УДК 550.388.2

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ИОНОСФЕРНЫЙ КОРОТКОВОЛНОВЫЙ КАНАЛ СИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ И ДВУХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК В ПЕРИОД ЛЕТНЕГО СОЛНЦЕСТОЯНИЯ 2015 ГОДА ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЕВРОАЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ

В. П. Урядов ^{1,2}*, А. А. Колчев ³, Г. Г. Вертоградов ⁴, Ф. И. Выборнов ¹, И. А. Егошин ⁵, М. С. Скляревский ⁴, В. В. Шумаев ⁶, А. Г. Чернов ⁶

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

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

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань;

⁴ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;

⁵ Марийский госуниверситет, г. Йошкар-Ола;

⁶ ООО «СИТКОМ», г. Йошкар-Ола, Россия

Представлены результаты наблюдений воздействия сильной магнитной бури и двух рентгеновских вспышек во время летнего солнцестояния 2015 года на характеристики коротковолновых сигналов наклонного зондирования ионосферы в Евроазиатском регионе. Установлено, что отрицательная фаза магнитной бури привела к сильной деградации ионосферного канала, вплоть до длительного блэкаута на трассах, примыкающих к субавроральным широтам. На среднеширотных трассах уменьшение максимальной наблюдаемой частоты слоя F достигало 50% относительно средних значений для невозмущённой ионосферы. Определена скорость распространения отрицательной фазы возмущения от субавроральной к среднеширотной ионосфере (примерно 100 м/с). Показано, что во время магнитной бури наименьшая наблюдаемая частота и среднее отношение сигнал/шум для моды распространения через спорадический слой E_s хорошо коррелируют с авроральным индексом AE. На главной фазе магнитной бури на трассе Кипр—Ростов-на-Дону при работе ионозонда-радиопеленгатора в режиме загоризонтного коротковолнового радара обнаружены аномальные сигналы. На основе моделирования и сопоставления с экспериментальными данными показано, что эти сигналы обусловлены рассеянием радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях, расположенных в F-области субавроральной ионосферы.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на развитие спутниковых и волоконных линий связи, коротковолновая радиосвязь по-прежнему играет важную роль в решении прикладных задач ионосферного распространения радиоволн. Её преимущества заключаются в большой дальности действия, высокой мобильности и низкой стоимости по сравнению с другими видами связи.

Основная проблема коротковолновой радиосвязи — это нестационарность ионосферного радиоканала, обусловленная, в первую очередь, воздействием различного рода возмущений естественного и искусственного происхождения (вспышки на Солнце, выбросы корональной массы, магнитные бури, прохождение терминатора, солнечные затмения, промышленные взрывы, старты ракет, нагрев ионосферы и др.) и помехами, создаваемыми посторонними радиостанциями. Ионосферные возмущения, вызванные магнитной бурей, приводят к изменению регулярного распределения электронной концентрации, росту поглощения, усилению ионосферных неоднородностей, появлению аномальных сигналов. Всё это, вместе с изменением уровня помех, отрицательно влияет на работу радиоэлектронных систем различного назначения.

^{*} uryadov.vp@nirfi.unn.ru

Многообразие физических процессов во время магнитной бури в системе Солнце—магнитосфера—ионосфера—атмосфера (солнечный ветер, возмущение межпланетного магнитного поля и магнитосферных электрических полей, высыпание заряженных частиц, термосферные ветры, перемещающиеся атмосферные возмущения) сильно затрудняет построение моделей, адекватно отражающих особенности развития магнитной бури в различных условиях. В этой связи значительный научный и практический интерес представляет проведение регулярных наблюдений с использованием различных средств и методов измерений. При этом особенное внимание уделяется использованию наклонного зондирования ионосферы как наиболее информативного метода получения оперативных данных о состоянии ионосферного канала на обширной территории в реальном времени.

В статье представлены результаты исследования воздействия на ионосферный канал сильной магнитной бури и двух рентгеновских вспышек, имевших место в период летнего солнцестояния 2015 года. Измерения проводились на сети трасс наклонного зондирования ионосферы в Евроазиатском регионе.

Актуальность исследований определяется ещё тем обстоятельством, что коротковолновый диапазон весьма чувствителен к вариациям ионосферных параметров, обусловленных воздействием ионосферных возмущений, вызванных магнитной бурей. При этом одновременные измерения вариаций характеристик коротковолновых сигналов на обширной территории могут служить индикатором для прогнозирования эффектов космической погоды и их влияния на работу радиоэлектронных систем различного назначения и в более высокочастотных диапазонах [1].

Полученные в ходе исследований результаты показывают существенное влияние сильной магнитной бури и рентгеновских вспышек на распространение коротковолновых сигналов, вплоть до длительного блэкаута на трассах, значительные части которых пролегают в субавроральной области ионосферы.

1. ВАРИАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРНОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО КАНАЛА НА ТРАССАХ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЕВРОАЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ

Изучению реакции ионосферы на геомагнитную активность, обусловленную солнечными вспышками, посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ (см., например, [2–4] и цитируемую там литературу). Возмущение ионосферы во время магнитных бурь зависит от многих параметров, таких как интенсивность бури, широта, местное время, фаза солнечной активности, сезон и ряда других. Ионосферные эффекты магнитных бурь изменяются с широтой, поскольку в различных широтных областях ионосферы доминируют различные процессы, например конвекция плазмы в области полярной шапки, высыпание частиц и электродинамические явления в авроральной зоне, термосферная циркуляция на субавроральных и средних широтах [5]. Вследствие сложности явления, для получения более полной картины развития ионосферных возмущений во время магнитной бури большое внимание уделяется проведению комплексных исследований с помощью различных средств и методов наблюдений. В экспериментах используются ионозонды вертикального и наклонного зондирования, проводятся зондовые измерения с борта спутников DMSP и TOPEX, измерения полного электронного содержания (ПЭС) на сети станций GPS и др. [6, 7]. В исследованиях ионосферных возмущений важную роль играет метод наклонного зондирования. Он позволяет изучать характеристики коротковолновых сигналов при их распространении на трассах с различными протяжённостями и ориентациями на обширной территории, подверженной воздействию возмущений.

Ионосферные эффекты геомагнитной активности проявляются сначала в высоких широтах

в результате изменения конфигурации межпланетного магнитного поля, взаимодействия электрического и магнитного полей магнитосферы и ионосферы в условиях усиления солнечного ветра и высыпания заряженных частиц [8]. Во время магнитной бури имеются различия в поведении электронной концентрации в различных ионосферных слоях. Реакция нижней ионосферы (слои D и E) проявляется в увеличении концентрации электронов и связанном с ним ростом поглощения радиоволн. В верхней ионосфере (F-слой) наблюдаются как понижение, так и рост электронной концентрации, эти явления называют положительной и отрицательной фазами бури соответственно [9]. Наибольшую опасность представляет отрицательная фаза ионосферных возмущений, когда во время сильных магнитных бурь область пониженией электронной концентрации распространяется на средние и низкие широты, где пролегают основные каналы декаметровой радиосвязи. Это приводит к уменьшению максимальных наблюдаемых частот, сужению диапазона используемых рабочих частот связи и ограничению возможности управления частотным ресурсом радиолиний.

Во время ионосферных возмущений в области высыпания энергичных частиц вблизи южной границы аврорального овала усиливаются ионосферные неоднородности [2, 10], что приводит к рассеянию сигналов и появлению аномальных сигналов с задержками, значительно превышающими задержки основных мод, распространяющихся вдоль дуги большого круга [11]. Уровень таких сигналов достаточно высок, и они оказывают существенное влияние на работу систем связи, загоризонтной коротковолновой радиолокации, радиопеленгации и радионавигации.

Среди комплекса средств, предназначенных для изучения ионосферы и её влияния на распространение радиоволн, особое место занимают технические средства наклонного зондирования. Во-первых, одновременное зондирование на трассах с различными протяжённостями и ориентациями (при наличии развитой сети станций наклонного зондирования) позволяет осуществлять диагностику среды распространения и контролировать динамику распространения возмущений в различных долготно-широтных секторах. Во-вторых, оперативное зондирование позволяет получать сведения о состоянии ионосферного коротковолнового канала в реальном времени и, следовательно, адаптировать системы коротковолновой радиосвязи и загоризонтной радиолокации к текущему состоянию ионосферы, что особенно актуально для стратегически важных высокоширотных районов Крайнего Севера и Северной Атлантики. В-третьих, использование уникального инструмента — ионозонда-радиопеленгатора с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ)-сигнала позволяет позиционировать области отражения/рассеяния, ответственные за появление аномальных сигналов [12, 13] и исследовать их динамику в различные фазы возмущения. Это важно для прогнозирования эффектов космической погоды применительно к решению научных и практических задач физики ионосферы и магнитосферы и распространения радиоволн.

В данной работе представлены результаты наблюдений вариаций характеристик коротковолновых сигналов на обширной территории Евроазиатского региона во время сильной магнитной бури и двух рентгеновских вспышек в период летнего солнцестояния 2015 года.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

На протяжении многих лет ведутся патрульные наблюдения на сети трасс наклонного ЛЧМзондирования ионосферы в Евроазиатском регионе. Передатчики сигнала с ЛЧМ расположены в следующих пунктах: Ловозеро Мурманской обл. (68° с. ш., 35,02° в. д.), Салехард (66,5° с. ш., 66,6° в. д.), Соданкюля, Финляндия (67,4° с. ш., 26,6° в. д.), Хабаровск (47,6° с. ш., 134,7° в. д.), Кипр (34,6° с. ш., 33° в. д.). Приём ЛЧМ-сигналов проводится в Нижнем Новгороде (56,1° с. ш., 44,1° в. д.) и Йошкар-Оле (56,62° с. ш., 47,87° в. д.) с помощью модернизированного ЛЧМионозонда [14] и в Ростове-на-Дону (47,3° с. ш., 39,7° в. д.) с помощью ЛЧМ-ионозонда радиопе-

Передающая станция	Диапазон частот,	Скорость,	Период зондирования,	
	МΓц	к Γ ц $/c$	МИН	
Ловозеро	$2 \div 29$	550	15	
Салехард	$2 \div 29$	550	15	
Соданкюля	3÷16	500	1	
Хабаровск	$2 \div 29$	500	15	
Кипр	8÷32	100	5	

Таблица 1

Таблица 2

N⁰	Tpacca	Длина, км	Географические координаты	Геомагнитная широта	
			средней точки трассы	средней точки трассы	
1	Ловозеро—	1 4 2 0	62°26′36″ с. ш.	58,27° с. ш.	
	Йошкар-Ола		42°39′41″ в. д.		
2	Ловозеро—	2 3 2 0	57°40′12″ с. ш.	53,5° с. ш.	
	Ростов-на-Дону		38°1′41″ в. д.		
3	Хабаровск—	5615	55°28′18″ с. ш., 118°45′47″ в. д.	50,3° с. ш.	
	Йошкар-Ола		(первый скачок)		
			60°24′5″ с. ш., 96°44′51″ в. д.		
			(центр трассы)	55,67° с. ш.	
			60°50′12″ с. ш., 70°53′50″ в. д.	56,8° с. ш.	
			(второй скачок)		
4	Хабаровск—	6658	55°17′12″ с. ш., 113°57′41″ в. д.	50,3° с. ш.	
	Ростов-на-Дону		(первый скачок)		
			58°11′41″ с. ш., 87°1′18″ в. д.		
			(центр трассы)	53,68° с. ш.	
			55°6′ с. ш., 60°12′58″ в. д.		
			(второй скачок)	51,2° с. ш.	
5	Кипр—	2 4 9 2	45°28′47″ с. ш.	40,74° с. ш.	
	Нижний Новгород		37°28′48″ в. д.		
6	Кипр—	1 4 3 0	40°59′53″ с. ш.	35,73° с. ш.	
	Ростов-на-Дону		36°1′34″ в. д.		

ленгатора [15]. Параметры ЛЧМ-передатчиков приведены в табл. 1, а в табл. 2 указаны характеристики трасс зондирования.

В статье представлены результаты патрульных наблюдений с 1 по 30 июня 2015 года, причём основное внимание уделено наблюдениям в период летнего солнцестояния с 20 по 30 июня. В этот период произошло наложение двух гелиогеофизических явлений — сильной магнитной бури и двух рентгеновских вспышек. Представлены результаты наблюдений на трассах, охватывающих обширный регион от Ловозера на северо-западе до Хабаровска на востоке и Кипра на юге. В дальнейшем будет проведён детальный анализ данных, полученных на сравнительно близко расположенных трассах в Европейском долготном секторе.

3. ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Магнитная буря в период проведения патрульных измерений имела все признаки классической бури. Она началась в 18:00 UT 21.06.2015 с резкого возрастания индекса $D_{\rm st}$, начальная фаза



магнитной бури продолжалась примерно до 14:00 UT 22.06.2015. Далее с резкого уменьшения индекса $D_{\rm st}$ началась главная фаза магнитной бури, которая продолжалась до 05:00 UT 23.06.2015, когда индекс $D_{\rm st}$ достиг минимального значения -204 нТл. Затем началась фаза восстановления, продолжавшаяся в течение нескольких дней, вплоть до 30.06.2015 (см. рис. 1*a*).

На рис. 16 показан временно́й ход компоненты B_z межпланетного магнитного поля, южное направление которой определяет поступление энергии солнечного ветра внутрь магнитосферы посредством механизма пересоединения [8]. Как видно из рисунка, в 18:00 UT 22 июня величина B_z резко изменилась с 0 до -30 нТл. По данным спутника АСЕ в это же время произошёл

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Г. Г. Вертоградов и др.

скачок скорости солнечного ветра с 370 до 680 км/с. Далее, как видно из рис. 16, имел место колебательный процесс с резкой сменой направления B_z с южного на северное и обратно. Затем, в течение примерно 12 час с 00:00 до 12:00 UT 23 июня, B_z -компонента имела южную ориентацию: $B_z \approx -20 \div -8$ нТл. Из рис. 16 видно, что на фазе восстановления после бури было три периода с южным направлением B_z : с 00:00 до 09:00 UT 24 июня, $B_z \approx -5 \div -4$ нТл; с 06:00 до 15:00 UT 25 июня, $B_z \approx -7$ нТл и с 00:00 до 09:00 UT 28 июня, $B_z \approx -5$ нТл.

На фазе восстановления магнитной бури произошло несколько магнитосферных суббурь, обусловленных ускорением плазмы и генерацией электрического тока за счёт энергии магнитного поля, запасённой в хвосте магнитосферы [8]. Исследования показывают, что начало развития суббури не всегда чётко и однозначно идентифицируется [8, 18]. В данном случае магнитосферные суббури были идентифицированы по поведению магнитного $D_{\rm st}$ и аврорального AE (см. рис. 1*6*) индексов как чувствительных индикаторов магнитной бури. Из рис. 1*6* видно, что примерно с 05:15 UT 22 июня резко возрастал авроральный индекс, наиболее сильный рост имел место 22–26 и 28 июня.

Наиболее продолжительное воздействие на ионосферный канал оказала магнитосферная суббуря с началом примерно в 06:00 UT 25 июня, когда началось повторное уменьшение индекса $D_{\rm st}$, достигшее минимального значения $-86\,{\rm hTn}$ в 17:00 UT 25 июня, после чего продолжилась фаза восстановления (см. рис. 1*a*). В этот период наблюдался рост аврорального индекса AE (см. рис. 1*6*). Две другие суббури произошли 23–24 и 28 июня и не имели чётко выраженных проявлений в динамике индекса $D_{\rm st}$, они были идентифицированы по увеличению индекса AE.

Во время магнитной бури максимальные значения индекса K_p принимали значения 5÷8 с 15:00 UT 22 июня до 15:00 UT 23 июня и 5÷6 во время суббури с 06:00 до 15:00 UT 25 июня (см. рис. 1*г*).

Во время магнитной бури произошли две рентгеновские вспышки. Первая рентгеновская вспышка класса М 6.5 имела место 22.06.2015: начало — 17:23 UT, максимальный поток — 18:10 UT, окончание — 20:53 UT, т. е. она пришлась на главную фазу бури. Вторая рентгеновская вспышка класса М 7.9 произошла 25.06.2015: начало — 08:02 UT, максимальный поток — 08:14 UT, окончание — 12:35 UT, она пришлась на фазу восстановления после магнитной бури (см. рис. 1*д*).

Как видно из рис. 1 ∂ , первая рентгеновская вспышка имела место 22 июня в вечернее время и пришлась на главную фазу магнитной бури. Особенность этих гелиогеофизических явлений состоит в том, что оба они произошли в период летнего солнцестояния, когда ионосфера высоких широт была освещена Солнцем и все слои ионосферы (D, E и F) были подвержены воздействию солнечного (рентгеновского) излучения. Вторая рентгеновская вспышка 25 июня произошла в дневные часы, и её воздействие проявилось для всех трасс зондирования, в том числе и среднеширотных.

Магнитная буря, как правило, проявляется в отрицательных и положительных изменениях электронной концентрации. Отрицательная фаза бури и сопровождающее её усиление поглощения радиоволн оказывают негативное влияние на ионосферный канал, приводя к сокращению диапазона частот прохождения радиоволн, т. е. деградации ионосферного канала, вплоть до блэкаута. За положительные и отрицательные фазы бури ответственны различные физические механизмы. Отрицательная фаза магнитной бури обусловлена изменениями в термосферной циркуляции и молекулярном составе на высотах F-области из-за нагрева термосферы во время геомагнитных возмущений. Положительная фаза бури связана с усилением электрических полей магнитосферного происхождения и подъёмом слоя F_2 из-за вертикального дрейфа, потоками плазмы из плазмосферы и нисходящим потоком газа в результате индуцированной бурей термосферной циркуляции [9].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

4.1. Трассы Ловозеро-Йошкар-Ола и Ловозеро-Ростов-на-Дону

На рис. 2*a* и *б* показан временной ход максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) и наименьшей наблюдаемой частоты (ННЧ) моды 1*F* на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола для периода наблюдений 20–30 июня 2015 года, который включает активную фазу магнитной бури, главную фазу и фазу восстановления (см. рис. 1*a*). Здесь же на рисунках пунктирными линиями приведены средние значения этих параметров для условий невозмущённой ионосферы (2–4, 6–7, 20 июня) с магнитным индексом $K_p \leq 1\div3$. На рис. 2*e* показан интервал частот прохождения коротковолновых сигналов $\Delta f = MHЧF-HHЧF$ во время магнитной бури и в условиях невозмущённой ионосферы. Здесь и на последующих рисунках временной интервал, приходящийся на главную фазу магнитной бури, отмечен двумя вертикальными сплошными линиями, а вертикальные пунктирные линии указывают времена максимальных потоков двух рентгеновских вспышек. Из рис. 2 видно, что примерно через 30 мин после начала главной фазы магнитной бури в 14:30 UT 22 июня произошло резкое ухудшение условий распространения радиоволн. Во всём диапазоне частот зондирования сигнал не принимался, длительный интервал непрохождения сигналов продолжался до 15:00 UT 23 июня, т. е. в течение суток имел место блэкаут.

Во время главной фазы бури в период 17:23÷20:50 UT 22 июня (см. рис. 1*д*) произошла рентгеновская вспышка класса М 6.5. Поскольку во время летнего солнцестояния в вечернее время ионосфера субавроральных широт на первой половине трассы Ловозеро—Йошкар-Ола была освещена Солнцем и подвержена воздействию рентгеновского излучения, это дополнительно, наряду с эффектом магнитной бури, воздействовало на деградацию ионосферного канала за счёт увеличения поглощения радиоволн.

Как уже говорилось, на фазе восстановления магнитной бури произошли три суббури. Во время первой суббури в период с 00:00 до 14:00 UT 24 июня уменьшение МНЧ F относительно средних значений для невозмущённой ионосферы составило $25\div30$ %. При этом диапазон частот прохождения сигналов $\Delta f =$ МНЧ F-ННЧ F сократился до $0.5\div2.0$ МГц. По отношению к условиям спокойной ионосферы диапазон частот Δf сократился в $5\div8$ раз.

Продолжительная отрицательная фаза второй магнитосферной суббури проявилась в уменьшении МНЧ F, росте ННЧ F и сокращении диапазона частот прохождения сигналов в период с 08:00 UT 25 июня до 05:00 UT 26 июня. МНЧ F уменьшились с 13,2÷14,6 МГц до 7,6÷9,0 МГц, относительно средних значений уменьшение МНЧ F составило примерно 35÷40%. Величина ННЧ F увеличились с 3,4÷5,0 МГц до 6,5÷8,0 МГц, диапазон рабочих частот $\Delta f =$ МНЧ F --ННЧ F сократился до 0,4÷2,0 МГц, т. е. в 5÷10 раз по отношению к условиям спокойной ионосферы.

Во время второй магнитосферной суббури произошла вторая рентгеновская вспышка. При этом с 07:00 до 10:00 UT 25 июня не было прохождения сигналов, что обусловлено как влиянием отрицательной фазы бури, так и увеличением поглощения радиоволн во время рентгеновской вспышки.

Третья суббуря произошла в конце фазы восстановления в период с 00:00 до 15:00 UT 28 июня. Уменьшение МНЧ F относительно средних значений составило $20\div25\%$, при этом диапазон частот прохождения $\Delta f = \text{МНЧ} F - \text{ННЧ} F$ сократился до $2,0\div3,0$ МГц (в $2\div4$ раза относительно невозмущённой ионосферы).

Следует отметить, что все суббури и поведение величин МНЧ F, ННЧ F и Δf хорошо коррелируют с авроральным индексом AE (см. рис. 16 и рис. 2).

Таким образом, магнитная буря оказала сильное воздействие на ионосферный канал слоя F

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Г. Г. Вертоградов и др.



Рис. 2. Временно́й ход частот МНЧ F(a), ННЧ F(b) и разницы $\Delta f =$ МНЧ F-ННЧ F(a) на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола в июне 2015 года. Пунктирными линиями показаны средние значения для спокойной ионосферы

на трассе Ловозеро-Йошкар-Ола и стала причиной его деградации на длительное время.

На рис. За, б показан временной ход максимальной и наименьшей наблюдаемых критических частот моды $E(E_{\rm s})$ на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола для периода активной фазы магнитной бури 20–30 июня 2015 года. Из-за трудности разделения в ряде случаев мод E и $E_{\rm s}$ значения частот для этих мод объединены, в основном это мода $E_{\rm s}$. На рис. Зв показан интервал частот прохождения коротковолновых сигналов $\Delta f = {\rm MHY} E_{\rm s} - {\rm HHY} E_{\rm s}$ во время магнитной бури и в условиях невозмущённой ионосферы. На рис. Зв приведён временной ход среднего по диапазону частот прохождения отношения сигнал/шум R для моды $E_{\rm s}$, здесь же даны средние значения R для спокойной ионосферы. Из рис. За–6 видно, что во время главной фазы бури и начальной фазы



Рис. 3. Временно́й ход частот МНЧ $E_{\rm s}$ (*a*), ННЧ $E_{\rm s}$ (*б*), разницы $\Delta f =$ МНЧ $E_{\rm s}$ –ННЧ $E_{\rm s}$ (*в*) и отношения R (*s*) на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола в июне 2015 года. Пунктирными линиями показаны средние значения для спокойной ионосферы

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Г. Г. Вертоградов и др.

восстановления в период с 15:00 UT 22 июня до 12:00 UT 23 июня имел место частичный блэкаут. При этом бо́льшую часть времени не было прохождения сигнала через спорадический слой E_s , но в отдельные периоды сигнал принимался. Этот эффект мы связываем с высокими значениями МНЧ E_s и ННЧ E_s , которые достигали в этот период 20÷28 и 14÷26 МГц, соответственно (см. рис. 3a, δ). Сигналы на этих частотах были подвержены меньшему поглощению и регистрировались на ионограммах наклонного зондирования. В дальнейшем на фазе восстановления после 25 июня значения МНЧ E_s , в основном, превышали средние значения для спокойной ионосферы на $3\div4$ МГц. В то же время, по сравнению со средними значениями для условий невозмущённой ионосферы, величины ННЧ E_s во время бури были больше на $20\div50$ %, что обусловлено более сильным ростом поглощения радиоволн на наименьшей частоте в возмущённой ионосфере.

Как видно из сравнения рис. 36 и рис. 26, условия распространения коротковолновых сигналов на субавроральной трассе Ловозеро—Йошкар-Ола через спорадический слой $E_{\rm s}$ существенно лучше, чем при распространении через верхнюю ионосферу (слой F). Так, в отличие от полного блэкаута моды F в течение полных суток 22–23 июня (во время главной фазы бури и начального периода восстановления), распространение через слой $E_{\rm s}$ оставалось возможным. В дальнейшем, на фазе восстановления с 25 по 30 июня, диапазон частот прохождения сигналов через сильный спорадический слой $E_{\rm s}$ на 5÷10 МГц превышал диапазон частот прохождения сигналов в спокойной ионосфере. Также диапазон частот прохождения сигналов через слой $E_{\rm s}$ существенно (от 3 до 8 раз) превышал диапазон частот прохождения сигналов для того же периода при распространении через слой F.

Аналогичные эффекты, но в меньшей степени, имели место и для среднего по диапазону частот отношения R (см. рис. 3*г*). Из рис. 3*б*, *г* и рис. 1*6* видно, что во время магнитной бури в различных её фазах величины ННЧ E_s и R хорошо коррелируют с авроральным индексом AE: ННЧ Е_s растёт с ростом AE, а отношение R убывает. При этом наблюдается задержка проявления этого эффекта относительно поведения индекса АЕ. Мы провели корреляционный анализ связи изменений величин ННЧ E_s и R с вариациями AE для различных временны́х сдвигов для периода активной фазы магнитной бури в течение 4-х дней с 09:00 UT 22 июня до 09:00 UT 26 июня. Результаты расчётов показаны на рис. 4. Из него видно, что зависимости $HHYE_s$ и R от AE хорошо описываются линейной регрессией. Наибольшие коэффициенты корреляции $\rho = 0,68$ и 0,58 достигаются для временны́х сдвигов $\Delta t = 45$ и 60 мин для $\mathrm{HHY}E_{\mathrm{s}}$ и R соответственно. Можно предположить, что временной сдвиг определяется инерционными процессами в нижней ионосфере при изменении магнитной активности. Меньшее запаздывание наименьшей частоты по сравнению с отношением R может быть связано с тем, что чем ниже частота излучения, тем сильнее оно подвержено поглощению и более чувствительно реагирует на вариации АЕ. Среднее по диапазону частот отношение R включает более высокие частоты по сравнению с $HHYE_s$, сигналы на которых поглощаются меньше, и поэтому реагирует на вариации АЕ с бо́льшим запаздыванием. Возможно, играют роль и другие факторы, связанные, например, с рассеянием радиоволн, изменением спектрального состава шумов и помех во время бури и т. п. Для детального анализа этого эффекта необходимо проведение дальнейших исследований.

Таким образом, сильная связь индекса AE с параметрами ионосферного канала (наименьшей частотой и отношением сигнал/шум) позволяет использовать динамику этого индекса для прогнозирования ионосферных эффектов магнитной бури.

Следует отметить, что если на главной фазе магнитной бури 22–23 июня на трассе Ловозеро— Йошкар-Ола для распространения через слой F имел место блэкаут, то для распространения через слой $E_{\rm s}$ полного блэкаута не было. Мы связываем этот эффект с влиянием отрицательной фазы бури на верхнюю ионосферу (F-слой), когда МНЧF упали более, чем на 10÷12 МГц, а также с усилением поглощения в нижней ионосфере в результате высыпания заряженных

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Г. Г. Вертоградов и др.



Рис. 4. Зависимость величин ННЧ $E_s(a)$ и R(b) от индекса AE на трассе Ловозеро-Йошкар-Ола для периода 09:00 UT 22.06.2015÷10:00 UT 26.06.2015

частиц, диссипации авроральных токов и джоулева нагрева. Кроме того, в это время произошла рентгеновская вспышка, которая вызвала дополнительное поглощение радиоволн. Поскольку распространение через сильный спорадический слой $E_{\rm s}$ осуществлялось на высоких частотах (МНЧ $E_{\rm s} \approx 20 \div 28~{\rm M}$ Гц), которые были заметно выше МНЧ F (уменьшевшихся в результате воздействия отрицательной фазы бури), то поглощение моды $E_{\rm s}$ было меньше по сравнению с модой F и полного блэкаута при распространении через слой $E_{\rm s}$ не было.

На рис. 5 показан временной ход максимальной и наименьшей наблюдаемых частот моды 1F на трассе Ловозеро—Ростов-на-Дону для периода наблюдений 20–30 июня 2015 года и средние значения этих параметров для условий невозмущённой ионосферы. Данные для приёмного пункта Ростов-на-Дону до 12:00 UT 22 июня отсутствуют по техническим причинам. На этой трассе непрохождение коротковолновых сигналов имело место на главной фазе магнитной бури и начальной фазе восстановления, начиная с 15:40 UT 22 июня и практически до 13:00 UT 23 июня. Второй период уменьшения МНЧ F имел место во время второй магнитосферной суббури и наблюдался с 16:00 UT 25 июня и практически до 00:00 UT 26 июня. Его продолжительность была меньше аналогичного периода на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола. В остальное время вариации МНЧ F на трассе Ловозеро—Ростов-на-Дону в возмущённой и спокойной ионосфере были схожи. В то же время на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола средние значения МНЧ F после блэкаута были

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Г. Г. Вертоградов и др.



Рис. 5. Временно́й ход частот МНЧ F(a), ННЧ F(b) и ННЧ $E_s(b)$ на трассе Ловозеро—Ростов-на-Дону в июне 2015 года. Пунктирными линиями показаны средние значения для спокойной ионосферы

меньше, чем в спокойной ионосфере. Мы полагаем, что это связано с различным расположением средних точек трасс. На трассе Ловозеро—Йошкар-Ола с протяжённостью 1 420 км область отражения радиоволн находится в субавроральной ионосфере, а на трассе Ловозеро—Ростов-на-Дону с протяжённостью 2 320 км — на средних широтах, где влияние отрицательной фазы магнитной бури проявляется в меньшей степени, поскольку амплитуда этого эффекта ослабевает с уменьшением широты [9].

На трассе Ловозеро—Ростов-на-Дону имел место заметный рост ННЧ F с 04:00 до 16:00 UT 24 июня (см. рис. 56). Аналогичная картина наблюдалась для ННЧ $E_{\rm s}$ (см. рис. 56). Здесь следует отметить, что поведение ННЧ $E_{\rm s}$ для двух трасс несколько отличается друг от друга. На трассе Ловозеро—Йошкар-Ола ННЧ $E_{\rm s}$ более чувствительна к вариациям аврорального индекса

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Г. Г. Вертоградов и др.

АЕ. Дело в том, что на данной трассе реализуется односкачковое распространение через слой $E_{\rm s}$ и бо́льшая часть трассы проходит в субавроральной ионосфере. При этом поведение HHЧ $E_{\rm s}$ отражает реакцию нижней ионосферы на изменения магнитной активности, т. е. вариации поглощения. На трассе Ловозеро—Ростов-на-Дону с протяжённостью 2 320 км распространение через слой $E_{\rm s}$ возможно только с двумя и более скачками. В этом случае второй участок трассы лежит в среднеширотной ионосфере и зависимость HHЧ $E_{\rm s}$ от АЕ в условиях распространения через различные области ионосферы может ослабевать.

Во время второй рентгеновской вспышки 25 июня на трассе Ловозеро—Ростов-на-Дону имело место кратковременное увеличение ННЧ F с 10 до 12,8 МГц и наблюдалось непрохождение сигналов через спорадический слой $E_{\rm s}$ в течение примерно 1 час 50 мин.

4.2. Трассы Хабаровск-Йошкар-Ола и Хабаровск-Ростов-на-Дону

На рис. 6 показаны временной ход МНЧ *F* на трассах Хабаровск—Йошкар-Ола и Хабаровск— Ростов-на-Дону за период 21–28 июня 2015 года и их средние значения для спокойной ионосферы.

Из рис. 6*a* видно, что в 15:30 UT 22 июня произошло резкое уменьшение МНЧ *F*, а с 18:30 UT 22 июня начался первый блэкаут. Всего на протяжённой трассе Хабаровск—Йошкар-Ола во время магнитной бури наблюдалось несколько периодов непрохождения сигналов: 18:30 UT 22 июня–12:30 UT 23 июня; 17:30 UT 23 июня–06:00 UT 24 июня; 19:00 UT 24 июня–12:00 UT 25 июня; 18:00 UT 25 июня–14:00 UT 26 июня и 22:00 UT 27 июня–09:00 UT 28 июня. Важно отметить, что все периоды непрохождения сигналов на трассе Хабаровск—Йошкар-Ола хорошо коррелируют с авроральным индексом AE (см. рис. 1*6*). Полученные результаты говорят о сильном влиянии отрицательной фазы магнитной бури на характеристики коротковолновых сигналов.

На протяжённой трассе Хабаровск—Йошкар-Ола (долготный интервал трассы примерно 48°÷ ÷134° в. д.) 21–22 июня наблюдался предбуревой эффект увеличения МНЧ *F* на 14÷16% относительно спокойной ионосферы. Впервые такой эффект описан в [19] и подтверждался во многих дальнейших работах. Тем не менее, до настоящего времени нет сформировавшегося представления о механизме этого явления.

В периоды прохождения сигналов на этой трассе уменьшение МНЧ F относительно средних значений для спокойной ионосферы составляло от 15 до 50 % и более. В эти же периоды отношение сигнал/шум уменьшалось относительно значений для невозмущённой ионосферы на $20 \div 30$ %.

На трассе Хабаровск—Ростов наблюдалось 4 периода непрохождения сигналов: 20:00 UT 22 июня–12:00 UT 23 июня; 17:00 UT 23 июня–08:00 UT 24 июня; 20:00 UT 24 июня–03:00 UT 25 июня–12:00 UT 25 июня–12:00 UT 26 июня (см. рис. 66). Первые два из них хорошо коррелируют с главной фазой бури и начальным периодом фазы восстановления. В середине фазы восстановления в период 08:00 UT÷20:00 UT 24 июня и 04:00 UT÷18:00 UT 25 июня вариации МНЧ F в возмущённой и спокойной ионосфере были близки между собой. В конце фазы восстановления 27 и 28 июня МНЧ F в возмущённой ионосфере превышают их значения в спокойной ионосфере на $10\div13\%$.

На трассе Хабаровск—Ростов-на-Дону периоды непрохождения сигналов, в основном, совпадают с аналогичными периодами для трассы Хабаровск—Йошкар-Ола, но они менее продолжительные. На этой трассе во время действия двух гелиогеофизических факторов (суббури и второй рентгеновской вспышки) имело место непрохождение коротковолновых сигналов с 07:00 до 10:00 UT 25 июня.

Следует отметить, что в период летнего солнцестояния в невозмущённой ионосфере прохождение сигналов на трассе Хабаровск—Йошкар-Ола наблюдалось практически в течение полных суток с небольшими вариациями МНЧ F в пределах 19÷21 МГц (см. рис. 6*a*). Это связано с тем,



Рис. 6. Временно́й ход МНЧ *F* на трассе Хабаровск—Йошкар-Ола (*a*) и на трассе Хабаровск—Ростовна-Дону (*б*) в июне 2015 года. Пунктирными линиями показаны средние значения для спокойной ионосферы

что в период летнего солнцестояния практически вся трасса находится в освещённой ионосфере, за исключением временно́го интервала $16:00 \div 17:00$ UT, когда средняя точка трассы располагается на границе сумеречной зоны. На трассе Хабаровск—Ростов-на-Дону вариации МНЧ F в невозмущённой ионосфере в течение суток существенно больше и составляют около $10 \div 20$ МГц, что обусловлено заметной суточной разницей в освещённости ионосферы, поскольку область отражения радиоволн второго скачка смещена на средние широты и в период времени $18:00 \div 22:00$ UT находится в сумеречной зоне. Это подтверждается расчётами ионограмм по стандартной модели ионосферы.

4.3. Трассы Кипр-Нижний Новгород и Кипр-Ростов-на-Дону

На рис. 7 показаны временной ход максимальной наблюдаемой частоты моды 1F на трассах Кипр—Нижний Новгород и Кипр—Ростов-на-Дону за период 21–28 июня 2015 года, включающий активную фазу магнитной бури, а также средние значения МНЧ F для спокойной ионосферы. Данные о ННЧ F на этой трассе не приводятся, поскольку наименышая частота зондирования составляет 8 МГц и часто во время наблюдений низкочастотная часть ионограммы «уходит» за эту частоту, так что ННЧ F регистрируются лишь в некоторые интервалы времени.

Как видно из рис. 7*a*, на трассе Кипр—Нижний Новгород наблюдались два продолжительных временны́х интервала с пониженными значениями МНЧ *F*. Во-первых, начиная с 19:45 UT 22 июня регистрировалось резкое уменьшение МНЧ *F* со скоростью около 0,3 МГц/мин, когда за 33 мин МНЧ *F* понизилась на 10 МГц. Деградация ионосферного канала с понижением МНЧ *F* на 5÷10 МГц относительно спокойных условий продолжалась примерно 33 часа



Рис. 7. Временно́й ход МНЧ *F* на трассе Кипр—Нижний Новгород (*a*) и Кипр—Ростов-на-Дону (*б*) в июне 2015 года. Пунктирными линиями показаны средние значения для спокойной ионосферы

с 20:00 UT 22 июня до 05:00 UT 24 июня. По задержке резкого уменьшения МНЧ F для двух близких к меридиональной ориентации трасс Ловозеро—Йошкар-Ола и Кипр—Нижний Новгород (см. рис. 2*a* и 7*a*) была сделана оценка скорости распространения отрицательной фазы возмущения от субавроральной к среднеширотной ионосфере. Она оказалась равной примерно 100 м/с.

Второй продолжительный временной интервал уменьшения МНЧ F наблюдался с 17:00 UT 25 июня до 04:00 UT 27 июня, когда эти частоты составили 9÷16 МГц (для условий невозмущённой ионосферы МНЧ $F \approx 17,0\div23,5$ МГц). Эта деградация ионосферного канала связана с развитием магнитосферной суббури с началом в 06:00 UT 25 июня, когда началось повторное уменьшение индекса $D_{\rm st}$ (этот индекс достиг минимального значения 86 нГл в 17:00 UT 25 июня), после чего продолжилась фаза восстановления (см. рис. 1*a*). В этот период наблюдался рост аврорального индекса AE (см. рис. 1*a*), который хорошо коррелирует с развитием отрицательной фазы бури [9]. Заметно меньшее по времени воздействие на характеристики коротковолнового канала на этой трассе оказали суббури, имевшие место 24 и 28 июня.

Первая рентгеновская вспышка, которая произошла в вечернее время 22 июня, не должна влиять на характеристики сигналов на этой среднеширотной трассе, поскольку она проходила в неосвещённой ионосфере.

На трассе Кипр—Ростов наблюдались два периода деградации ионосферного канала (см. рис. 76). На главной фазе бури, начиная с 19:50 UT 22 июня, в течение примерно 30 мин произошло резкое уменьшение МНЧ F с 17,5 до 9,5 МГц. Деградация коротковолнового канала продолжалась длительное время, примерно до 02:00 UT 24 июня. В это время уменьшение МНЧ F относительно средних значений для спокойной ионосферы составило $30 \div 45 \%$. Второй период заметного уменьшения МНЧ F относительно средних значений для спокойной имел место с 04:00 UT

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Г. Г. Вертоградов и др.

26 июня до 00:00 UT 27 июня, когда это уменьшение составило примерно $20 \div 30 \%$.

Указанные периоды деградации ионосферного канала на трассе Кипр—Ростов совпадают с аналогичными периодами на трассе Кипр—Нижний Новгород, но имеют меньшую длительность и хорошо коррелируют с авроральным индексом AE.

4.4. Наблюдения аномальных сигналов на трассе Кипр-Ростов-на-Дону

Ионосферные неоднородности с различными масштабами, генерируемые вблизи южной границы аврорального овала, могут приводить к рассеянию радиосигналов и появлению на ионограммах наклонного зондирования дополнительных треков.

В нашем эксперименте во время магнитной бури ЛЧМ-ионозонд-радиопеленгатор зарегистрировал на трассе Кипр—Ростов-на-Дону аномальные диффузные сигналы с больши́ми задержками $20\div25$ мс и азимутами $20^{\circ}\div30^{\circ}$. Эти азимуты значительно отличались от азимута угла прихода прямого сигнала, распространяющегося по дуге большого круга между передатчиком и приёмником (203°). На рис. 8 показан пример работы пеленгатора во время главной фазы магнитной бури в 02:30 UT 23 июня. Из этого рисунка видно, что на частотах $8,0\div11,5$ МГц наблюдаются диффузные сигналы PC1 и PC2 с задержками $24\div25$ и $16\div20$ мс соответственно. Углы места изменяются в пределах $13^{\circ}\div30^{\circ}$. Амплитуда аномальных сигналов на $40\div50$ дБ меньше амплитуды прямого сигнала, распространяющегося через спорадический слой $E_{\rm s}$.

По результатам измерений дистанционно-частотных и угловых частотных характеристик мы провели позиционирование областей ионосферы, ответственных за аномальные сигналы. Результаты моделирования в виде проекции на географическую карту местоположения этих областей ионосферы показаны на рис. 9. Из этого рисунка видно, что указанная область занимает обширный регион около 200 км по широте и 700 км по долготе для сигнала PC2 и 200 × 300 км для сигнала PC1. Геомагнитные широты этих областей составляют $59^{\circ} \div 60^{\circ}$ с. ш. и 61° с. ш. соответственно. Мы полагаем, что диффузные сигналы PC1 и PC2 обусловлены рассеянием радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях высокоширотной ионосферы в области высыпания заряженных частиц, южная граница которой смещается во время магнитной бури на субавроральные и даже на средние широты. Для того, чтобы определить положение рассеивающих неоднородностей по высоте, мы провели моделирование ракурсного рассеяния радиоволн для различных высот: от 120 км (*E*-слой) до 450 км (*F*-слой). В расчётах использовались две модели: параболическая модель ионосферы и модель ионосферы IRI-2012.

4.4.1. Параболическая модель

Наиболее просто моделирование выполняется для параболической модели ионосферы. Параметры параболы взяты по результатам вертикального зондирования в ИЗМИРАН (зонд DPS-4, Москва): высота максимума слоя $h_{mF_2} = 261$ км; полутолщина слоя $y_{mF_2} = 153,7$ км; критическая частота слоя $f_{0F_2} = 3,7$ МГц. Конечно, данная модель проста, однако для летних условий её можно считать справедливой.

Моделирование выполнено по традиционной схеме [20]. Расчёты ракурсного рассеяния выполнены для единичного объёма с координатами проекции его центра на поверхность Земли 64° с. ш. и 75° в. д. для сигнала PC1 и 63° с. ш. и 55° в. д. для сигнала PC2. Высота положения точки рассеяния варьировалась в пределах от 120 до 450 км с шагом 1 км. Считалось, что реализуется ракурсное рассеяние на трассе Кипр—область рассеяния (OP)—Ростов-на-Дону, если в точке рассеяния выполняется условие ракурсности с точностью 0,5°. По мере увеличения частоты сначала проверялось возможность рассеяния на волне с обыкновенной поляризацией. Затем, когда



Рис. 8. Дистанционно-частотные (*a*), амплитудно-частотные (*б*) и угловые частотные (*e* — угол места, *e* — азимут) характеристики трассы Кипр—Ростов-на-Дону 02:30 UT 23.06.2015



Рис. 9. Проекция на поверхность Земли месторасположения областей ионосферы, ответственных за рассеянные сигналы РС1 и РС2 для сеанса зондирования 02:30 UT 23.06.2015

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Г. Г. Вертоградов и др.

Область рассеяния	$f, M\Gamma$ ц	$h_{\rm OP}$, км	τ , mc	Δ , градусы
PC1	8	210	26,7	23,04
PC1	9	196	$25,\!8$	18,50
PC1	10	179	25,2	13,90
PC2	8	305	21,0	23,10
PC2	9	313	20,4	19,10
PC2	10	317	20,0	$15,\!80$
PC2	12	321	19,5	10,70
PC2	14	322	19,1	7,03

Таблица 3. Параболическая модель ионосферы с параметрами по данным вертикального зондирования

рассеяние прекращалось, проверялось рассеяние на волне с необыкновенной поляризацией.

В результате моделирования установлено, что рассеяние для сигнала PC1 зафиксировано в области частот 8÷10 МГц, для сигнала PC2 — в области частот 8÷14 МГц. Область рассеяния находилась в *F*-слое ионосферы. При этом распространение проходило прямыми лучами на обоих участках трассы Кипр—ОР и ОР—Ростов без промежуточного отражения от Земли.

Характеристики рассеянных сигналов для различных частот приведены в табл. 3. Здесь $h_{\rm OP}$ высота области рассеяния, τ — задержка рассеянного сигнала на трассе Кипр—OP—Ростов, Δ угол места прихода волны в пункте приёма (Ростов-на-Дону). Рассеянный сигнал всегда попадает в пункт приёма прямым сигналом без отражения от Земли, это обстоятельство связано с меньшей рефракцией в ионосфере, когда в модели ионосферы не учитывается *E*-слой.

4.4.2. Модель ионосферы IRI-2012

Для сравнения с экспериментом использовалась модель ионосферы IRI-2012, в которой уровень солнечной активности принят равным 10. Модель корректировалась по станции вертикального зондирования ИЗМИРАН. Использовались приведённые выше данные: критическая частота $f_{0F_2} = 3,7$ МГц, высота максимума $h_{mF_2} = 261$ км. Результаты моделирования приведены в табл. 4. Следует отметить, что с данными эксперимента согласуются не только задержки рассеянного сигнала, но и углы места его прихода в пункт приёма. Область рассеяния находится в *F*-слое ионосферы. На высотах ниже 120 км по результатам моделирования рассеяние не реализуется. Отметим, что в данном случае сигнал попадает в Ростов-на-Дону с однократным отражением от Земли как на участке Кипр—OP, так и на участке OP—Ростов-на-Дону. Это обстоятельство связано с повышенной рефракцией в ионосфере, когда учитывается слой *E*.

Таким образом, по результатам наблюдений аномальных сигналов с помощью ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора можно сделать следующие выводы.

1) По результатам моделирования с использованием как параболической модели, так и модели IRI-2012, область рассеяния расположена в F-слое ионосферы. При этом на частотах больше 9 МГц для сигнала PC2 область рассеяния расположена выше максимума слоя F_2 . Для модели IRI-2012 область рассеяния, ответственная за сигнал PC1, находится в переходной области между слоями E и F.

2) С результатами моделирования согласуются не только полная задержка на трассе рассеяния Кипр—OP—Pостов, но и углы места прихода рассеянного сигнала в пункте приёма Ростов-на-Дону. Некоторое отличие (в ряде случаев) измеренных и расчётных вертикальных углов прихода рассеянных сигналов, вероятно, связано с несовершенством используемых моделей применитель-

Область рассеяния	$f, M\Gamma$ ц	$h_{\rm OP}$, км	τ , mc	Δ , градусы
PC1	8	130	24,9	12,80
PC1	9	150	24,9	11,80
PC1	10	180	25,1	11,80
PC2	8	200	20,5	$20,\!50$
PC2	9	296	20,5	20,07
PC2	10	303	20,3	17,80

Таблица 4. Модель ионосферы IRI-2012, адаптированная по данным вертикального зондирования

но к условиям сильно возмущённой ионосферы (следует отметить, что трассы пересекают главный ионосферный провал, деформируемый во время магнитных возмущений [21]).

выводы

Регулярные наблюдения распространения коротковолновых сигналов на сети трасс наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы в Евроазиатском регионе с большим пространственным охватом показали перспективность такого подхода для исследования спорадических гелиогеофизических явлений, таких как магнитные бури и рентгеновские вспышки, существенно влияющих на работу радиоэлектронных систем различного назначения. Довольно редкое сочетание магнитной бури и двух рентгеновских вспышек в условиях летнего солнцестояния позволило оценить вклад этих явлений в характеристики сигналов на трассах с различными протяжённостями и ориентациями.

Реакция ионосферы на сильную магнитную бурю с длительной фазой восстановления в условиях летнего солнцестояния, на разных фазах которой произошли две рентгеновские вспышки, была значительной на обширной территории Евроазиатского региона и продолжалась в течение нескольких дней.

Отрицательная фаза бури и сопровождающее её усиление поглощения радиоволн оказали негативное влияние на ионосферный коротковолновый канал в большом долготном секторе, от Ловозера (Мурманская обл.) на западе до Хабаровска на востоке, и привели к деградации ионосферного канала, вплоть до блэкаута.

Во время главной фазы магнитной бури и начальной фазы восстановления практически в течение суток на трассах, примыкающих к субавроральным широтам (Ловозеро—Йошкар-Ола, Хабаровск—Йошкар-Ола, Ловозеро—Ростов-на-Дону и Хабаровск—Ростов-на-Дону), имел место блэкаут. На стадии восстановления после магнитной бури в период магнитосферных суббурь в течение нескольких дней наблюдаемой частоты и сокращение максимальной наблюдаемой частоты слоя F, рост наименьшей наблюдаемой частоты и сокращение диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов $\Delta f = \text{MHЧ} F - \text{HHЧ} F$. Так, на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола диапазон частот Δf сократился в 5÷8 раз по сравнению с невозмущённым состоянием ионосферы. Понятно, что в таких условиях коротковолновая радиосвязь через F-слой ионосферы не может быть надёжной.

С другой стороны, при образовании сильных спорадических слоёв $E_{\rm s}$ во время магнитной бури появляется возможность использовать для радиосвязи в высокоширотной ионосфере канал распространения через слой $E_{\rm s}$. Об этом свидетельствуют результаты наших исследований. Так, в отличие от полного блэкаута в слое F в течение полных суток 22–23 июня во время главной фазы бури и начального периода восстановления, распространение через слой $E_{\rm s}$ оставалось возможным. На фазе восстановления с 25 по 30 июня диапазон частот прохождения через споради-

ческий слой $E_{\rm s}$ на 5÷10 МГц превышал диапазон частот прохождения сигналов в невозмущённой ионосфере и существенно, от 3 до 8 раз, превышал диапазон частот прохождения для того же периода при распространении через F-слой.

На протяжённых трассах Хабаровск—Йошкар-Ола и Хабаровск—Ростов-на-Дону, кроме основного блэкаута на главной фазе бури, имели место блэкауты на фазе восстановления, причём на трассе Хабаровск—Ростов-на-Дону они были несколько меньшей продолжительности. Вероятно, это связано с тем, что вторая половина данной трассы лежит на средних широтах, где эффект отрицательной фазы бури уменьшается по сравнению с субавроральными широтами, ближе к которым расположена трасса Хабаровск—Йошкар-Ола.

По данным синхронных наблюдений вариаций МНЧ F на главной фазе магнитной бури для двух трасс Ловозеро—Йошкар-Ола и Кипр—Нижний Новгород определена скорость распространения отрицательной фазы возмущения от субавроральной к среднеширотной ионосфере. Она составляет примерно 100 м/с.

Показано, что во время магнитной бури наименьшая наблюдаемая частота и среднее по диапазону частот прохождения отношение сигнал/шум R для моды распространения через спорадический слой $E_{\rm s}$ хорошо коррелируют с авроральным индексом AE. Установлено, что наибольшие коэффициенты корреляции $\rho = 0.68$ и 0.58 достигаются для временно́го запаздывания $\Delta t =$ = 45 мин и 60 мин (относительно AE) для HHЧ $E_{\rm s}$ и R соответственно.

Сильная связь индекса AE с параметрами ионосферного канала (HHЧ и R) позволяет использовать динамику этого индекса для прогнозирования ионосферных эффектов магнитной бури применительно к обеспечению надёжной работы радиоэлектронных систем наземного и космического базирования в различных гелиогеофизических условиях.

На главной фазе магнитной бури на трассе Кипр—Ростов-на-Дону при работе ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора обнаружены аномальные сигналы с больши́ми задержками $20\div25$ мс и азимутами $20^{\circ}\div30^{\circ}$, амплитуда которых на $40\div50$ дБ меньше амплитуды прямого сигнала. На основе моделирования и сопоставления с экспериментальными данными проведено позиционирование областей ионосферы, ответственных за аномальные сигналы. Показано, что аномальные сигналы обусловлены рассеянием радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях, расположенных в *F*области ионосферы на геомагнитных широтах $59^{\circ}\div61^{\circ}$ с. ш. Эти широты соответствуют области высыпания заряженных частиц, южная граница которой смещается во время магнитной бури на субавроральные широты.

Таким образом, работа ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора на трассе Кипр—Ростов-на-Дону во время магнитной бури подтвердила большие потенциальные возможности данного инструмента для позиционирования областей ионосферы, ответственных за аномальные сигналы, которые ранее были продемонстрированы на трансэкваториальной трассе [13, 22]. Эти результаты имеют важное значение для прогнозирования работы систем загоризонтной коротковолновой радиолокации и радиопеленгации.

Работа В. П. Урядова и Ф. И. Выборнова выполнена при финансовой поддержке базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (шифр 3.7939.2017/БЧ).

Авторы благодарят всех сотрудников, обеспечивавших работу ЛЧМ-передатчиков, сервисную службу «World Data Center for Geomagnetism» (Kyoto, Japan) за возможность получения данных по индексам $D_{\rm st}$, AE и сервисную службу «Space Weather Prediction Center» (USA) за возможность получения данных измерений рентгеновского излучения на спутниках GOES и данных спутника ACE по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Cannon P. // Radio Sci. 2009. V. 44. RS0A20.
- 2. Buonsanto M. J. // Space Sci. Rev. 1999. V. 88, No. 3-4. P. 563.
- 3. Matuura N. // Space Sci. Rev. 1972. V. 13, No. 1. P. 124.
- 4. Mendillo M. // Rev. Geophys. 2006. V. 44, No. 4. Art. no. RG4001.
- 5. Mendillo M., Narvaez C. // Annales Geophysicae. 2009. V. 27, No. 4. P. 1679.
- Yizengaw E., Dyson P. L., Essex E. A., Moldwin M. B. // Annales Geophysicae. 2005. V. 23, No. 3. P. 707.
- 7. Wang M., Lou W., Li P., et al. // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 2013. V. 75. P. 261.
- 8. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.
- 9. Danilov A. D. // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63. P. 441.
- 10. Tsunoda R. T. // Rev. Geophys. 1988. V. 26, No. 4. P. 719.
- Uryadov V. P., Ponyatov A. A., Vertogradov G. G., et al. // Int. J. Geomagn. Aeron. 2005. V. 6, No. 1. Art. no. GI1002.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 4. С. 255.
- Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 287.
- 14. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15, № 5. С. 22.
- Пат. 2399062 РФ. МКИ G01S3/46. Ионосферный зонд-радиопеленгатор / Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г., Кубатко С. В. Заявл. 15.07.2009; Опубл. 10.09.2010. Бюл. № 25.
- 16. sec.noaa.gov.
- 17. wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp.
- 18. Snyder A. L., Akasofu S.-I. // J. Geophys. Res. 1972. V. 77, No. 9. P. 3419.
- 19. Kane R. P. // Annales de Geophysique. 1973. V. 29. P. 25.
- 20. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 5. С. 339.
- 21. Карпачев А. Т., Афонин В. В. // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 1. С. 67.
- 22. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г., Понятов А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 3. С. 176.

Поступила в редакцию 26 апреля 2016 г.; принята в печать 18 августа 2016 г.

IMPACT OF A STRONG MAGNETIC STORM AND TWO X-RAY FLARES ON THE IONOSPHERIC HF CHANNEL IN SUMMER SOLSTICE 2015 ACCORDING TO OBLIQUE SOUNDING IN THE EURASIAN REGION

V. P. Uryadov, A. A. Kolchev, G. G. Vertogradov, F. I. Vybornov, I. A. Egoshin, M. S. Sklyarevsky, V. V. Shumaev, and A. G. Chernov

We present the results of observations of the impact a strong magnetic storm and two X-ray flares in summer solstice 2015 on HF signal characteristics during oblique sounding of the ionosphere in the Eurasian region. It was found that the negative phase of the magnetic storm led to a strong degradation of the ionospheric channel, up to a long blackout on the paths adjacent to the subauroral latitudes.

On the midlatitude paths, a decrease in the maximum observable frequency of the F layer reached 50% with respect to the average values for an undisturbed ionosphere. The propagation velocity of the negative phase of the perturbation from the subauroral to the midlatitude ionosphere is determined (it is equal to about 100 m/s). It is shown that during the magnetic storm the least observable frequency and the average signal-to-noise ratio for the propagation mode via the sporadic E_s layer correlate well with the auroral AE index. Anomalous signals were detected in the main phase of the magnetic storm on the Cyprus – Rostov-on-Don path when a chirp ionosonde–radio direction finder was operated in the over-the-horizon HF radar mode, On the basis of modeling and comparison with experimental data, it is shown that the anomalous signals are due to scattering of radio waves by small-scale irregularities located in the subauroral ionospheric F region.