

Отклик характеристик распространения КВ-радиоволн на вариации рентгеновского излучения

В.А. Иванова¹, Н.М. Полех¹, В.И. Куркин¹, Л.В. Чистякова¹,
М.Д. Пежемская¹, И.Г. Брынько¹, А.И. Орлов¹, А.В. Подлесный¹,
З.Ф. Думбрава², И.Н. Поддельский²

¹ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

E-mail: moshkova@iszf.irk.ru

² *Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,*

п. Паратунка, Камчатский край, Россия

E-mail: podd-igor@yandex.ru

В работе проводится анализ данных по наклонному и квазивертикальному зондированию в декаметровом диапазоне на трассах, расположенных над территорией Сибири и Дальнего Востока. Для четырех солнечных вспышек класса М, зарегистрированных 30.07.2011 (M9.3), 02.08.2011 (M1.4), 04.08.2011 (M9.3) и 09.08.2011 (M2.5), оценивалась наименьшая наблюдаемая частота (ННЧ), характеризующая поглощение сигнала на трассе. Изменения ННЧ для этих дней сопоставлялись с вариациями ННЧ 24.07.2011, когда солнечных вспышек не наблюдалось, а магнитное поле было спокойным. На всех трассах зарегистрировано резкое увеличение ННЧ во время исследуемых вспышек по сравнению со спокойными условиями. В момент максимального всплеска рентгеновского излучения по данным спутников GOES на ионограммах наблюдалось исчезновение отражений от слоев Es и F1, при этом распространение сигналов происходило только за счет отражений от слоя F2. Таким образом, в результате проведенного исследования влияния всплесков рентгеновского излучения на распространение КВ-радиоволн отмечается резкое увеличение поглощения радиосигнала на рассмотренных трассах в момент максимумов рентгеновских всплесков, а также уменьшение частотного диапазона.

Ключевые слова: распространение декаметровых радиоволн, наименьшая наблюдаемая частота, всплески рентгеновского излучения, внезапное ионосферное возмущение.

Введение

Исследование проявлений солнечной активности в верхней атмосфере Земли является одной из важных задач солнечно-земной физики. Как известно, существует два основных канала передачи энергии от Солнца. Первый канал связан с распространением электромагнитного излучения различных длин волн, второй – с движением заряженных частиц различных скоростей и энергий. В данной работе рассмотрены кратковременные воздействия на ионосферу Земли, связанные со всплесками мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 ангстрем. Согласно классификации, данной в работе (Брюнелли, Намгаладзе, 1988), в результате таких воздействий наблюдаются внезапные ионосферные возмущения, проявляющиеся в увеличении ионизации в D- и E-областях освещенной ионосферы. Рост ионизации в нижних слоях ионосферы приводит к увеличению поглощения коротковолновых радиосигналов, которое связано с величиной наименьшей наблюдаемой частоты (Дриацкий и др., 1972).

Целью данного исследования является оценка вариаций наименьших наблюдаемых частот во время четырех солнечных вспышек в июле и августе 2011 г.

Анализ экспериментальных данных

С 2005 г. в отделе физики околоземного космического пространства ИСЗФ СО РАН проводятся ежеквартальные циклы непрерывных наблюдений в течение месяца на трассах наклонного зондирования, расположенных над территорией Сибири и Дальнего Востока. В последние несколько лет в режиме постоянного мониторинга работает трасса квазивертикального зондирования Усолье Сибирское – Торы. Эти измерения позволяют детально исследовать вариации характеристик распространения КВ-радиоволн в различных гелиогеофизических условиях, в том числе во время рентгеновских всплесков.

Гелиогеофизическая обстановка

По данным о рентгеновского излучении в диапазоне 1–8 Å, полученным на спутнике GOES (Национальный геофизический центр данных NOAA, США, <http://www.ngdc.noaa.gov>), 30.07.2011, 02.08.2011, 04.08.2011 и 09.08.2011 были зарегистрированы солнечные вспышки балла М (*рис. 1*). 30 июля 2011 г. солнечная вспышка класса М9.3 началась в 02:04 UT, достигла максимума в 02:09 UT и завершилась в 02:12 UT. 2 августа 2011 г. солнечная вспышка класса М1.4 наблюдалась с 05:19 UT, достигнув максимума в 06:19 UT, и закончилась в 06:48 UT. 4 августа 2011 г. начало вспышки класса М9.3 было зарегистрировано в 03:41 UT, ее окончание в 04:04 UT с максимумом в 03:41 UT. Источником трех данных вспышек была активная область 1261 (по данным спутника КОРОНАС-ФОТОН, проект ТЕСИС, Россия, <http://www.thesis.lebedev.ru>).

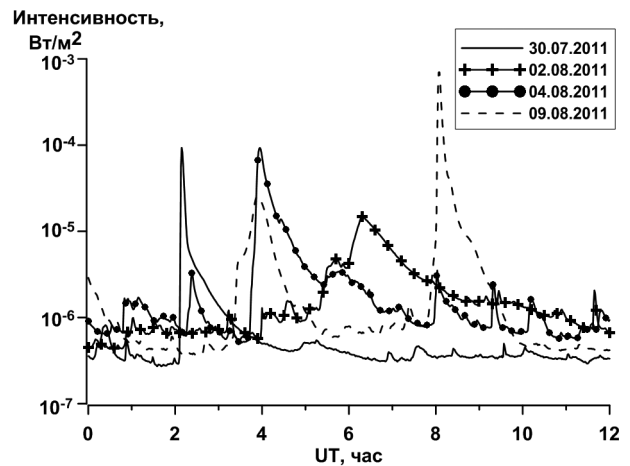


Рис. 1. Вариации рентгеновского излучения по данным спутника GOES (1–8 Å) для исследуемых дней в июле и августе 2011 г.

9 августа 2011 г. солнечная вспышка класса М2.5 была зарегистрирована с 03:19 UT по 04:08 UT (с максимумом в 03:54 UT). Сильная вспышка балла X6.9 в этот же день была зарегистрирована с 07:48 UT по 08:08 UT, достигнув максимума в 08:05 UT. Источником двух вспышек 09.08.2011 г. стала активная область 1263.

В *табл. 1* приведены значения суммарного индекса Кр для исследуемых дней. 24 июля, 2 и 4 августа 2011 г. были спокойными в геомагнитном отношении днями. 30 июля 2011 г. после 12 UT было зарегистрировано увеличение индекса АЕ (Мировой центр данных в Киото, Япония, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>), превысившее 500 нТл, а главная фаза магнитной бури по данным об изменениях индекса Dst началась в 19 UT. 9 августа 2011 г. наблюдалась фаза восстановления после магнитной бури, начавшейся 5 августа 2011 г. Индекс АЕ в первой половине дня 09.08.2011 г. достигал 500 нТл.

Таблица 1. ΣKp для исследуемых дней

Дни	24.07.2011	30.07.2011	02.08.2011	04.08.2011	09.08.2011
ΣKp	7+	20+	6-	6+	14+

Вариации наимизших наблюдаемых частот

Летний комплексный эксперимент 2011 г. проводился с 11 июля по 13 августа на четырех трассах: Магадан – Торы, Хабаровск – Торы, Норильск – Торы и Усолье Сибирское – Торы. Протяженность исследуемых трасс составляет 3100, 2300, 2200 и 120 км, соответственно. Координаты передатчиков: в Магадане – 60° с. ш., $150,7^\circ$ в. д., в Хабаровске – $47,6^\circ$ с. ш., $134,7^\circ$ в. д., в Норильске – $69,2^\circ$ с.ш., 88° в. д., в Усолье Сибирском – $52,5^\circ$ с. ш., 104° в. д. Координаты приемника в пос. Торы (Бурятия) – $51,8^\circ$ с. ш., 103° в. д. Интервалы между зондированиями составляли 5 минут на трассах наклонного зондирования и 1 минуту на трассе квазивертикального зондирования.

Обработка дистанционно-частотных характеристик (ионограмм) наклонного и квазивертикального зондирования проводилась следующим образом. Снималась наимизшая наблюдаемая частота (ННЧ) – минимальная частота (рис. 2), при которой сигналы передатчика наклонного зондирования наблюдаются на ионограмме, независимо от способа распространения (Ходжа-Ахмедов, 1972). Рассматривались только дневные условия с 0 до 10 UT. В качестве спокойного уровня использовались значения ННЧ для 24.07.2011 г., когда солнечные вспышки не регистрировались, а геомагнитное поле было невозмущенным. Рассчитывались относительные отклонения наимизших наблюдаемых частот в день регистрации рентгеновского всплеска от значений ННЧ для спокойного дня.

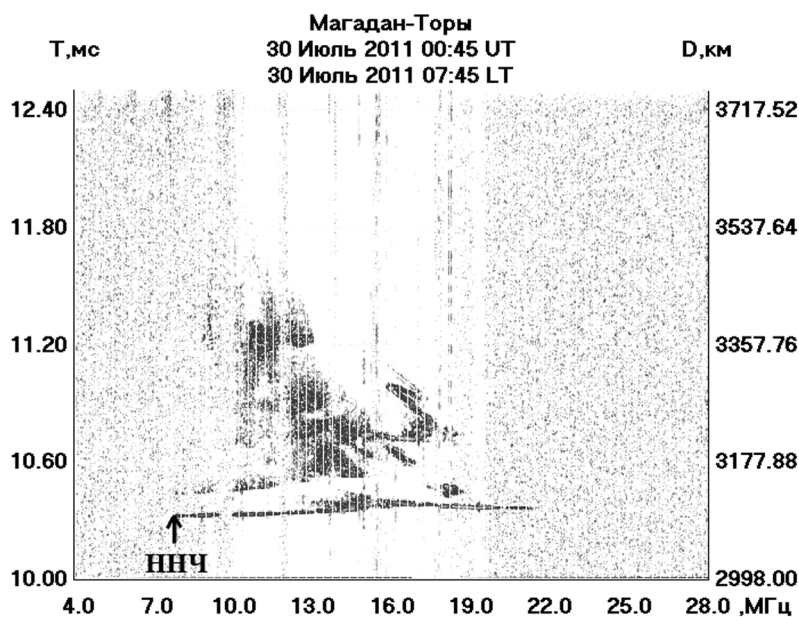


Рис. 2. Наимизшая наблюдаемая частота на ионограмме наклонного зондирования

В качестве примера на рис. 3 приведены последовательные ионограммы наклонного зондирования, полученные на трассе Магадан – Торы во время солнечной вспышки

класса M9.3 30.07.2011 В 02:05 UT (рис. 3а), минуту спустя после начала рентгеновского всплеска, на ионограмме наблюдались отражения от слоев F1 и F2, также было зарегистрировано отражение от слоя Es. Величина ННЧ определялась по слою Es. В 02:10 UT (рис. 3б), через минуту после достижения максимума рентгеновского всплеска, на ионограмме исчезли отражения от слоя Es и отражения от слоя F1. Величина ННЧ в этот момент определялась по слою F2. В 02:15 (рис. 3в) и в 02:20 UT (рис. 3г) наблюдалось постепенное восстановление отражений от нижележащих слоев ионосферы. После 02:20 UT величина ННЧ вновь стала определяться сигналом, отраженным от слоя Es.

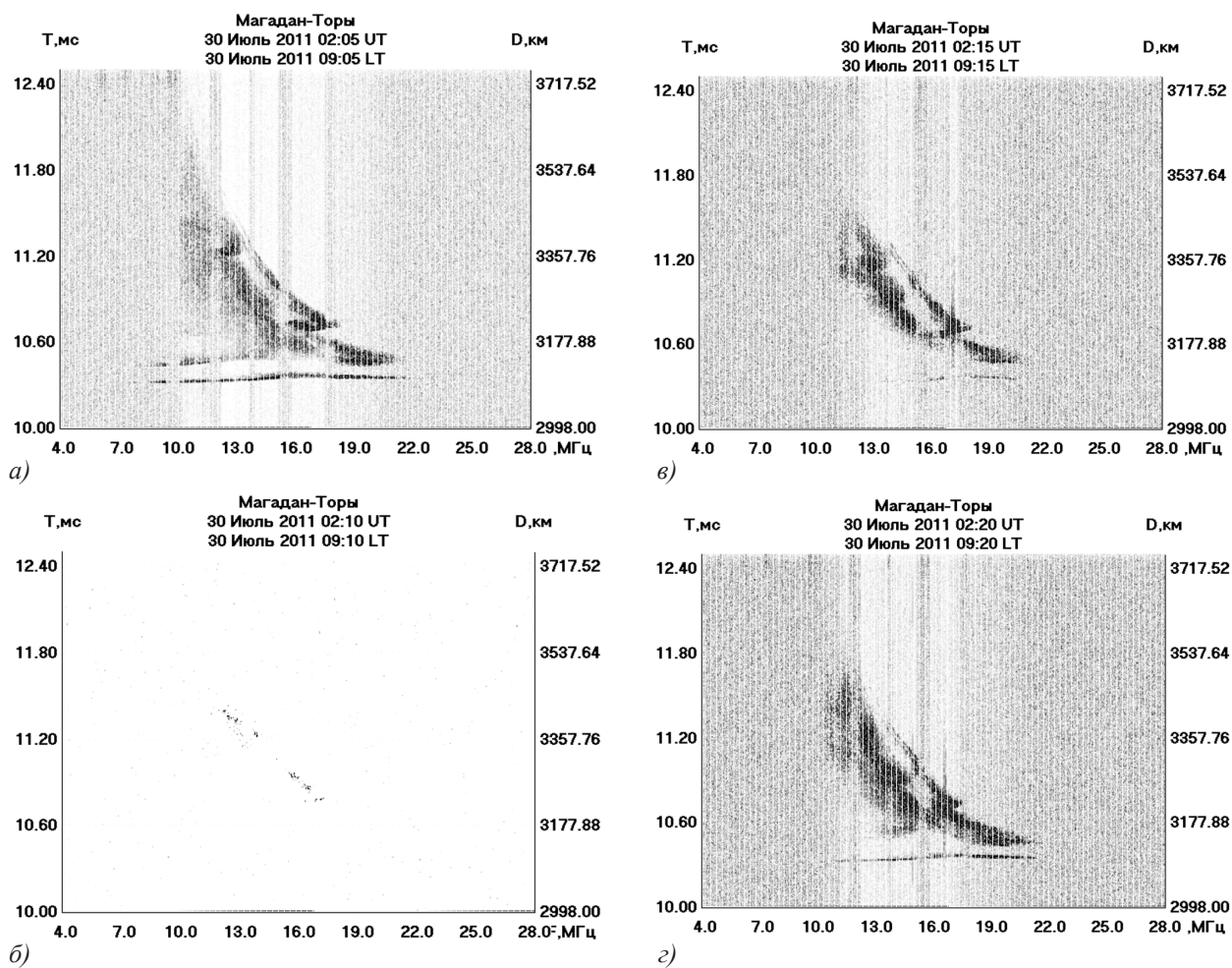


Рис. 3. Ионограммы, полученные на трассе Магадан–Торы во время солнечной вспышки балла M9.3 30 июля 2011 г.

На рис. 4–7 приведены относительные отклонения (в процентах) наименьших наблюдаемых частот, полученных на исследуемых трассах для четырех дней 30.07.2011, 02.08.2011, 04.08.2011 и 09.08.2011, относительно значений ННЧ для спокойного дня 24.07.2011 для трасс Усолье Сибирское – Торы (крестики), Хабаровск – Торы (треугольники), Норильск – Торы (ромбы) и Магадан – Торы (кружки). Наибольший отклик на всплески рентгеновского излучения наблюдался в основном на трассе квазивертикального зондирования Усолье Сибирское – Торы. В связи с тем что на трассе Усолье Сибирское – Торы измерения проходили в минутном режиме, это позволило зафиксировать моменты максимального отклика ННЧ на рентгеновские всплески. Итак, 30 июля 2011 г. отклик ННЧ на всплеск рентгеновского излучения

на трассе Усолье-Сибирское – Торы достиг 148% в 2:12 UT (рис. 4). 02.08.2011 отклонения ННЧ от спокойного уровня на этой трассе составили 77% в 6:13 UT (рис. 5). Максимальный отклик на всплеск рентгеновского излучения 04.08.2011 наблюдался на трассе наклонного зондирования Хабаровск – Торы и достиг в 4:06 UT 136% (рис. 6). 9 августа 2011 г. отклик ННЧ на рентгеновскую вспышку балла M2.5 на трассе квазивертикального зондирования Усолье Сибирское – Торы достиг 147% в 4:01 UT (рис. 7). На остальных исследуемых трассах также отмечаются значительные увеличения относительных отклонений ННЧ от уровня спокойного дня во время регистрации всплесков рентгеновского излучения.

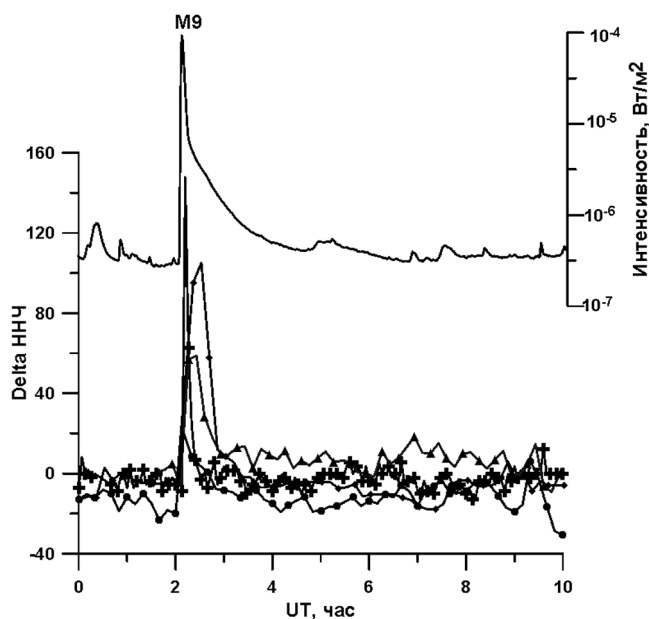


Рис. 4. Относительные отклонения ННЧ (в %) 30.07.2011 от значений ННЧ для невозмущенного дня 24.07.2011 для трасс: Усолье Сибирское – Торы (крестики), Хабаровск – Торы (треугольники), Норильск – Торы (ромбы) и Магадан – Торы (кружки)

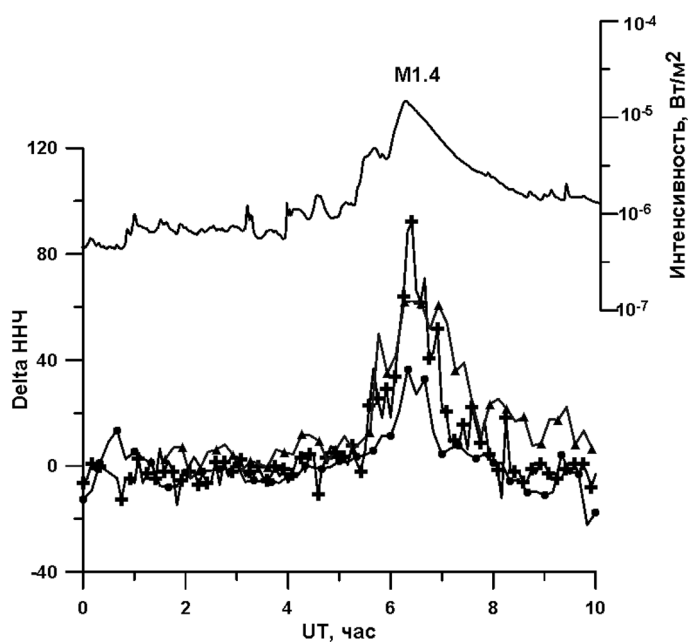


Рис. 5. Относительные отклонения ННЧ (в %) 02.08.2011 от значений ННЧ 24.07.2011 для исследуемых трасс

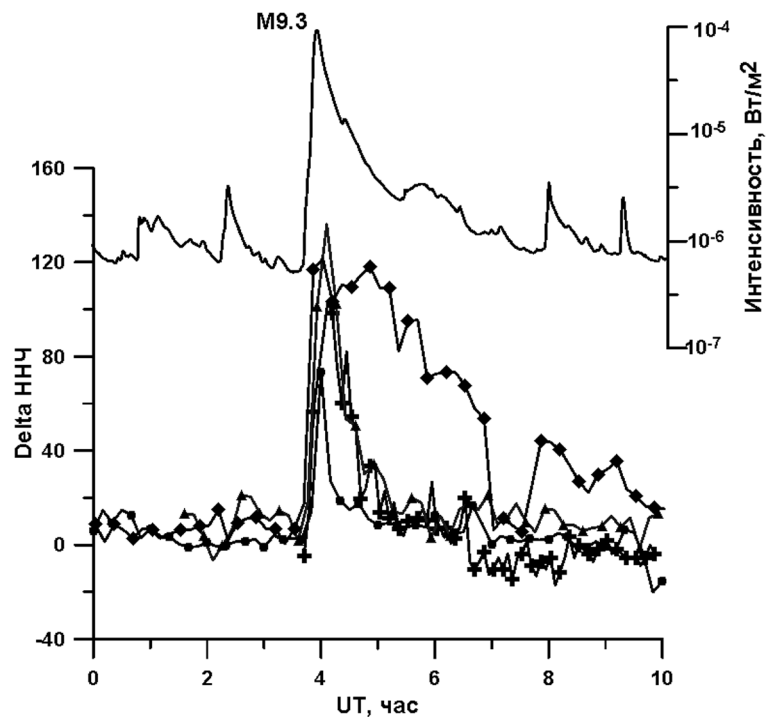


Рис. 6. Относительные отклонения ННЧ (в %) 04.08.2011 от значений ННЧ 24.07.2011 для исследуемых трасс

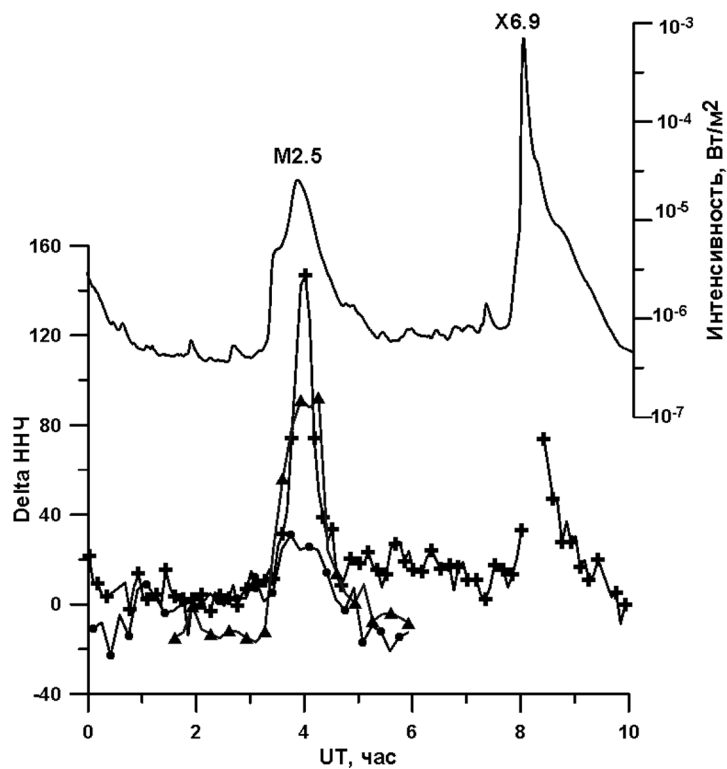


Рис. 7. Относительные отклонения ННЧ (в %) 09.08.2011 от значений ННЧ 24.07.2011 для исследуемых трасс

Выводы

В результате проведенного исследования было установлено, что максимальное относительное отклонение величины наименьшей наблюдаемой частоты по сравнению

со спокойным уровнем в моменты всплесков рентгеновского излучения во время рентгеновских всплесков класса M 30 июля 2011 г. достигало 148% на трассе Усолье Сибирское – Торы, 02.08.2011 составило 77% на трассе Усолье Сибирское – Торы, 04.08.2011 достигло 136% на трассе наклонного зондирования Хабаровск – Торы и 09.08.2011 147% на трассе Усолье Сибирское – Торы (во время рентгеновского всплеска класса M2.5). На остальных трассах во время исследуемых рентгеновских всплесков также был зарегистрирован рост относительного отклонения ННЧ от величин, снятых в спокойных условиях. Время наибольших вариаций ННЧ совпало с моментом максимумов интенсивности рентгеновских всплесков.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 11-05-00892-а, 13-05-00979-а и 12-05-92103-ЯФ_а, а также при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 8388, Государственный контракт № 14.518.11.7065). Авторы выражают благодарность Д.В. Иванову (ИСЗФ СО РАН) за ведение базы данных.

Литература

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.
2. Дриацкий В.М., Смирнов В.Б., Ходжа-Ахмедов Ч.Л. Аномальное поглощение радиоволн в нижней ионосфере и наименьшие применимые частоты // Наклонное зондирование ионосферы. Вып. 1. Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. С. 156–164.
3. Ходжа-Ахмедов Ч.Л. Интерпретация и обработка ионограмм наклонного зондирования // Наклонное зондирование ионосферы. Вып.1. Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. С. 99–110.

Response of the HF radio wave propagation characteristics to the X-ray flux variations

V.A. Ivanova¹, N.M. Polekh¹, V.I. Kurkin¹, L.V. Chistyakova¹, M.D. Pezhemskaya¹, I.G. Brynko¹, A.I. Orlov¹, A.V. Podlesny¹, Z.P. Dumbrava², I.N. Poddelsky²

¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

E-mail: moshkova@iszf.irk.ru

² Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS

Paratunka, Kamchatka region, Russia

E-mail: podd-igor@yandex.ru

In this work we carry out the analysis of HF oblique-incidence and quasi-vertical sounding data over paths located in the Siberian and Far Eastern regions. For four M-class solar flares registered on 30.07.2011 (M9.3), 02.08.2011 (M1.4), 04.08.2011 (M9.3) and 09.08.2011 (M2.5) the lowest observed frequencies (LOF) have been evaluated. LOF values characterize signal absorption over the paths. LOF variations for studied days have been compared with LOF variations for 24.07.2011 when there were registered no solar flares and magnetic field was quiet. Sharp LOF increases during investigated X-ray solar flares in comparison with quiet conditions were registered over all paths. In the moment of maximum of X-ray of solar flares (by GOES satellite data) disappearance of reflections from Es- and F1-layers has been observed, HF signals propagation occurred by means of reflections from F2-layer. Thereby as a result of our investigation of response of the HF radio wave propagation characteristics to the X-ray flux variations sharp increase of radio waves absorption and decrease of frequency range during solar flares has been observed.

Keywords: high frequency radio wave propagation, lowest observed frequency, X-ray solar flares, sudden ionospheric disturbance.