



УДК 550.388.2

Ф.И. Выборнов, д.ф.-м.н., внс НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а,
А.В. Дудина, студент ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
В.А. Малышева, студент ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5

ВЛИЯНИЕ ГЕЛИО И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СРЕДНЕШИРОТНУЮ ИОНОСФЕРУ

Ключевые слова: гелиогеофизические возмущения, ионосфера, радиосвязь, распространение радиоволн, коротковолновый диапазон, ионограмма, ЛЧМ сигнал.

Представлены результаты наблюдений воздействия на среднеширотную ионосферу Земли двух рентгеновских вспышек на Солнце (M6.5 22 июня и M7.9 25 июня 2015 г.). Воздействие происходило на фоне сильной геомагнитной бури, начавшейся 21 июня 2015 г. Диагностика состояния ионосферы проводилась в режиме патрульных наблюдений с использованием станций наклонного и вертикального зондирования.

Введение

Хорошо известно, что солнечная активность является определяющим фактором состояния ионосферы Земли. Ионосфера, как среда распространения радиоволн, с одной стороны, исследуется для чисто прикладных целей: это обеспечение надежной и прогнозируемой работы систем дальней радиосвязи, навигации, радиолокации, энергетики. С другой стороны, ионосфера является чутким индикатором солнечно-земных связей, геофизических явлений на Земле и в космосе. Ионосфера Земли - огромная плазменная лаборатория, которую наука почти столетие использует для изучения различных природных и антропогенных явлений наземными (дистанционными) и космическими методами.

Солнечные вспышки, коронарные выбросы масс, солнечный ветер, потоки протонов, ионов, электронов вызывают магнитно-ионосферные возмущения (магнитной бури), приводят к изменению регулярного распределения электронной концентрации в ионосфере, росту поглощения электромагнитных волн, усилению ионосферных неоднородностей, изменению уровня помех, появлению аномальных сигналов. Все это влияет на качество работы радиоэлектронных систем различного назначения, особенно в полярных районах Земли. Во время сильных магнитных бурь в F -слое ионосферы может наблюдаться как понижение, так и увеличение электронной концентрации не только на полярных, но и на средних и низких широтах, где пролегают основные каналы коротковолновой (КВ) и ультракоротковолновой (УКВ) радиосвязи. Как правило, во время магнитных бурь происходит уменьшение максимальных применимых частот (МПЧ), уменьшается диапазон используемых рабочих частот связи, ухудшается качество радиосвязи и точность радионавигации.

Для исследования ионосферы и ее влияния на распространения радиоволн широко используют сети станций вертикального (ВЗ) и наклонного зондирования (НЗ) [1]. Сеть станций НЗ позволяет проводить одновременное зондирование на трассах различной

протяженности и ориентации, позволяет проводить измерение и управление параметров конкретного ионосферного канала связи в реальном времени. Работа сетей ионосферных станций в режиме патрульных наблюдений важна для прогнозирования эффектов космической погоды, то есть всего комплекса разнообразных явлений на Солнце, в верхней атмосфере Земли, околоземном космическом пространстве и межпланетной среде, влияющих на процессы в околоземном космическом пространстве.

Постановка задачи и схема эксперимента

Общей целью работы является определение совокупности определяющих физических связей и построение прогностических схем для системы Солнце - солнечный ветер – магнитосфера и ионосфера Земли. Для решения этой сложной задачи очень важно разработать упрощенные подходы, описывающие не всю динамику совокупности физических параметров, а последовательность отдельных повторяющихся явлений. Поэтому конкретной задачей в рамках общей работы ставилось проведение наблюдений за состоянием среднеширотной и субполярной ионосферы авроазиатского региона с помощью сети ионосферных станций ВЗ и НЗ во время сильной геомагнитной бури с воздействием на ионосферу нескольких сильных солнечных вспышек и анализ полученных в ходе этого эксперимента ионограмм.

Для наклонного зондирования ионосферы Земли при проведении наблюдений использовалась существующая сеть ионозондов НЗ. Сигналы передающих станций Ловозеро (Мурманская область), Горьковская (Ленинградская область), Салехард (Ямало-Ненецкий автономный округ) с линейно частотно-модулированным сигналом (ЛЧМ) принимались на стенде СУРА в Васильсурске (56,1°N, 46,1°E; Нижегородская область). Сигнал станции Кипр принимался в Нижнем Новгороде (56,1°N, 44,1°E). Для приема использовались ЛЧМ станции на базе приемников фирмы ICOM, синхронизируемых сигналом GPS и управляемых персональными компьютерами. Регистрация сигналов сети передающих станций осуществлялась круглосуточно автоматически в режиме патрульных наблюдений по заданной программе. На экране дисплея ЛЧМ станций отображались графики задержек принимаемых сигналов от частоты (ионограммы). Ионосферная станция ВЗ CADI, расположенная в Васильсурске, работала в пятнадцатиминутном режиме съема ионограмм. Режимы работы ЛЧМ передатчиков и их координаты приведены в таблице 1.

Эксперимент проводился с 20 по 30 июня 2015 года при прохождении активной области 2371 на Солнце [2].

Таблица 1.

Передающая станция	Координаты	Диапазон частот, МГц	Скорость, кГц/с	Период зондирования, мин
Ловозеро	68,00°N 35,02°E	2 ÷ 29	550	15
Горьковская	60,27°N 29,38°E	2 ÷ 29	550	15
Салехард	66,52°N 66,67°E	2 ÷ 29	550	15
Кипр	35,00°N 34,00°E	8 ÷ 33	100	5

Результаты наблюдений

За время наблюдений с 20 по 30 июня 2015 года на Солнце было зарегистрировано 39 вспышек класса С и выше [2]. Высокая вспышечная активность инициировала геомагнитную бурю в 21:00 МСК 21 июня 2015 г., которая началась с резкого возрастания магнитного индекса Dst, Начальная фаза магнитной бури продолжалась примерно до 17:00 МСК 22 июня 2015 г., а главная фаза до 08:00 МСК 23 июня 2015 г. Минимальное значение индекса Dst составило -204 нтл. Фаза восстановления бури продолжалась до 30 июня 2015 г. [2,3]. На фазе восстановления магнитной бури

произошло три магнитосферных суббури, которые были идентифицированы по поведению магнитного Dst и аврорального AE индексов.

Во время магнитной бури произошли две сильные рентгеновские вспышки (рис.1). Первая рентгеновская вспышка класса M6.5 произошла 22.06.2015 г. (во время главной фазы бури), а вторая рентгеновская вспышка класса M7.9 произошла 25.06.2015 г. (во время фазы восстановления). В таблице 2 приведены параметры солнечных вспышек (СВ), наблюдаемых с 20 по 30 июня 2015 г. [2].

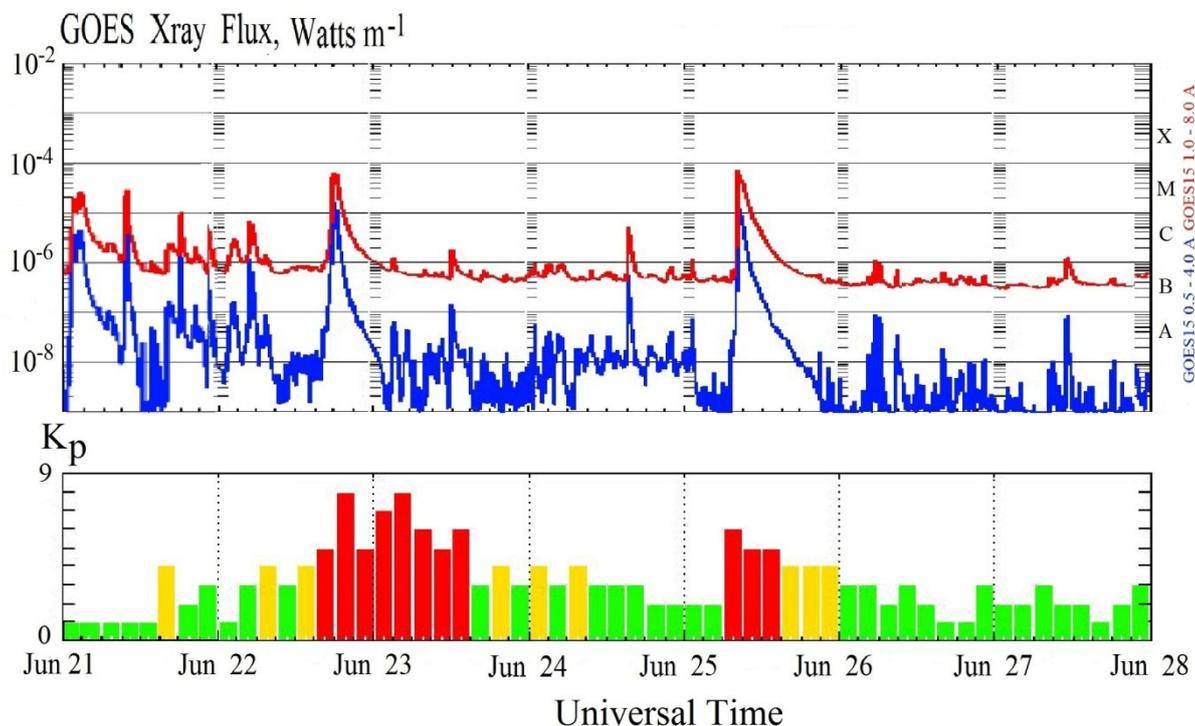


Рис.1. Поток рентгеновского излучения, зарегистрированный спутником GOES15 (верхний), и Kp индекс геомагнитного поля (нижний) с 21 по 27 июня 2015 г.

Таблица 2

Дата и к-во СВ	Класс СВ	Активная область	Начало, МСК	Максимум, МСК	Окончание, МСК
20.06.2015 4	C2.3	2371	05:36:00	05:42:00	05:44:00
	C1.4	2371	06:10:00	07:15:00	07:39:00
	M1.0	2371	09:28:00	09:48:00	10:09:00
	C1.2	2367	22:07:00	22:12:00	22:19:00
21.06.2015 8	M2.0	2371	04:02:00	04:42:00	05:00:00
	M2.6	2371	05:06:00	05:36:00	06:02:00
	M3.8	2367	12:38:00	12:44:00	12:50:00
	C1.3	2367	16:28:00	16:33:00	16:36:00
	C1.4	2367	17:29:00	17:32:00	17:34:00
	C2.6	2367	18:35:00	19:40:00	20:44:00
	M1.1	2367	21:10:00	21:20:00	21:28:00
22.06.2015	C1.5	2371	23:09:00	23:13:00	23:15:00
	C6.5	2367	01:28:00	01:40:00	01:55:00
	C3.2	2371	05:15:00	05:42:00	06:11:00
	C7.5	2367	08:09:00	08:19:00	08:40:00

Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов

6	C1.6	2371	10:35:00	10:40:00	10:49:00
	C3.9	2371	20:20:00	20:27:00	20:33:00
	M6.5	2371	20:39:00	21:23:00	21:51:00
23.06.2015 2	C1.3	2371	06:16:00	06:30:00	06:42:00
	C1.9	2371	15:09:00	15:19:00	15:38:00
24.06.2015 4	C1.1	2371	04:09:00	04:14:00	04:21:00
	C1.0	2371	06:10:00	06:20:00	06:34:00
	C1.0	2371	07:40:00	07:52:00	07:56:00
	C5.6	2371	18:12:00	18:29:00	18:40:00
25.06.2015 2	C1.3	2371	04:13:00	04:20:00	04:25:00
	M7.9	2371	11:02:00	11:16:00	12:05:00
26.06.2015 3	C1.5	2371	08:23:00	08:27:00	08:29:00
	C1.7	2371	09:01:00	09:06:00	09:08:00
	C1.2	2371	09:38:00	09:42:00	09:45:00
27.06.2015	C1.4	2371	13:52:00	14:04:00	14:24:00
28.06.2015 2	C1.1	2371	09:07:00	09:12:00	09:16:00
	C1.9	2373	20:07:00	20:14:00	20:18:00
29.06.2015 6	C2.2	2371	03:27:00	03:36:00	03:42:00
	C1.2	2373	04:29:00	04:53:00	05:03:00
	C1.5	2373	12:59:00	13:08:00	13:19:00
	C1.1	2376	16:42:00	16:48:00	16:53:00
	C2.3	2376	17:43:00	17:55:00	18:05:00
	C2.4	2373	20:58:00	21:07:00	21:14:00
30.06.2015	C1.4	2376	15:22:00	15:43:00	15:59:00

Была выполнена обработка ионограмм НЗ для всех трасс зондирования ионосферы. На рис. 2 показан временной ход МНЧ F-слоя ионосферы для трассы Кипр – Нижний Новгород за период 21 – 27 июня 2015 г., где с 19:45 UT 22 июня наблюдалось резкое уменьшение частоты сигнала, вызванное главной фазой магнитной бури (отмечено коричневыми вертикальными линиями). Слабое влияние первой рентгеновской вспышки (отмечена красной вертикальной линией) объясняется тем, что она произошла в вечернее время, когда трассы проходила в неосвещенной ионосфере. Пониженные значения МНЧ F-слоя ионосферы отмечались до 05:00 UT 24 июня. Ранее в работе [4] по задержке уменьшения МНЧ F-слоя ионосферы для двух близких к меридиональной ориентации трасс Ловозеро – Йошкар-Ола и Кипр – Нижний Новгород была сделана оценка скорости распространения отрицательной фазы возмущения от субавроральной к среднеширотной ионосфере. Она оказалась равной ~ 100 м/с.

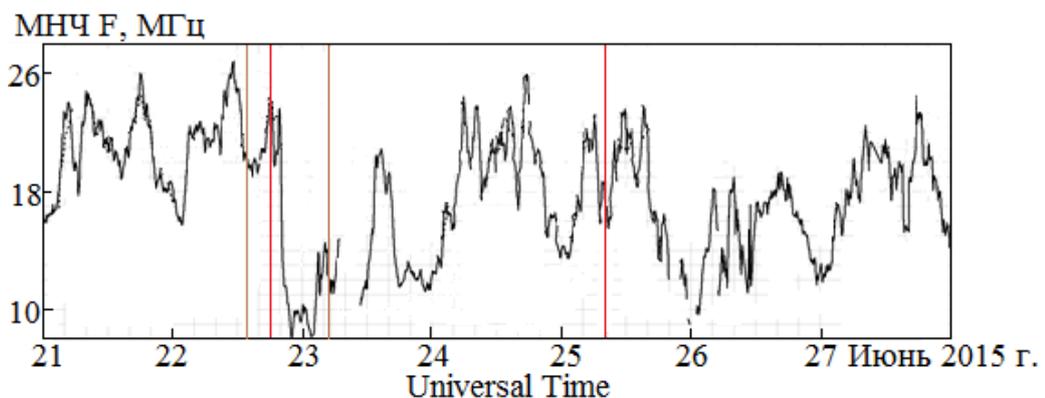


Рис.2. МНЧ F-слоя на трассе Кипр – Нижний Новгород для 21 – 27 июня 2015 г.

Второй интервал уменьшения МНЧ F-слоя связан с развитием магнитосферной суббури в 06:00 UT 25 июня 2015 г., вероятно вызванной второй рентгеновской вспышкой (на рис.2 отмечено красной вертикальной линией). Минимальное значение Dst индекса составило – 86 нтл в 17:00 UT 25 июня.

Интересно поведение МНЧ Es-слоя ионосферы 25 июня 2015 г. на трассе Кипр – Нижний Новгород (рис.3). Резкое уменьшение МНЧ Es-слоя ионосферы, несомненно, вызвано рентгеновским излучением солнечной вспышки, начавшейся в 8:02 UT. Интересно, что

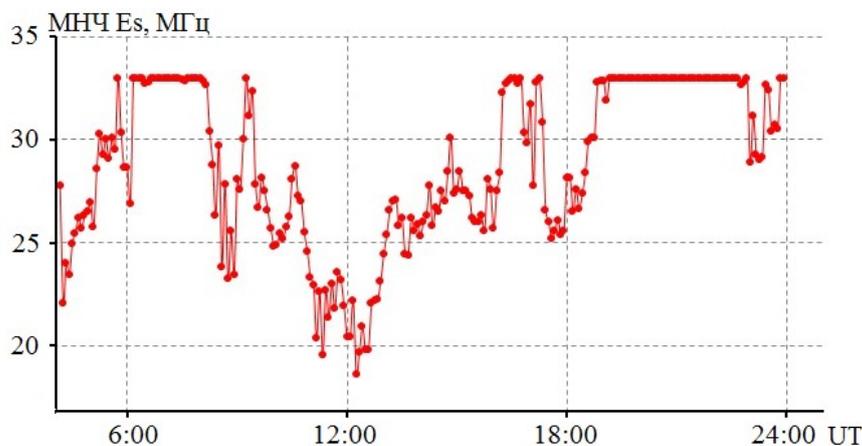


Рис.3. МНЧ Es-слоя ионосферы на трассе Кипр – Нижний Новгород 25 июня 2015 г.

На рис. 4 приведены ионограммы, полученные 22 июня 2015 г. на трассе Кипр – Нижний Новгород до, во время и после окончания рентгеновской вспышки класса M6.5, которые отражают динамику происходящих в ионосфере изменений. Наблюдается появление Es-слоя во время рентгеновской вспышки и деформация трека отражения F-слоя ионосферы после окончания вспышки.

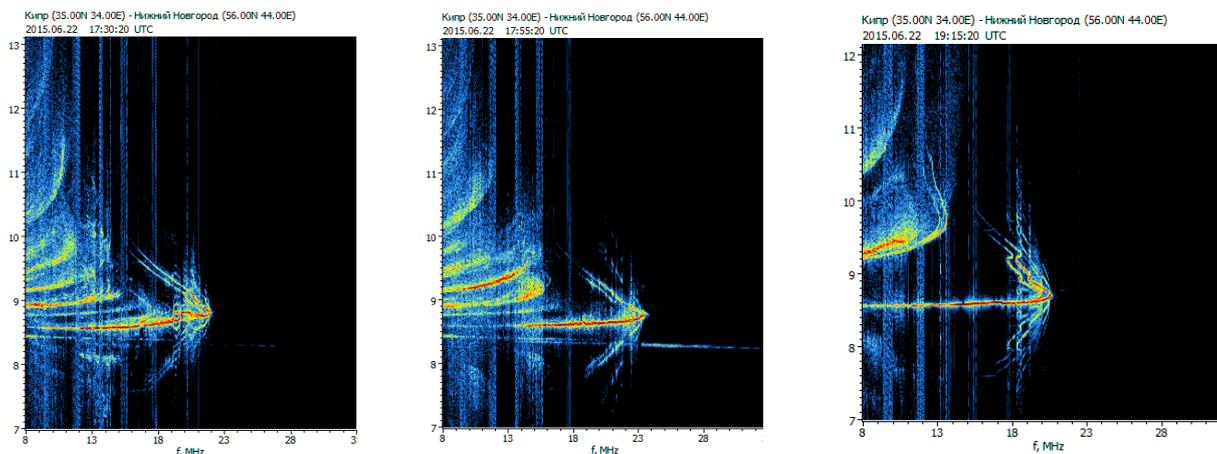


Рис. 4. Ионограммы, полученные 22 июня 2015 г. на трассе Кипр – Нижний Новгород во время рентгеновской вспышки класса M6.5.

На рис. 5 приведены ионограммы, полученные 25 июня 2015 г. на трассе Кипр – Нижний Новгород до, во время и после окончания рентгеновской вспышки, которые отражают динамику происходящих в ионосфере изменений. Наблюдается сильное поглощение отраженных от ионосферы сигналов во время рентгеновской вспышки, сужается диапазон применимых частот F и Es слоев. Частичное восстановление состояния ионосферы происходит примерно через час после окончания рентгеновской вспышки.

Необходимо отметить, что на трассах Ловозеро – Васильсурск и Салехард – Васильсурск 22 июня 2015 г. отраженные от ионосферы сигналы наблюдались только до 17:00 МСК. Очень слабый, отраженный от F-слоя ионосферы, сигнал принимался на

трассе Горьковская – Васильсурск до 21:03 МСК. Анализ реакции ионосферы на рентгеновскую вспышку по таким данным провести нельзя.

25 июня 2015 г. во время рентгеновской вспышки класса M7.9 на трассах Ловозеро – Васильсурск, Салехард – Васильсурск и Горьковская – Васильсурск наблюдались нерегулярные отражения от F- и Es-слоев ионосферы, отражающие динамику процессов, характерных для сильной геомагнитной бури в субполярной ионосфере.

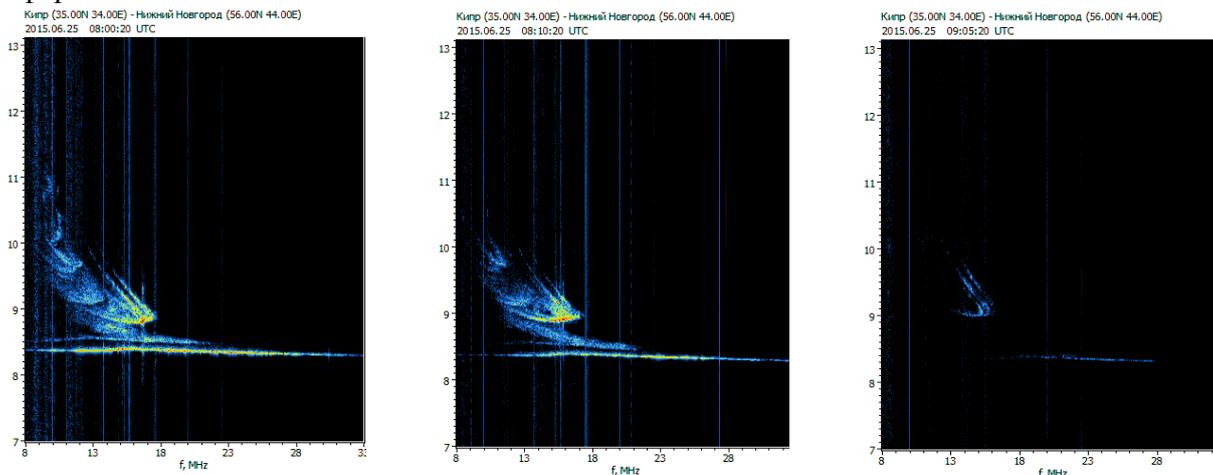
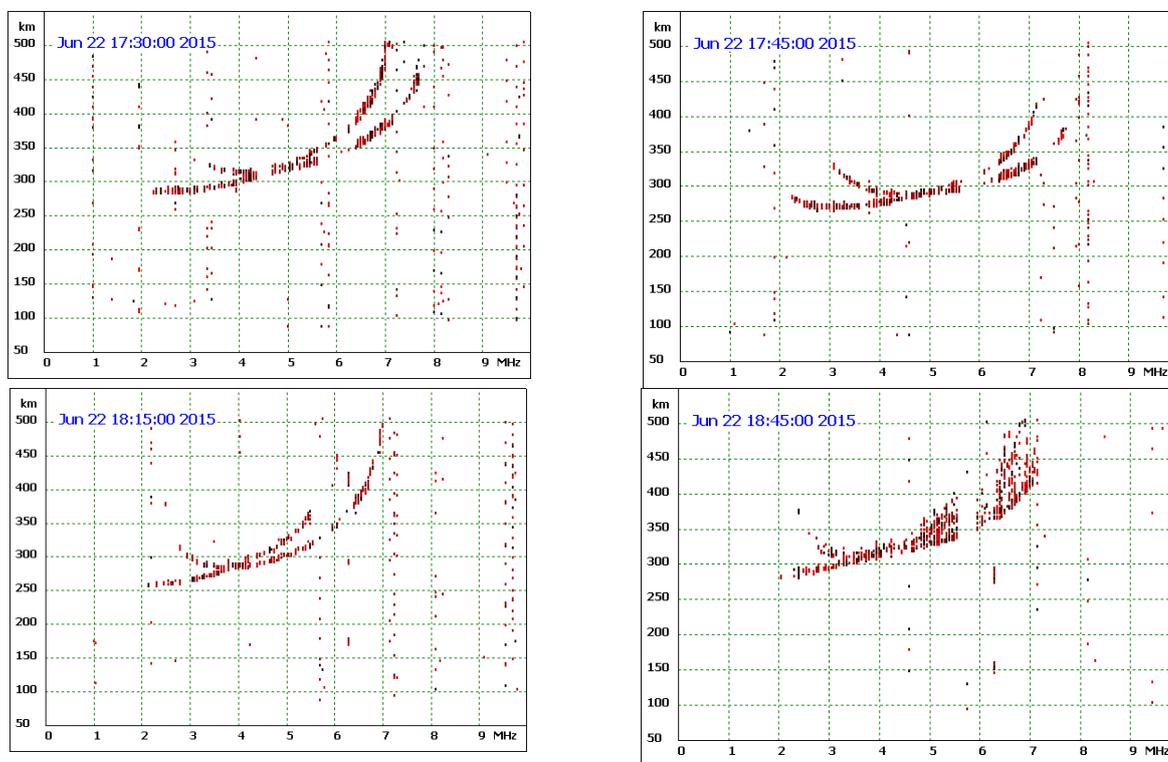


Рис. 5. Ионограммы, полученные 25 июня 2015 г. на трассе Кипр – Нижний Новгород во время рентгеновской вспышки класса M7.9.

Ниже приведены ионограммы ионозонда CADI, полученные 22 июня 2017 года в Васильсурске (рис.6). Резкой реакции на рентгеновскую вспышку не наблюдается, но за полтора часа наблюдений характер ионограмм значительно изменился. Наблюдался рост критических частот во время вспышки, после окончания вспышки появилась диффузность (F-рассеяние), а затем наблюдалось сильное ослабление отраженного сигнала.



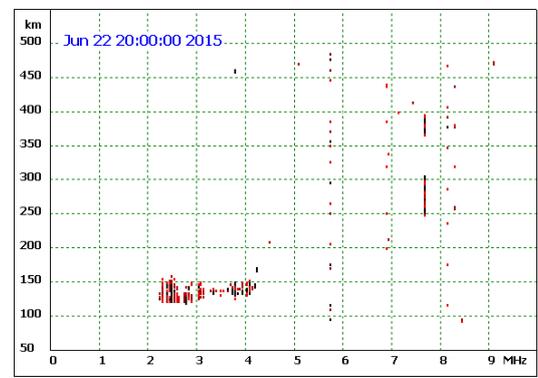
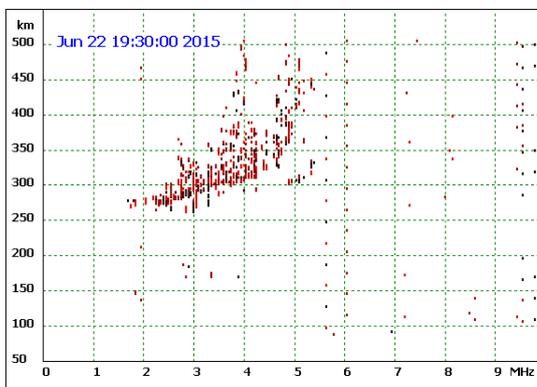


Рис. 6. Ионogramмы ионозонда CADI, полученные 22 июня 2017 года в Васильурске с 17:30 до 20:00 UT.

Ионogramмы ионозонда CADI, полученные 25 июня 2017 года в Васильурске до, во время и после рентгеновской вспышки класса M7.9, свидетельствуют о доминирующем влиянии геомагнитной бури на состояние ионосферы (рис.7). Реакция на рентгеновскую вспышку наблюдается в виде сильного поглощения с полной потерей трека отражения. Восстановление ионogramм происходит только после окончания рентгеновской вспышки.

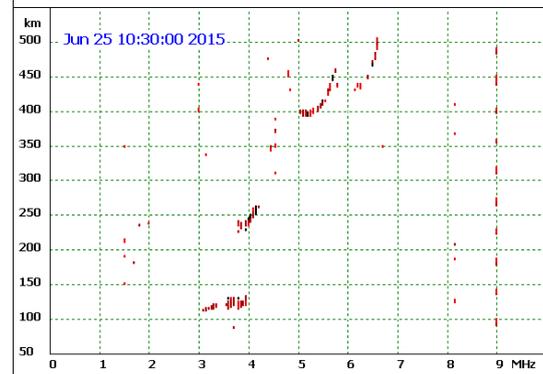
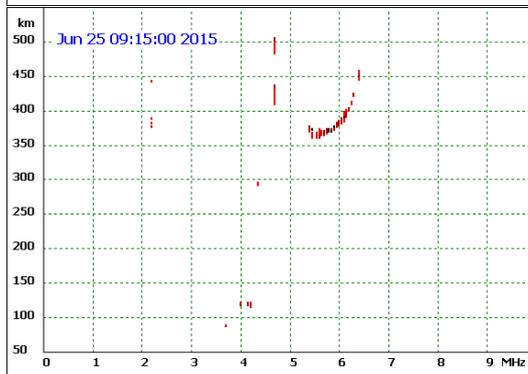
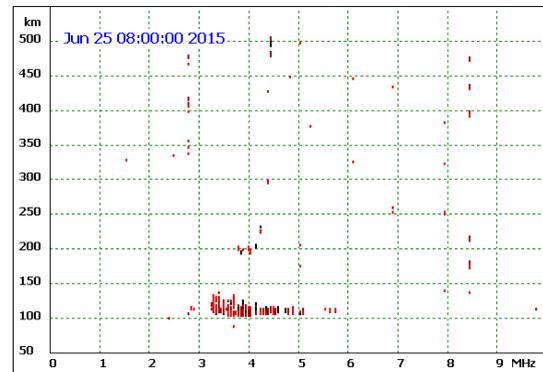
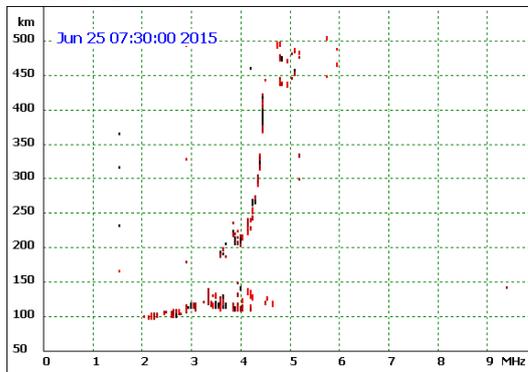


Рис. 7. Ионogramмы ионозонда CADI, полученные 25 июня 2017 года в Васильурске с 7:30 до 10:30 UT.

Заключение

В статье показано, что регистрация КВ сигналов на сети трасс наклонного ЛЧМ зондирования и вертикального зондирования ионосферы в режиме патрульных наблюдений позволяет получать данные о воздействии на ионосферный КВ канал различных гелио и геофизических явлений. Сочетание геомагнитной бури и двух рентгеновских вспышек в июне 2015 г. позволило оценить суммарный вклад этих явлений в характеристики сигналов на различных КВ трассах, изучить реакцию ионосферы на значительной территории европейской части России. Во время отрицательной фазы геомагнитной бури наблюдалось сильное поглощение радиоволн КВ диапазона, которое оказало негативное влияние на качество ионосферного КВ канала и привело к сокращению диапазона частот прохождения радиоволн вплоть до блэкаута.

Авторы благодарят всех сотрудников, обеспечивавших работу ЛЧМ передатчиков и станции вертикального зондирования ионосферы CADI.

Список литературы:

- [1] Н.Д. Филип, Н.Ш. Блаунштейн, Л.М. Ерухимов и др. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев. ШТИИИЦА, 1991. 289с.
[2] <http://tesis.lebedev.ru/>
[3] wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp
[4] В.П. Урядов и др. Динамика ионосферного КВ канала во время гелиогеофизических возмущений по данным наклонного зондирования на сети трасс евроазиатского региона. Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции «РАДИОЛОКАЦИЯ, НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ». Воронеж, 18-20 апреля 2017г. Том 1. 396 с. С.310-329.

**IMPACT OF HELIO AND GEOPHYSICAL DISTURBANCES
ON THE MIDDLE-LAATITUDE IONOSPHERE**

F.I. Vybornov, A.V. Dudina, V.A. Malysheva,

Key words: heliogeophysical disturbance, ionosphere, radio communication, propagation of radio waves, short-wave range, ionogram, LFM signal.

The results of observations of the impact of two X-ray flares on middle-latitude ionosphere are presented (M6.5 on June 22 and M7.9 on June 25, 2015). The impact occurred against a background of the strong geomagnetic storm that began on June 21, 2015. The ionosphere was diagnosed in patrol observation mode using the oblique and vertical sounding stations.