УДК 550.388.2

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 20 МАРТА 2015 ГОДА НА ТРАССАХ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЕВРОАЗИАТСКОМ ДОЛГОТНОМ СЕКТОРЕ

В. П. Урядов ¹ *, А. А. Колчев ², Ф. И. Выборнов ¹, В. В. Шумаев ³, И. А. Егошин ⁴, А. Г. Чернов ³

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород; ² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань; ³ ООО «СИТКОМ», г. Йошкар-Ола;

⁴ Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола, Россия

Представлены результаты измерений характеристик коротковолновых сигналов с линейной частотной модуляцией на трассах наклонного зондирования в евроазиатском регионе во время солнечного затмения 20.03.2015 и в соседние дни. Солнечное затмение проходило на фоне сильной магнитной бури. Установлено, что во время солнечного затмения на трассах наклонного зондирования с различной протяжённостью и ориентацией уменьшение максимальной и наименьшей наблюдаемых частот для F-моды составляло примерно 8÷14 % и 22÷33 % соответственно. Во время затмения имело место увеличение амплитуды сигнала на 3÷5 дБ. На трассе Ловозеро-Нижний Новгород в максимальной фазе солнечного затмения уменьшение электронной концентрации в слоях ионосферы E и F₂ в средней точке трассы достигало значений около 37 % и 22 % соответственно. По данным измерений вариаций максимальной и наименьшей наблюдаемых частот различных мод, времени группового запаздывания радиосигналов и результатам спектрального анализа установлено, что во время затмения наблюдались волновые возмущения с периодом в пределах 25÷50 мин. Вместе с тем, на ряде трасс регистрировались квазипериодические вариации максимальной и наименьшей наблюдаемых частот для F-моды с периодом в интервале 50÷80 мин, но с началом вариаций до начала затмения. Вероятно, в этих случаях вариации были результатом суперпозиции возмущений от двух источников: магнитной бури и солнечного затмения.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению ионосферных эффектов солнечного затмения обусловлен уникальной возможностью исследования ионосферных процессов в условиях достаточно быстрого (порядка 2 ч) контролируемого «выключения» и «включения» источника ионизации. Экранировка Луной солнечного излучения приводит к изменению баланса ионизации в небольшой области на пути движения лунной тени. Солнечные затмения сопровождаются целым комплексом физикохимических и динамических процессов в атмосфере и ионосфере Земли.

Эффекты солнечного затмения исследуются различными радиофизическими методами, включая вертикальное и наклонное зондирование [1–6], трансионосферное просвечивание спутниковыми сигналами [7], доплеровские измерения [8], измерения с помощью радара некогерентного рассеяния [9]. Реакция ионосферы на солнечное затмение проявляется в уменьшении электронной концентрации во всей толще ионосферы, уменьшении полного электронного содержания и электронной температуры. В работе [10] теоретически показано, что сверхзвуковое движение лунной тени нарушает тепловой баланс атмосферы и может являться источником акустикогравитационных волн. Обнаружению этих волн и их ионосферного отклика в виде перемещающихся ионосферных возмущений во время солнечного затмения посвящено большое число экспериментальных работ (см., например, [11–15] и цитируемую там литературу). В ходе многочисленных исследований определены преобладающие периоды волновых возмущений, находящиеся

^{*} uryadovvp@nirfi.sci-nnov.ru

Передающая станция	Диапазон частот, МГц	Скорость, кГц/с	Период зондирования, мин
Ловозеро	$2 \div 29$	550	10; 15
Певек	$2 \div 29$	550	15
Норильск	$4 \div 29$	500	5; 10
Михнево	$2 \div 15$	500	5
Васильсурск	$2,1{\div}15$	500	5
Соданкюла	$3{\div}16$	500	1
Кипр	8÷32	100	5

Таблица 1

в интервале 20÷60 мин. Экспериментально было установлено, что охлаждение озонового слоя в стратосфере во время солнечного затмения является основной причиной возбуждения акустикогравитационных волн [16].

В данной статье представлены результаты исследований отклика ионосферы на солнечное затмение 20 марта 2015 года по данным наклонного зондирования на трассах в евроазиатском регионе. Особенность этого затмения состояла в том, что оно проходило в условиях очень сильной магнитной бури, и это существенным образом сказалось на проявлении его эффектов. Ожидаемые ионосферные эффекты солнечного затмения (уменьшение электронной концентрации, генерация волновых возмущений) маскировались уменьшением электронной концентрации в отрицательную фазу бури и генерацией акустико-гравитационных волн при высыпании заряженных частиц в авроральной зоне и распространении возмущений на средние широты. В этой связи проведение исследований в обширном регионе в условиях одновременного воздействия двух чётко определённых источников возмущений в атмосфере Земли представляет, на наш взгляд, несомненный интерес для изучения относительного вклада возмущений различной природы в наблюдаемые характеристики радиосигналов.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился 16–21 марта 2015 года. Для выявления отклика ионосферы на солнечное затмение осуществлялось наклонное зондирование с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) на трассах с различной протяжённостью и ориентацией. Передатчики ЛЧМ-модулированных сигналов расположены в следующих пунктах: Ловозеро (Мурманская область, 68° с. ш., 35,02° в. д.), Норильск (69,36° с. ш., 88,36° в. д.), Певек (68,77° с. ш. 170,12° в. д.), Кипр (34,6° с. ш., 33° в. д.), Соданкюла (Финляндия, 67,4° с. ш., 26,6° в. д.), Михнево (Московская область, 54,95° с. ш., 37,75° в. д.) и Васильсурск (Нижегородская область, 56,1° с. ш., 46,1° в. д.). Параметры ЛЧМ-передатчиков приведены в табл. 1. Приём ЛЧМ-сигналов осуществлялся в Нижнем Новгороде (56,1° с. ш., 44,1° в. д.) и Йошкар-Оле (56,62° с. ш., 47,87° в. д.).

Параметры затмения для средних точек трасс для различных высот в ионосфере *h* приведены в табл. 2. Из неё видно, что во время наблюдения солнечного затмения степень наибольшего покрытия участков ионосферного распространения радиоволн лунной тенью находилась в пределах 0,62÷0,81 в зависимости от ориентации и протяжённости трассы. На трассе Кипр-Йошкар-Ола максимальная степень покрытия находилась в пределах 0,4÷0,5.

2. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Солнечное затмение 20 марта 2015 года проходило в условиях очень сильной магнитной бури. На рис. 1a, δ показаны временные зависимости геомагнитных индексов $D_{\rm st}$ и $K_{\rm p}$ для периода про-

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Ф. И. Выборнов и др.

478

N⁰	Tpacca	Длина,	Координаты	<i>h</i> , км	Время	Время	Время	Максималь-
	1	KM	средней	,	начала	максималь-	окончания	ная фаза
			точки		(UT),	ной фазы	(UT),	1
					ч:мин:с	(UT),	ч:мин:с	
						ч:мин:с		
1	Ловозеро—	1 404	62°14′7″ с. ш.,	100	09:18:06,7	10:24:46,4	11:30:21,5	0,77564
	Нижний		40°23′32″ в. д.	200	09:18:22,9	10:25:39,1	11:31:47,2	0,79893
	Новгород							
2	Васильсурск-	123	56°13′54″ с. ш.,	100	09:23:38,1	10:29:50,5	11:34:16,1	0,62952
	Нижний		45°3′11″ в. д.	200	09:23:47,1	10:30:51,8	11:36:03,2	0,65021
	Новгород							
3	Норильск—	2608	64°30′11″ с. ш.,	100	09:38:27,4	10:40:56,5	11:41:19,3	0,71477
	Нижний		61°0′43″ в. д.	200	09:38:57,6	10:42:01,5	11:42:53,7	0,73713
	Новгород							
4	Васильсурск-	124	56°22′42″ с. ш.,	100	09:26:22,0	10:32:01,1	11:35:43,9	0,61938
	Йошкар-Ола		46°58′9″ в. д.	200	09:26:33,0	10:33:04,3	11:37:32,6	0,63989
5	Михнево—	660	55°53′21″ с. ш.,	100	09:20:14,7	10:27:04,8	11:32:20,9	0,63906
	Йошкар-Ола		42°42′5″ в. д.	200	09:20:20,9	10:28:03,6	11:34:06,3	0,65993
6	Ловозеро—	1 423	62°27′20″ с. ш.,	100	09:20:36,6	10:26:54,1	11:31:56,5	0,76629
	Йошкар-Ола		42°40′5″ в. д.	200	09:20:54,4	10:27:48,8	11:33:24,0	0,78941
7	Соданкюла—	1548	62°1′9″ с. ш.,	100	09:14:18,0	10:21:26,0	11:27:46,0	0,79244
	Нижний		36°58′24″ в. д.	200	09:14:32,0	10:22:15,0	11:29:09,0	0,81605
	Новгород							
8	Певек—	5317	67°1′38″ с. ш.,	100	09:35:27,7	10:38:05,0	$1\overline{1:38:52,9}$	0,77020
	Йошкар-Ола		59°39′11″ в. д.	200	09:35:59,2	10:39:06,0	11:40:19,0	0,79353
			(для 2-го скачка)					
9	Кипр—	2625	46,2717° с. ш.,	100	09:15:19,9	10:19:39,4	11:22:43,8	0,44638
	Йошкар-Ола		38,584° в. д.	200	09:14:56,9	10:20:33,9	11:24:49,3	0,46401

Таблица 2

ведения эксперимента [17]. Как видно из рис. 1*a*, магнитная буря началась в 06:00 UT 17.03.2015. Главная фаза бури продолжалась до 00:00 UT 18.03.2015, когда индекс $D_{\rm st}$ достиг минимального значения $D_{\rm st\,min} = -228$ нTл. Затем началась фаза восстановления, которая продолжалась до 26.03.2015, т. е. затмение проходило на фазе восстановления магнитной бури. Во время магнитной бури максимальные значения индекса $K_{\rm p}$ составляли 7÷8 (см. рис. 1*б*).

По данным Геофизической обсерватории Соданкюла [18] в период с 17 по 20 марта имело место высыпание заряженных частиц и связанное с ним свечение ионосферы. Вследствие высыпания частиц и усиления авроральных токов в высокоширотной ионосфере происходит разогрев термосферы за счёт джоулева тепла и диссипации энергии высыпающихся из магнитосферы заряженных частиц, что является дополнительным источником, возбуждающим движения нейтрального газа [19]. Реакцией атмосферы на резкие изменения авроральных токов во время интенсивной магнитной бури является генерация акустико-гравитационных волн, ионосферным откликом которых являются перемещающиеся ионосферные возмущения, распространяющиеся от высоких к низким широтам.

Магнитная буря, как правило, проявляется в отрицательных и положительных изменениях электронной концентрации в большом интервале высот. 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*слоя из-за нагрева термосферы во время геомагнитных возмущений [20].

Отрицательная фаза магнитной бури характеризуется хорошей коррелированностью с авроральным индексом AE [21]. На рис. 1*6*, *г* показаны авроральные индексы AU, AL, AE=AU-AL



Рис. 1. Магнитные $D_{\rm st}$ (a), $K_{\rm p}$ (б) и авроральные AU, AL (c), AE и AO (c) индексы в период проведения наблюдений (17 марта 2015 года), AU > 0, AL < 0

и AO=(AU+AL)/2 для очень сильной магнитной бури 17.03.2015 [17]. Из рис. 1*6*, *г* видно, что с началом бури в 06:00 UT сильно растут все авроральные индексы. В период наблюдений до и во время магнитной бури авроральный индекс AE имел следующие максимальные значения: 16 марта $AE_{max} = 296$ нTл, 17 марта $AE_{max} = 1570$ нTл, 18 марта $AE_{max} = 1043$ нTл, 19 марта $AE_{max} = 1134$ нTл, 20 марта $AE_{max} = 719$ нTл, 21 марта $AE_{max} = 561$ нTл. Таким образом,

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Ф. И. Выборнов и др.

480



Рис. 2. Ионограммы с регистрацией перемещающегося ионосферного возмущения во время магнитной бури на трассе: Кипр—Йошкар-Ола 10:05 UT 18.03.2015 (*a*) и Васильсурск—Йошкар-Ола 08:44 UT 20.03.2015 (*б*). Здесь и далее $t_{\rm rp}$ — время группового запаздывания, более тёмные области соответствуют большей интенсивности

максимальные значения индекса AE имели место 17–19 марта 2015 года. Напомним, что индексы AU и AL показывают интенсивность восточного и западного аврорального электроджета соответственно. Индекс AE характеризует общую интенсивность электроджетов [17].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Магнитная буря существенным образом сказалась на проявлении ионосферных эффектов солнечного затмения 20 марта 2015 года, которое проходило на стадии её релаксации. В период с 17 по 21 марта распространение радиоволн на сети трасс наклонного ЛЧМ-зондирования проходило в условиях сильных ионосферных возмущений (рис. 2), наличия экранирующего спорадического слоя E_s , усиления поглощения радиоволн и сокращения диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов (рис. 3), вплоть до блэкаута, т. е. эффектов, сопровождающих сильную магнитную бурю [22–25]. Из рис. 3 видно, что, по сравнению с невозмущёнными условиями (рис. 3*a*), во время сильной магнитной бури (рис. 3*b*) на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола диапазон частот прохождения радиосигналов сократился с 12 до 3 МГц. Такое проявление отрицательной фазы ионосферной бури хорошо коррелирует со значительным усилением аврорального индекса AE (см. рис. 1*b*). В дальнейшем на стадии релаксации магнитной бури диапазон частот прохождения радиосигналов практически восстановился до невозмущённого уровня (рис. 3*b*).

Эффект солнечного затмения проявился в увеличении амплитуды сигнала и уменьшении максимальной наблюдаемой частоты и наименьшей наблюдаемой частоты на трассах наклонного ЛЧМ-зондирования. В качестве примера на рис. 4 показаны ионограммы на высокоширотной трассе Певек—Йошкар-Ола. Особенность этой протяжённой трассы заключается в том, что первая её половина находится вне солнечного затмения из-за низких углов возвышения Солнца (нулевых и отрицательных). В то же время протяжённая (около 2658 км) вторая половина трассы попадает в зону солнечного затмения с большой степенью покрытия $0,75\div0,79$. На рис. 4 приведены ионограммы для времён, близких к началу покрытия средней точки 2-го отражения в 09:38 UT (рис. 4a), максимуму покрытия для этой точки в 10:39 UT (рис. 46) и окончанию покрытия в 11:39 UT (рис. 4e). Из рис. 4 видно, что во время максимального покрытия наблюдались



Рис. 3. Ионограммы на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола, иллюстрирующие сокращение диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов и их ослабление во время магнитной бури (*б*, 14:17 UT. 18.03.2015) по сравнению с невозмущёнными условиями (*a*, 14:17 UT 16.03.2015) и на стадии релаксации бури (*b*, 14:17 UT 21.03.2015)



Рис. 4. Ионограммы на трассе Певек—Йошкар-Ола в день затмения 20.03.2015 в 09:46 UT (*a*), 10:46 UT (*б*) и 11:46 UT (*b*)

три эффекта: заметное (примерно на 3÷5 дБ) увеличение амплитуды сигнала в широкой полосе частот за счёт уменьшения поглощения; появление (усиление) дополнительных треков и уменьшение максимальной и наименьшей наблюдаемых частот (МНЧ и ННЧ соответственно) с 26,2 МГц и с 16,5 МГц в начале затмения до 18,9 МГц и 10,4 МГц в максимальной фазе соответственно. На рис. 5-8 показаны временные зависимости этих частот для различных трасс и мод в день затмения 20 марта и в контрольный день 21 марта 2015 года. Как уже говорилось, измерения проводились в день затмения 20 марта и в соседние (контрольные) дни 19 и 21 марта. В течение 19 марта наблюдалось сильное ионосферное возмущение, вызванное магнитной бурей, и результаты наклонного зондирования нельзя было использовать в качестве контрольных данных для сопоставления. В качестве контрольного дня были взяты данные для 21 марта, когда возмущение ионосферы было существенно меньше, хотя она и оставалась возмущённой. Интервал затмения для средних точек трасс зондирования для высоты 200 км (на рис. 7 для высоты 100 км) выделен серым прямоугольником [26]. Вертикальная линия внутри этого интервала отмечает время максимальной степени покрытия. Из рис. 5–8 видно, что на всех трассах в интервале затмения наблюдается довольно чёткий эффект уменьшения максимальной и наименьшей наблюдаемых частот, сопровождаемый квазипериодическими вариациями этих параметров. Отметим, что 21 марта регистрируемые максимальные наблюдаемые частоты для F-моды на 1 \div 2 МГц



Рис. 5. Временно́й ход МНЧ-F на трассе Васильсурск—Йошкар-Ола в день затмения 20.03.2015 (*a*) и в контрольный день 21.03.2015 (*б*)



Рис. 6. Временно́й ход МНЧ-F на трассе Ловозеро—Н.Новгород в день затмения 20.03.2015 (*a*) и в контрольный день 21.03.2015 (*б*)



Рис. 7. Временно́й ход МНЧ-F на трассе Ловозеро—Н.Новгород в день затмения 20.03.2015 (*a*) и в контрольный день 21.03.2015 (*б*)



Рис. 8. Временно́й ход ННЧ-F на трассе Норильск—Нижний Новгород в день затмения 20.03.2015

больше, чем в день затмения. Повышение частот связано с восстановлением динамического режима атмосферы на стадии релаксации магнитной бури. В табл. 3 приведены суммарные результаты обработки данных зондирования на различных трассах во время солнечного затмения. На трассе Соданкюла-Нижний Новгород вследствие низкой предельной частоты зондирования, равной 16 МГц, во время затмения максимальная наблюдаемая частота для *F*-моды (МНЧ-F) была выше этой частоты, и поэтому данных нет. Во время солнечного затмения уменьшение МНЧ-F относительно невозмущённого уровня варьируется от 7 до 10% для трасс с максимальной степенью покрытия 0,62÷0,66 (Васильсурск-Нижний Новгород, Васильсурск-Йошкар-Ола, Михнево—

Йошкар-Ола) и от 10 до 13 % для трасс с максимальной фазой покрытия 0,74÷0,79 (Ловозеро-Нижний Новгород, Ловозеро-Йошкар-Ола, Норильск-Нижний Новгород). Уменьшение наименьшей наблюдаемой частоты для *F*-моды (ННЧ-F) варьируется в пределах 22÷24 % для трассы Михнево-Йошкар-Ола и в пределах 25÷33 % для трасс Соданкюла-Нижний Новгород, Ловозеро-Йошкар-Ола и Норильск-Нижний Новгород. Уменьшение максимальной наблюдаемой частоты для *E*-моды (МНЧ-E) на трассах Ловозеро-Нижний Новгород и Соданкюла-Нижний Новгород составляет 16÷18,5 и 17÷22 % соответственно. На трассе Кипр-Йошкар-Ола с небольшой фазой покрытия 0,4÷0,5 уменьшение МНЧ-F в период затмения составляло величину около 5÷7%, сопоставимую с обычными вариациями частот на этой трассе. После окончания затмения на всех трассах зондирования максимальная и наименьшая наблюдаемые частоты восстанавливались до невозмущённого уровня для данного времени суток.

Nº	δ MHЧ-F,	δ HHЧ-F,	δ MHЧ-E,
трассы	%	%	%
1	$-(10\div12)$		$-(16 \div 18,5)$
2	$-(7 \div 9)$		
3	$-(11 \div 13)$	$-(30 \div 33)$	
4	$-(7,5 \div 9,5)$		
5	$-(8\div10)$	$-(20 \div 24)$	
6	$-(10 \div 12)$	$-(30 \div 32)$	
7		$-(25 \div 29)$	$-(17 \div 22)$
9	$-(5 \div 7)$		

Таблица 3

Наблюдалось запаздывание максимального эффекта уменьшения наблюдаемых частот примерно на 15÷20 мин относительно максимальной степени покрытия солнечного диска Луной для средней точки зондирования, что связано с инерционностью процесса релаксации параметров ио носферной плазмы.

Согласно моделированию данных зондирования на трассе Ловозеро—Нижний Новгород в максимальной фазе солнечного затмения уменьшение электронной концентрации в слоях ионосферы E и F_2 в средней точ-

ке трассы достигало значений 37% и 22% соответственно.

Результаты наклонного зондирования на сети радиотрасс использовались для обнаружения акустико-гравитационных волн и их ионосферного отклика в виде перемещающихся ионосферных возмущений, генерируемых на высотах озонового слоя в стратосфере при движении лунной тени в атмосфере Земли во время солнечного затмения. Наиболее чёткий эффект проявления акустико-гравитационных волн в виде квазипериодических вариаций МНЧ-Е и ННЧ-F в интервале



Рис. 9. Период осцилляций МНЧ-Е на трассе Ловозеро—Нижний Новгород 20.03.2015

солнечного затмения обнаружен на трассах Ловозеро—Нижний Новгород и Норильск—Нижний Новгород, т. е. на трассах с максимальной степенью покрытия 0,74÷0,79. Это хорошо видно на рис. 7 и 8, где показаны квазипериодические вариации МНЧ-Е и ННЧ-F с амплитудой 0,7 и 0,6 МГц соответственно.

Для выявления спектральных составляющих квазипериодических вариаций проводился спектральный анализ с применением «оконного» преобразования Фурье к данным с удалённым трендом. На рис. 9 и 10 приведены его результаты, стрелками отмечены моменты времени начала затмения (1), максимальной фазы (2) и оконча-



Рис. 10. Период осцилляций ННЧ-Е на трассе Норильск—Нижний Новгород 20.03.2015



Рис. 11. Период осцилляций ННЧ-F на трассе Михнево-Йошкар-Ола 20.03.2015

ния затмения (3). Из рисунков видно, что в интервале затмения проявляются осцилляции с доминирующим периодом в пределах 25÷35 мин для вариаций МНЧ-Е и 30÷45 мин для вариаций ННЧ-F. На трассе Ловозеро—Нижний Новгород колебания МНЧ-Е начинаются примерно через 30 мин после начала покрытия средней точки трассы и заканчиваются примерно через 35 мин после прохождения максимальной степени покрытия. На трассе Норильск—Нижний Новгород осцилляции начинаются раньше начала покрытия трассы, затем они усиливаются в интервале затмения, потом ослабевают и после прохождения максимальной степени покрытия прекращаются. Мы полагаем, что периодичность изменения МНЧ-Е и ННЧ-F в интервале затмения обусловлена генерацией акустико-гравитационных волн и их ионосферным откликом в виде перемещающегося ионосферного возмущения, модулирующим электронную концентрацию на высотах ионосферы.

Поскольку солнечное затмение проходило на фоне сильной магнитной бури, то возмущения, регистрируемые на ионограммах наклонного зондирования, могли быть результатом суперпозиции возмущений от двух источников. Это возмущения в авроральной зоне, возникающие в результате джоулева нагрева при высыпании заряженных частиц во время магнитной бури и распространяющиеся в южном направлении, и возмущения, связанные с движением лунной тени в атмосфере Земли. Такие ионограммы регистрировались на трассах Васильсурск—Йошкар-Ола (см. рис. 5), Васильсурск—Нижний Новгород, Михнево—Йошкар-Ола. При этом на фоне не очень сильного, но заметного эффекта уменьшения МНЧ-F и ННЧ-F на интервале затмения наблюдались квазипериодические вариации этих параметров с периодом в пределах 50÷80 мин, но с началом вариаций до начала затмения. На рис. 11 приведены результаты спектрального анализа



Рис. 12. Временной ход вариаций времени группового запаздывания односкачковой F-моды на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола в день солнечного затмения 20.03.2015 (1) и в контрольный день 21.03.2015 (2).



Рис. 13. Период осцилляций величины $t_{\rm rp}$ для односкачковой *F*-моды на трассе Ловозеро— Йошкар-Ола 20.03.2015

временны́х вариаций ННЧ-F для такого случая на трассе Михнево—Йошкар-Ола. Из него видно, что осцилляции с периодом в пределах 50÷70 мин появляются до начала затмения примерно в 08:50, затем период осцилляций уменьшается примерно до 40÷65 мин, они усиливаются в интервале затмения и практически заканчиваются до начала максимальной фазы затмения.

Для детектирования возмущений, связанных с солнечным затмением, проводилась также обработка данных наклонного зондирования для обнаружения вариаций времени группового запаздывания на частотах вдали от максимальной наблюдаемой частоты, чтобы исключить влияние частотной дисперсии на результаты обработки. На рис. 12 показан временной ход групповой задержки односкачковой *F*-моды на трассе Ловозеро—Йошкар-Ола для дня затмения 20 марта и контрольного дня 21 марта 2015 года. Как видно из этого рисунка, во время затмения имели место квазипериодические вариации времени группового запаздывания. На рис. 13 приведены результаты спектрального анализа для этих данных. Из него видно, что в интервале затмения наблюдаются осцилляции времени группового запаздывания с доминирующим периодом 25÷35 мин, что является достаточно убедительной иллюстрацией связи волновых возмущений с солнечным затмением.

выводы

Проведены наблюдения ионосферных эффектов солнечного затмения 20 марта 2015 года на сети трасс наклонного ЛЧМ-зондирования в обширном Евроазиатском регионе. Солнечное затмение проходило в условиях сильной магнитной бури. Отрицательная фаза магнитной бури, обусловленная изменениями состава термосферного газа и динамического режима термосферы в результате нагрева ионосферы за счёт джоулевой диссипации авроральных токов и поглощения высыпающихся частиц, вызвала сильное ухудшение условий распространения коротковолновых сигналов. При этом ионосферные эффекты солнечного затмения (уменьшение электронной концентрации в ионосфере и генерация акустико-гравитационных волн) маскировались аналогичными эффектами, характерными для магнитной бури. Тем не менее, в условиях двух чётко определённых источников возмущения атмосферы наличие разветвлённой сети трасс наклонного зондирования позволило идентифицировать и оценить вклад возмущений различной природы в

В. П. Урядов, А. А. Колчев, Ф. И. Выборнов и др.

486

наблюдаемые характеристики радиосигналов.

Основные результаты работы состоят в следующем.

1) Во время солнечного затмения на трассах с максимальной фазой покрытия 0,62÷0,66 (Васильсурск—Нижний Новгород, Васильсурск—Йошкар-Ола, Михнево—Йошкар-Ола) уменьшение МНЧ-F составляло около 8÷10%. На трассах с максимальной степенью покрытия 0,73÷0,79 (Ловозеро—Нижний Новгород, Норильск—Нижний Новгород, Соданкюла—Нижний Новгород, Ловозеро—Йошкар-Ола) уменьшение МНЧ-F и ННЧ-F составляло 12÷14% и 22÷33% соответственно.

2) На трассе Ловозеро—Нижний Новгород в максимальной фазе солнечного затмения (0,79) уменьшение электронной концентрации в слоях E и F_2 ионосферы в средней точке трассы достигало значений 37% и 22% соответственно.

3) Во время затмения имело место увеличение амплитуды сигнала, особенно заметное на протяжённой трассе Певек—Йошкар-Ола с большой фазой покрытия 0,75÷0,77, когда рост амплитуды составлял 3÷5 дБ.

4) По данным измерений вариаций максимальной и наименьшей наблюдаемых частот для *E*и *F*-слоёв, времени группового запаздывания радиосигналов и результатам спектрального анализа внутри интервала затмения зарегистрированы волновые возмущения с периодом в пределах 25÷50 мин, которые мы связываем с генерацией возмущений во время движения лунной тени в атмосфере Земли. Полученные значения периодов хорошо согласуются с результатами исследований генерации акустико-гравитационных волн во время солнечного затмения в спокойных геофизических условиях [11–15]. Вместе с тем, во время затмения на ряде трасс наблюдались квазипериодические вариации этих параметров с периодом в пределах 50÷80 мин, но с началом до начала затмения. Вероятно, эти вариации являлись результатом суперпозиции возмущений от двух источников, связанных с ионосферными эффектами магнитной бури и солнечного затмения.

Авторы благодарят всех сотрудников, обеспечивавших работу передающих пунктов, благодарят сервисную службу World Data Center for Geomagnetism (Kyoto, Japan) за возможность получения данных по индексам $D_{\rm st}$ и AE и сервисную службу Sodankyla Geophysical Observatory (Sodankyla, Finland) за возможность получения данных по свечению ионосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Buther E. C., Downing A. M., Kole K. D. // J. Atmos. Terr. Phys. 1979. V. 41, No. 5. P. 439.
- 2. Le H., Liu L., Yue X., Wan W. // Ann. Geophys. 2008. V. 26, No. 1. P. 107.
- Ковалёв А. А., Колесник А. Г., Колесник С. А., Колмаков А. А. // Солнечно-земная физика. 2008. Т. 2, вып. 12. С. 233.
- Урядов В. П., Леонов А. М., Понятов А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 8. С. 682.
- 5. Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г., Урядов В. П. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18, № 9. С. 14.
- 6. Chen G., Wu C., Huang X., et al. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2015. V. 120, No. 4. P. 3009.
- 7. Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., Lesyuta O. S. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 1933.
- Кащеев С.Б., Зализовский А.В., Колосков А.В. и др. // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 353.
- 9. Baron M. J., Hunsucker R. D. // J. Geophys. Res. 1973. V. 78, No. 31. P. 7451.
- 10. Chimonas G., Hines C. O. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75, No. 4. P. 875.
- 11. Jones T. B., Wright D. M., Milner J., et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2004. V. 66, No. 5. P. 363.

- 12. Hanuise C., Broche P., Ogubazghi G. // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, No. 11. P. 963.
- 13. Fritts D. C., Luo Z. // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, No. D2. P. 3011.
- 14. Altadill D., Solé J. G. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, No. A10. P. 21,419.
- 15. Chen G., Zhao Z., Zhang Y., et al. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art. no. A09314.
- 16. Gerasopoulos E., et al. // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8, No. 17. P. 5 205.
- 17. sec.noaa.gov
- 18. www.sgo.fi
- 19. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.
- 20. Danilov A. D. // J. Atm. Solar Terr. Phys. 2001. V. 63, No. 5. P. 441.
- 21. Данилов А. Д., Белик Л. Д. // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31, № 2. С. 209.
- 22. Hunsucker R. D. // IEEE Proc. Antennas Propag. 1992. V. 40. P. 818.
- Milan S. E., Lester M., Jones T. B., Warrington E. M. // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 1998. V. 60, No. 6. P. 617.
- 24. LaBelle J. // Ann. Geophys. 2004. V. 22, No. 5. P. 1705.
- 25. Uryadov V. P., Ponyatov A. A., Vertogradov G. G., et al. // Int. J. Geomagn. Aeron. 2005. V. 6, No. 1. Art. no. GI1002.
- 26. 26. http://eclipse.gsfc.nasa.gov

Поступила в редакцию 15 декабря 2015 г.; принята в печать 8 марта 2016 г.

IONOSPHERIC EFFECTS OF A SOLAR ECLIPSE OF MARCH 20, 2015 ON THE OBLIQUE SOUNDING PATHS IN THE EURASIAN LONGITUDINAL SECTOR

V. P. Uryadov, A. A. Kolchev, F. I. Vybornov, V. V. Shumaev, I. A. Egoshin, and A. G. Chernov

The results of measuring HF signals on oblique chirp sounding paths in the Eurasian region during a solar eclipse of March 20, 2015 and the neighboring days are presented. The solar eclipse took place against the background of a strong magnetic storm. It was established that during the solar eclipse on the oblique sounding paths of different length and orientation the decrease in MOF F and LOF F was 8–14% and 22–33%, respectively. During the eclipse, the signal amplitude increased by 3–5 dB. On the Lovozero—Nizhny Novgorod path in the maximum phase of the solar eclipse, the electron density decrease in the ionospheric E and F_2 layers at the midpoint of the path reached 37% and 22%, respectively. According to the MOF and LOF variation measurements for various modes, the group delay time of radio signals, and the results of spectral analysis, it was found that during the eclipse there were wave disturbances with a period of 25 to 50 min. However, quasi-periodic variations of MOF F and LOF F having a a period of 50 to 80 min but which started before the eclipse were detected on some paths. Probably, in these cases, the variations were a result of the superposition of disturbances from two sources, namely, the magnetic storm and the solar eclipse.