральный индекс АЕ был высоким. Во время приёма коротковолновых сигналов с 08:30 до 11:00 UT, когда компонента B_z имела северное направление, коротковолновые сигналы принимались, но диапазон частот прохождения сигналов Δf уменьшился с 3 до 1 МГц.

По сравнению с субавроральной трассой, на среднеширотной трассе 8 сентября сигналы принимались более длительное время с 02:30 до 12:00 UT, но диапазон частот Δf сократился с 2,0 до $0,5 \div 1,0$ МГц. Более длительный период приёма коротковолновых сигналов на среднеширотной трассе обусловлен меньшим поглощением радиоволн.

При образовании сильных спорадических слоёв E_s во время магнитной бури появляется возможность использовать для радиосвязи в высокоширотной ионосфере канал распространения с отражением от слоя E_s . Так, на субавроральной трассе 8 сентября, в отличие от плохого распространения через F -слой, в течение достаточно длительного времени с 00:00 до 02:30 UT и с 08:00 до 21:00 UT сигнал принимался с отражением от слоя E_s . При этом с 12:00 UT наблюдался резкий рост значений $MUF-E_s$ на $7 \div 15$ МГц и рост $M3000-E_s$ на $3 \div 10$ МГц по сравнению с невозмущёнными условиями. Диапазон частот Δf увеличился с $6 \div 8$ до $10 \div 15$ МГц.

Во время магнитной активности 14–17 сентября на субавроральной трассе наблюдалось снижение $MUF-F$ на $2 \div 3$ МГц по сравнению со спокойными условиями. Этот ионосферный эффект обусловлен отрицательной фазой магнитной бури, начавшейся в 12:00 UT 14 сентября, развитием серии магнитосферных суббурь, усилением аврорального электроджета и ростом поглощения радиоволн. Отсутствие сигнала в эти дни хорошо коррелирует с сильным поглощением радиоволн по данным риометров в Соданкюля и Оулу. Развитие магнитосферных суббурь 15–17 сентября, обусловленных неоднократной сменой направления компоненты B_z с северного на южное и обратно, привело к сильной деградации ионосферного коротковолнового канала и существенному

сужению диапазона частот прохождения радиоволн $\Delta f = \text{МНЧ-}F - \text{ННЧ-}F$.

В отличие от субавроральной трассы, на среднеширотной трассе НИС «Горьковская»—Васильсурск коротковолновые сигналы, распространяющиеся через F -область, в основном принимались, но имел место ионосферный эффект отрицательной фазы магнитной бури, когда 15 и 16 сентября значения $\text{МНЧ-}F$ уменьшились на $1 \div 2$ МГц по сравнению с невозмущёнными условиями, а диапазон частот прохождения Δf сузился с $3 \div 4$ МГц до $1 \div 2$ МГц. В этот период значения $\text{ННЧ-}F$ практически не изменились по сравнению со спокойными условиями. Таким образом, на среднеширотной трассе влияние умеренной магнитной активности 14–17 сентября проявилось только в верхней ионосфере, когда наблюдалась отрицательная фаза магнитной бури.

Отметим, что ионосферные эффекты отрицательной фазы магнитной бури и роста поглощения радиоволн, проявляющиеся в уменьшении $\text{МНЧ-}F$, сокращении диапазона частот Δf и временного интервала прохождения коротковолновых сигналов, наблюдались в сентябрьском эксперименте на всех субавроральных трассах, т. е. ионосферный канал был подвержен деградации в обширном Евразийском регионе России, где проходят линии коротковолновой радиосвязи. В то же время на всех субавроральных трассах во время магнитных бурь за счёт образования сильного спорадического слоя E_s существенно улучшились условия распространения с отражением от этого слоя по сравнению с распространением сигнала в виде F -моды через верхнюю ионосферу.

Для иллюстрации особенностей распространения коротковолновых сигналов на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск во время магнитной бури 8 сентября на рис. 11а показан временной ход диапазона частот прохождения сигналов Δf с отражением от F -области (красный фон) и с отражением от спорадического слоя E_s (синий фон). Из рисунка видно, что во время сильной бури распространение сигнала в виде F -моды имело место только в течение небольшого интервала времени с 08:30 до 11:00 UT, приходящегося на фазу восстановления «ночной» бури до начала главной фазы «дневной» бури, в узких частотных диапазонах $\Delta f \approx 8,8 \div 10,0$ и $\Delta f \approx 8,5 \div 9,0$ МГц.

Сужение диапазона частот прохождения сигналов Δf при распространении F -модой происходит, с одной стороны, за счёт уменьшения электронной концентрации в верхней ионосфере во время отрицательной фазы магнитной бури (при $D_{st} < 0$), что приводит к уменьшению $\text{МНЧ-}F$. С другой стороны, за счёт роста поглощения радиоволн в нижней ионосфере во время высыпания заряженных частиц и роста электронной концентрации увеличиваются значения $\text{ННЧ-}F$.

В то же время, как видно из рис. 11а, при наличии в авроральной ионосфере сильного спорадического слоя E_s с высокой электронной концентрацией, реализуется возможность распространения коротковолновых сигналов с отражением от слоя E_s в существенно большем временном интервале и диапазоне частот Δf . Таким образом, образование спорадического слоя E_s во время магнитной бури существенно расширяет возможности управления частотным ресурсом радиолиний для обеспечения надёжной коротковолновой радиосвязи на высокоширотных трассах.

Во время слабой бури 15 сентября также наблюдалось сокращение диапазона частот Δf при отражении от F -области и лучшие условия распространения с отражением от спорадического слоя E_s (см. рис. 11б), но диапазон частот Δf с отражением от слоя E_s был меньше, чем для сильной бури 8 сентября.

Сравнение воздействия на ионосферный коротковолновый канал двух магнитных бурь с различными интенсивностями (сильной 7–8 сентября и слабой 14–17 сентября) показывает, что эффект отрицательной фазы бури в ионосфере (уменьшение $\text{МНЧ-}F$, сокращение временного интервала прохождения сигналов, вплоть до блэкаута), а также её проявление на субавроральных и средних широтах хорошо коррелирует с авроральным индексом АЕ. Ионосферные проявления

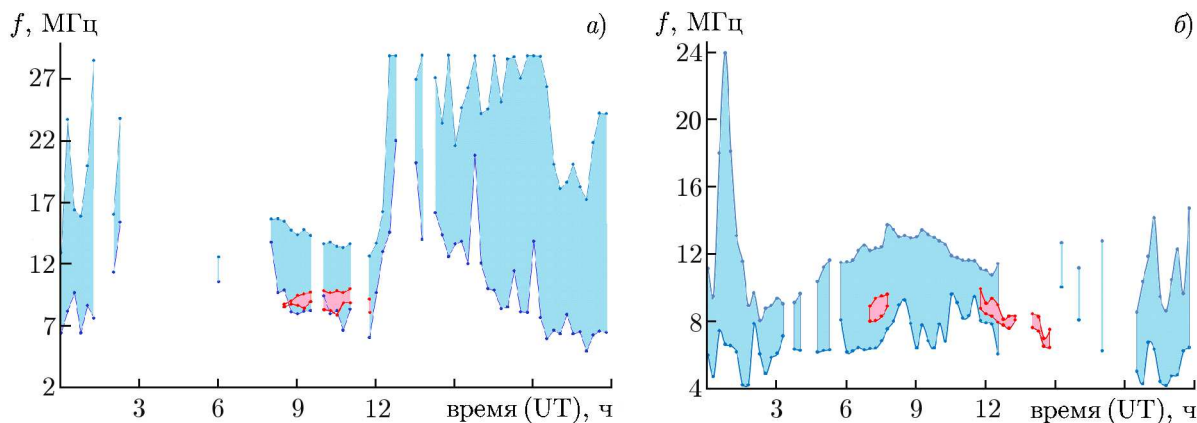


Рис. 11. Временной ход диапазона частот прохождения сигналов $\Delta f = \text{MNЧ-F} - \text{NNЧ-F}$ (красный фон) и $\Delta f = \text{MNЧ-E}_s - \text{NNЧ-E}_s$ (синий фон) на субавроральной трассе Ловозеро—Васильсурск во время сильной бури 8 сентября (а) и слабой бури 15 сентября (б)

отрицательной фазы ослабевают с уменьшением индекса АЕ и с переходом от субавроральных к средним широтам: для первой бури $\text{АЕ} \approx 1\,200 \div 1\,400$ нТл, для второй $\text{АЕ} \approx 700 \div 1\,000$ нТл. Полученные результаты согласуются с выводами работы [22] о зависимости ионосферных эффектов отрицательной фазы бури от магнитного возмущения.

Результаты исследования распространения коротковолновых сигналов на субавроральных и среднеширотной трассах в Евразийском регионе позволяют сделать вывод, что для обеспечения надёжной коротковолновой радиосвязи в условиях геомагнитных возмущений, когда ионосферный канал подвержен плохо прогнозируемым значительным вариациям, необходимо осуществлять оперативный контроль условий распространения радиоволн с помощью современных средств наклонного зондирования для получения данных о диапазоне ионосферных изменений в различных гелиогеофизических условиях.

Учитывая особенности формирования в высокоширотной ионосфере каналов распространения сигналов в условиях магнитно-ионосферных возмущений, для обеспечения надёжной работы радиоэлектронных систем в стратегически важных районах Крайнего Севера, представляется разумным расширить частотный диапазон ЛЧМ-ионозонда до $50 \div 60$ МГц. Расширение диапазона частот крайне важно для высокоширотных трасс, где имеет место авроральное поглощение, связанное с высыпанием частиц, и наблюдается эффект блэкаута коротких волн во время сильных возмущений. В то же время высыпание частиц сопровождается образованием развитой неоднородной структуры и интенсивного спорадического слоя E_s . При этом за счёт рассеяния радиоволн на ионосферных неоднородностях и отражения от слоя E_s на частотах $30 \div 60$ МГц может быть реализован дополнительный канал радиосвязи.

Авторы благодарят всех сотрудников, обеспечивавших работу ЛЧМ-передатчиков, сервисную службу World Data Center for Geomagnetism (Киото, Япония) за возможность получения данных по индексам D_{st} и АЕ и сервисную службу Space Weather Prediction Center (США) за возможность получения данных GOES Satellite X-ray и данных ACE по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, а также сервисную службу Sodankylä Geophysical Observatory (Финляндия) 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

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.
2. Berkeley F. T., Driatsky V. M., Henriksen K., et al. // Planet. Space Sci. 1974. V. 22. P. 255.
3. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.
4. Kazimirovsky E. S. // Ann. Geophys. 2002. V. 45, No. 1. P. 1.
5. Earl G. F., Ward B. D. // Radio Sci. 1987. V. 22, No. 2. P. 275.
6. Богута Н. М., Иванов В. А., Нога Ю. В. и др. // Радиотехника. 1993. № 4. С. 77.
7. Пономарчук С. Н., Куркин В. И., Пензин М. С. // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 61.
8. Lane G. // Proc. Ionospheric Effects Symposium. Alexandria, USA, 3–5 May, 2005. P. 280.
9. Goodman J. M., Ballard J. W., Patterson J. D., Gaffney B. // Radio Sci. 2006. V. 41, No. 6. Art. no. RS6S41.
10. Ivanov V. A., Ryabova N. V., Shumaev V. V., Uryadov V. P. // Radio Sci. 1997. V. 32, No. 3. P. 983.
11. Урядов В. П., Выборнов Ф. И., Першин А. В. // Изв. Вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 12. С. 975.
12. Wagner L. S., Goldstein J. A., Rupar M. A., Kennedy E. J. // Radio Sci. 1995. V. 30, No. 3. P. 659.
13. Angling M. J., Cannon P. S., Davies N. C. et al. // Radio Sci. 1998. V. 33, No. 1. P. 97.
14. Milan S. E., Lester M., Jones T. B., Warrington E. M. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 60. P. 617.
15. Урядов В. П., Куркин В. И., Вертоградов Г. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 12. С. 1041.
16. Uryadov V. P., Vybornov F. I., Kolchev A. A., et al. // Adv. Space Res. 2018. V. 61, No. 7. P. 1837.
17. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>.
18. <http://www.swpc.noaa.gov/>.
19. Gonzalez W. D., Joselyn J. A., Kamide Y., et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, No. A4. P. 5771.
20. Данилов А. Д. // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 1.
21. <http://www.sgo.fi/>.
22. Данилов А. Д., Белик Л. Д. // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31, № 2. С. 209.

Поступила в редакцию 24 января 2019 г.; принята в печать 28 февраля 2019 г.

FEATURES OF THE HF SIGNAL PROPAGATION ON OBLIQUE SOUNDING PATHS DURING SOLAR AND MAGNETIC ACTIVITY IN SEPTEMBER 2017

V. P. Uryadov, F. I. Vybornov, and A. V. Pershin

We present the results of studying the influence of solar and magnetic activity in September 2017 on the HF signal characteristics on subauroral and midlatitude paths. A connection between the ionospheric effects caused by the magnetic storm and the magnetic disturbance intensity is established. It is shown that the formation of a strong sporadic E_s layer in the auroral ionosphere during a magnetic storm makes it possible to use the propagation mode with reflection from E_s in the interests of HF communication to neutralize the effects of the negative phase of the storm and absorption growth when unfavorable conditions for the F -mode propagation with reflection from the upper ionosphere occur.