

УДК 550.388

С. В. КАЦКО, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, Л. Ф. ЧЕРНОГОР

НАБЛЮДЕНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ НАД ХАРЬКОВОМ В ТЕЧЕНИЕ ФАЗЫ РЕЛАКСАЦИИ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 14–17 МАРТА 2016 Г.

Наведено результати спостереження ефектів в іоносферній плазмі над Харківом під час фази релаксації помірної геомагнітної бурі 14–17 березня 2016 р. Спостереження проведені за допомогою радару некогерентного розсіяння та цифрового іонозонду, розташованих поблизу м. Харкова. Магнітна буря супроводжувалася іоносферною бурєю зі змінними фазами.

Ключові слова: геомагнітна буря, іоносфера, некогерентне розсіяння, критична частота, швидкість переносу плазми.

Приведены результаты наблюдения эффектов в ионосферной плазме над Харьковом во время фазы релаксации умеренной геомагнитной бури 14–17 марта 2016 г. Наблюдения проведены с помощью радара некогерентного рассеяния и цифрового ионозонда, расположенных вблизи г. Харькова. Магнитная буря сопровождалась ионосферной бурей со знакопеременными фазами.

Ключевые слова: геомагнитная буря, ионосфера, некогерентное рассеяние, критическая частота, скорость переноса плазмы.

The study results ionosphere plasma effects observing over Kharkiv during the relaxation phase of moderate geomagnetic storm on March 14–17, 2016 are presented. The observations are carried out by the Kharkiv incoherent scatter radar and the digital ionosonde. The magnetic storm was accompanied by ionospheric storm with sign-variable phases.

Key words: geomagnetic storm, ionosphere, incoherent scatter, critical frequency, plasma transport velocity.

Введение. Исследование ионосферных эффектов в результате воздействия космической погоды остается важной проблемой геофизики. Основное внимание уделяется поиску закономерностей пространственно-временного распределения параметров ионосферной плазмы во время магнитовозмущенных условий как на основе использования анализа экспериментальных данных, так и с помощью результатов моделирования [1–3].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований ионосферы над г. Харьков в течение фазы релаксации геомагнитной бури 14–17 марта 2016 г. с помощью радара некогерентного рассеяния Института ионосферы (г. Харьков) и цифрового ионозонда, расположенного в Радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина. Наблюдения проводились с 18:00 UT 16 марта 2016 г. по 05:00 UT 18 марта 2016 г. (здесь и далее время в UT – universal time).

Средства радиозондирования геокосмоса.

Радар некогерентного рассеяния. В Ионосферной обсерватории Института ионосферы расположен единственный в среднеширотной Европе радар некогерентного рассеяния (НР). Радар с зенитной двухзеркальной параболической антенной диаметром 100 м работает на частоте 158 МГц, коэффициент усиления антенны около 12700. Импульсная мощность радиопередающего устройства равнялась 2 МВт.

Диапазон исследуемых высот зависит от режима работы радара и составляет 100–1500 км. Работа радара НР в режиме применения составного зондирующего сигнала с коротким (130 мкс) и длинным (около 660 мкс) импульсом обеспечивает высотное разрешение примерно 20 и 100 км в диапазонах высот 100–550 и 200–1000 км соответственно.

Для уменьшения статистической погрешности измерения мощности и корреляционной функции НР сигнала, по которым определяются параметры ионосферы, был выбран интервал обработки сигнала

15 мин. При этом относительная погрешность оценивания мощности сигнала не превышает 1–3 %. Подробное описание устройств радара дано в [4, 5].

Цифровой ионозонд. Ионозонд Радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина использует для излучения и приема радиоволн вертикальные широкополосные ромбические антенны Айзенберга. Высота подвеса антенн равняется 18 м, а их горизонтальный размер достигает 50 м. Зондирующие радиоимпульсы длительностью 100 мкс с частотой следования 125 Гц, несущей частотой в диапазоне 1–16 МГц и мощностью до 1.5 кВт в импульсе излучаются широкополосным радиочастотным усилителем мощности передатчика «Бриг-2».

Геомагнитная обстановка. В результате воздействия области коротации между быстрыми и медленными потоками солнечного ветра на магнитосферу Земли H -компонента геомагнитного поля 14 марта с 17:15 (см. рис. 1) начала резко увеличиваться, что и определило начало геомагнитной бури.

В свою очередь B_z -компонента межпланетного магнитного поля около 18:00 (см. рис. 2) достигла максимального значения 11.7 нТл, после чего быстро начала уменьшаться до отрицательных значений. Максимального положительного значения геомагнитный индекс D_{st} также достиг в 18:00 и составил 47 нТл, а затем он уменьшился до –55 нТл. После этого начался рост планетарного индекса K_p до 5 в интервале времени 00:00–03:00 15 марта. Последующие увеличения индекса K_p до значений 5 и 5+ отмечались 15 и 16 марта.

Ионосферные эффекты. *Вариации критической частоты.* С началом измерений в Ионосферной обсерватории индекс K_p увеличился с 1.3 до 3.0, а затем составлял 4.7 с 21:00 16 марта до 06:00 17 марта.

В свою очередь 16 марта над Харьковом около 21:00 (увеличение индекса K_p с 3.0 до 4.7) произошла

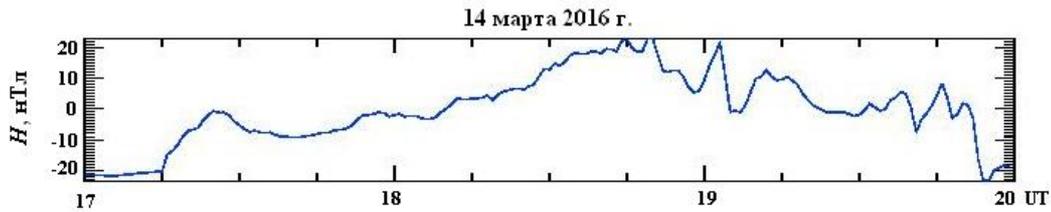


Рис. 1 – Одноминутные вариации H -компоненты геомагнитного поля 14 марта 216 г. с 17:00 до 20:00 UT.

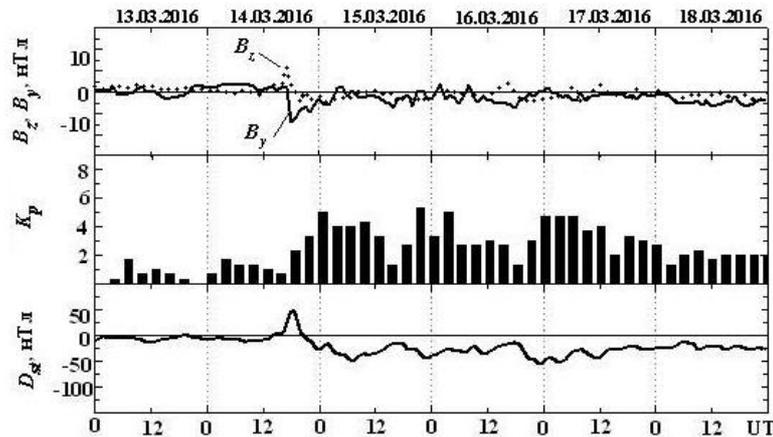


Рис. 2 – Состояние космической погоды: временные вариации B_y - (точки) и B_z -компонент (линия) межпланетного магнитного поля, индексов геомагнитной активности K_p и D_{st} в период 13–18 марта 2016 г.

смена фазы отрицательного ионосферного возмущения на положительное, что определяется вариациями критической частоты f_oF2 слоя F2 (см. рис. 3). При этом отклонение критической частоты δf_oF2 изменилось с -34% до $+30\%$ соответственно (рис. 3). Для оценки эффектов использовались данные ионозонда, расположенного на той же широте, что и радар НР, в Прухонице (Чехия) с учетом сдвига относительно местного времени, которые получены при спокойном состоянии ионосферы 13 марта 2016 г. Увеличение критической частоты длилось около 3-х часов. В это время значения индекса D_{st} были минимальными за весь период возмущения с 14 по 17 марта и составили -55 нТл. После чего значения критической частоты снова стали уменьшаться по сравнению с предшествующими невозмущенными условиями 13 марта 2016 г., и относительное отклонение δf_oF2 достигало -20% . С последующим увеличением индекса K_p до 4.7 (в интервале времени 00:00–06:00) и 3.7 (с 06:00 до 09:00) 17 марта δf_oF2 составило около -20% , -30% и -28% соответственно. После этого значения δf_oF2 приближались к нулю.

Следующие значительные изменения δf_oF2 составили -20% около 15:00 (во время увеличения K_p с 2.0 до 3.3) и $+22\%$ около 22:00 (уменьшение K_p с 3.0 до 2.7).

На рис. 3 также приведены временные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 N_mF2 , поведение которых определяется соответственно вариациями критической частоты.

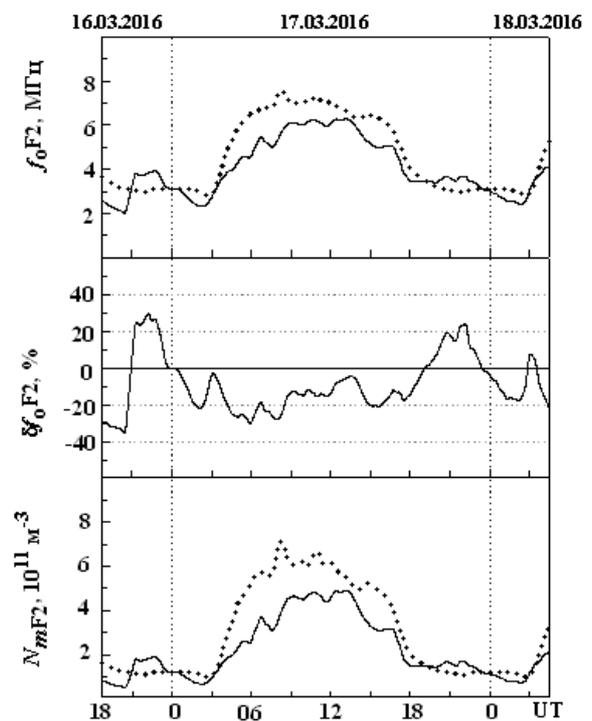


Рис. 3 – Временные вариации критической частоты f_oF2 , ее относительного отклонения δf_oF2 и концентрации электронов N_mF2 в максимуме слоя F2 в период измерений с 16 по 18 марта 2016 г. (линия) и в магнитоспокойный день 13 марта 2016 г. (точечная кривая)

В то время как отклонение δf_oF2 составило около -34% 16 марта концентрация N_mF2 уменьшилась приблизительно в 2.3 раза по сравнению с невозмущенными условиями. При увеличении δf_oF2 до $+30\%$ в этот же день концентрации увеличилась приблизительно в 2 раза. Последующие колебания значений N_mF2 не превышали указанных пределов.

Высота максимума слоя F2. На рис. 4 приведены временные вариации высоты максимума слоя F2 z_mF2 и его относительного отклонения δz_mF2 . Как видно, отклонение δz_mF2 не превышало $15-16\%$, а значит текущая геомагнитная обстановка слабо повлияла на вариации высоты максимума слоя F2.

Ранее в Ионосферной обсерватории наблюдалось проявление сильных ионосферных возмущений, вызванных умеренной магнитной бурей. Так, буря 20–21 марта 2003 г. с индексом $K_{pmax} = 5$ послужила причиной сильной отрицательной фазы ионосферного возмущения, за которой последовала умеренная фаза [6–9].

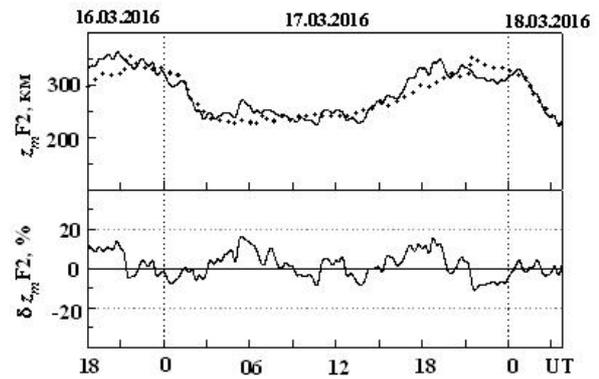


Рис. 4 – Временные вариации высоты максимума слоя F2 z_mF2 и ее относительного отклонения δz_mF2 в период измерений с 16 по 18 марта 2016 г. (линия) и в магнитоспокойный день 13 марта 2016 г. (точечная кривая).

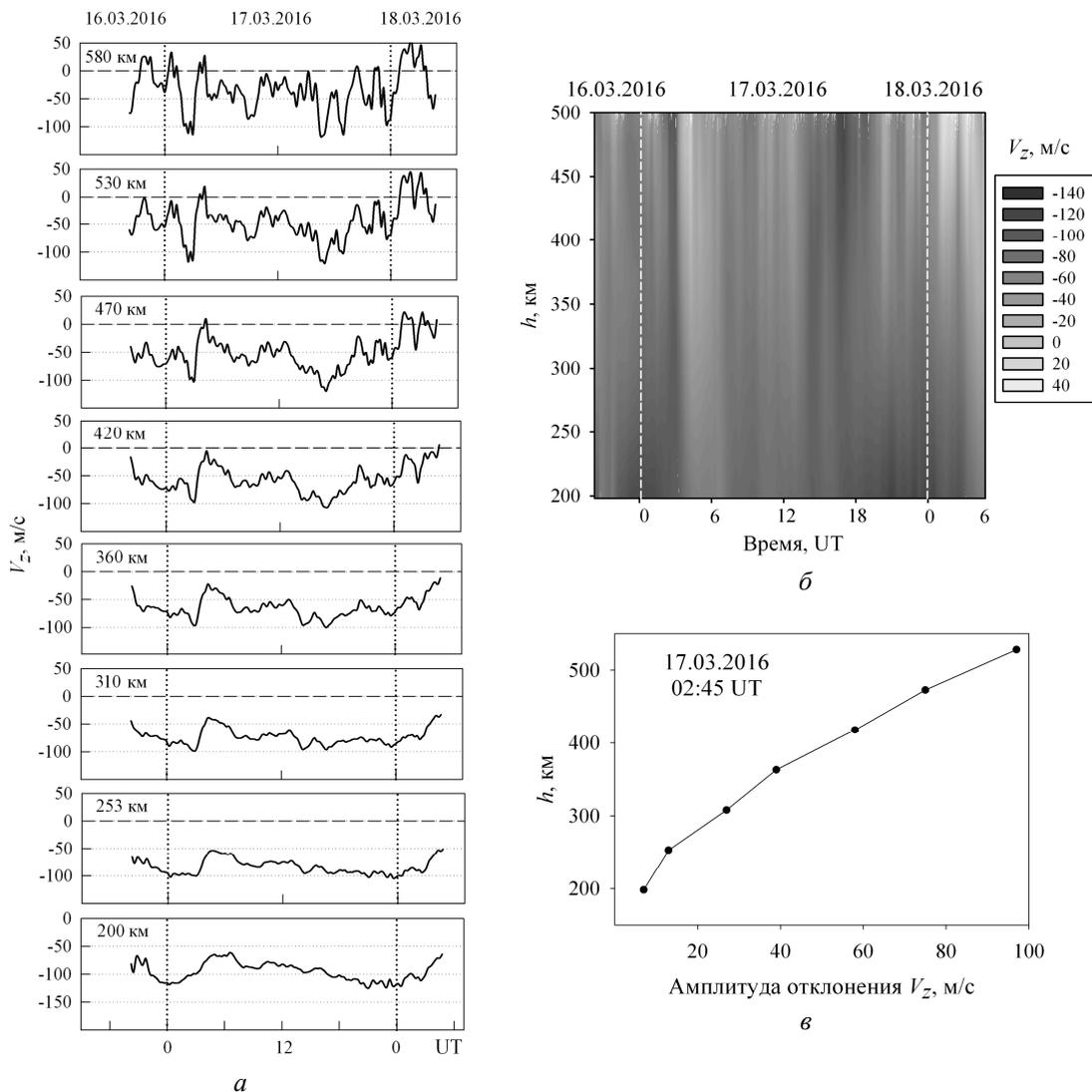


Рис. 5 – Результаты наблюдения вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z : а – временные вариации скорости V_z для ряда высот ионосферы, б – высотно-временные диаграммы вариаций V_z , в – зависимость амплитуды отклонения V_z от высоты в 02:45 17 марта 2016 г.

Вариации скорости движения ионосферной плазмы. Геокосмическая буря повлияла на суточные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z . На рис. 5,а,б приведены результаты наблюдения скорости V_z .

Видно, что в начале суток 17 марта произошло увеличение скорости нисходящего ($V_z < 0$) движения плазмы с максимумом в 02:45 и последующее ее уменьшение (рис. 5,а,б). Отклонение в вариациях скорости имело место после возрастания индекса K_p с 1 до 5-, которое произошло 16 марта с 18:00 до 24:00, и изменения индекса D_{st} в этот же период времени с -16 до -56 нТл (см. рис. 2). С ростом высоты амплитуда отклонения скорости увеличивалась и составила 7, 13, 27, 39, 58, 75, 97 м/с на высотах 200, 250, 310, 360, 420, 470, 530 км соответственно (рис. 5,в). При этом моменты максимального изменения V_z для рассматриваемых высот совпали (в 02:45), что видно на рис. 5,б.

17 марта в промежутке времени с 12:00 до 18:00 на высотах 200–420 км обнаружены квазигармонические колебания V_z с периодом 2 ч 15 мин и амплитудой около 10 м/с (см. рис. 5,а). Вероятно, это была реакция на изменение геомагнитной активности – в том же промежутке времени индекс K_p к 15:00 уменьшился с 4 до 2, а затем вырос до 3+.

Выводы. Геомагнитная обстановка 14–17 марта 2016 г. была возмущенной в результате последовавших друг за другом нескольких суббурь. Индекс K_p достигал значений 5–5.3, что характерно для умеренной геомагнитной бури [10, 11]. Индекс D_{st} достигал -55 нТл.

Эффекты магнитной бури проявились в вариациях критической частоты 16–17 марта во время измерений в Ионосферной обсерватории. Так в вечернее время 16 марта наблюдалась смена фаз ионосферных возмущений с отрицательного (с уменьшением f_oF2 2.3 раза) на положительное (с увеличением f_oF2 в 2 раза). Последующее уменьшение частоты было слабым, относительное отклонение δf_oF2 не превышало 22 %.

Умеренная магнитная буря слабо повлияла на вариации высоты максимума слоя F2 в фазу релаксации, отклонение $\delta z_m F2$ не превышало 15–16 %.

Что касается динамики ионосферной плазмы, то 17 марта наблюдалось увеличение скорости нисходящего движения плазмы V_z с максимумом в 02:45 и последующее ее уменьшение. Амплитуда отклонения V_z возрастала с высотой и составляла 7–97 м/с на высотах 200–530 км.

17 марта в промежутке времени с 12:00 до 18:00 на высотах 200–420 км обнаружены квазигармонические колебания V_z с периодом 2 ч 15 мин и амплитудой около 10 м/с, что, очевидно, связано с изменением геомагнитной активности.

Список литературы

1. Черногор Л. Ф. Физика геокосмических бурь / Л. Ф. Черногор, И. Ф. Домнин. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. – 407 с.
2. Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения ионосферных процессов над Украиной в 2012–2014 гг. / Л. Ф. Черногор, И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов, С. В. Кацко, Д. В. Котов, М. В. Ляшенко, С. В. Панасенко // Космічні дослідження в Україні. 2012–2014 / Ред.: О. П. Федоров. – К.: Академперіодика, 2014. – С. 21–28.
3. Домнин И. Ф. Ионосферные процессы, сопровождавшие геокосмическую бурю 5–6 августа 2011 г. / И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов, М. В. Ляшенко, С. В. Харитонова, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 320–332.
4. Domnin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Domnin, Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.] // Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2014. – No 47 (1089). – P. 28–42.
5. Таран В. И. Исследования ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния / В. И. Таран // Геомагнетизм и аэрономия. – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 659–666.
6. Григоренко Е. И. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 г. / Е. И. Григоренко, В. Н. Лысенко, С. А. Пазюра, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2004. – Т. 10, № 1. – С. 4–11.
7. Григоренко Е. И. Аномальная ионосферная буря 20–23 марта 2003 г.: результаты измерений и моделирования / Е. И. Григоренко, С. А. Пазюра, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т. 11, № 3/4. – С. 4–19.
8. Григоренко Е. И. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния / Е. И. Григоренко, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор, С. В. Черняев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 4. – С. 4–20.
9. Григоренко Е. И. Особенности ионосферной бури 20–23 марта 2003 г. / Е. И. Григоренко, В. Н. Лысенко, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45, № 6. – С. 789–802.
10. Григоренко Е. И. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1 / Е. И. Григоренко, В. Н. Лысенко, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 58–76.
11. Григоренко Е. И. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2 / Е. И. Григоренко, В. Н. Лысенко, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 77–96.

References (transliterated)

1. Chernogor L. F., Domnin I. F. *Fizika geokosmicheskikh bur'* [Physics of Geospace Storms: monograph]. H.: HNU imeni V. N. Karazina, 2014, 407 p.
2. Chernogor L. F., Domnin I. F., Emel'janov L. Ja., Kacko S. V., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Panasenko S. V. Rezul'taty nabljudeniya ionosfernnykh processov nad Ukrainoj v 2012–2014 gg. [Results of Observation of Ionospheric Processes over Ukraine in 2012–2014]. *Kosmichni doslidzhennja v Ukraini. 2012–2014* [Space Research in Ukraine. 2012–2014] / Red.: O. P. Fedorov. K.: Akademperiodika, 2014, pp. 21–28.
3. Domnin I. F., Emel'janov L. Ja., Ljashenko M. V., Haritonova S. V., Chernogor L. F. Ionosfernye processy, soprovozhdavshie geokosmicheskiju burju 5–6 avgusta 2011 g. [Ionospheric Processes During the Geospace Storm on August 5–6, 2011]. *Radiofizika i radioastronomija* [Radio Physics and Radio Astronomy]. 2012, vol. 17, no. 4, pp. 320–332.
4. Domnin, I. F., Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.]. "Kharkiv Incoherent Scatter Facility." *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. 2014, no. 47 (1089), pp. 28–42.
5. Taran V. I. Issledovanija ionosfery v estestvennom i iskusstvenno vozmushhenom sostojanijah metodom nekogerentnogo rassejanija [Ionosphere Research in Natural and Artificially Disturbed by Incoherent Scattering States]. *Geomagnetizm i ajeronomija* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2001, vol. 41, no. 5, pp. 659–666.

6. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Pazjura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. Anomal'naja ionosfernaja burja 21 marta 2003 g. [Anomalous Ionospheric Storm of March 21, 2003]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space Science and Technology]. 2004, vol. 10, no. 1, pp. 4–11.
7. Grigorenko E. I., Pazjura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. Anomal'naja ionosfernaja burja 20–23 marta 2003 g.: rezul'taty izmerenij i modelirovanija [Anomalous Ionospheric Storm of March 20–23, 2003. : Measurements and Modeling]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space Science and Technology]. 2005, vol. 11, no. 3/4, pp. 4–19.
8. Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F., Chernjaev S. V. Anomal'naja ionosfernaja burja 21 marta 2003 goda: rezul'taty nabljudenij na har'kovskom radare nekogerentnogo rassejanija [Anomalous Ionospheric Storm of March 21, 2003: Observations at the Kharkiv Incoherent Scatter Radar]. *Uspehi sovremennoj radioelektroniki* [The Advances of Modern Radioelectronics]. 2005, no. 4, pp. 4–20.
9. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Osobennosti ionosfernoj buri 20–23 marta 2003 g. [Properties Ionospheric Storm on 20–23 March 2003]. *Geomagnetizm i aeronomija* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2005, vol. 45, no. 6, pp. 789–802.
10. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Analiz i klassifikacija ionosfernyh bur' v srednih shirotah Evropy. 1 [Analysis and classification of ionospheric storms at middle latitudes of Europe. 1]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space Science and Technology]. 2007, vol. 13, no. 5, pp. 58–76.
11. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Analiz i klassifikacija ionosfernyh bur' v srednih shirotah Evropy. 2 [Analysis and classification of ionospheric storms at middle latitudes of Europe. 2]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space Science and Technology]. 2007, vol. 13, no. 5, pp. 77–96.

Поступила (received) 10.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Спостереження іоносферних ефектів над Харковом під час фази релаксації геомагнітної бурі 14–17 березня 2016 р. / С. В. Кацко, Л. Я. Ємельянов, Л. Ф. Черногор // – Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 8–12. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

Наблюдение ионосферных эффектов над Харьковом в течение фазы релаксации геомагнитной бури 14–17 марта 2016 г. / С. В. Кацко, Л. Я. Емельянов, Л. Ф. Черногор // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – № 34 (1206). – С. 8–12. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

The ionosphere effects observing over Kharkiv during the relaxation phase of geomagnetic storm on March 14–17, 2016 / S. V. Katsko, L. Ya. Emelyanov, L. F. Chernogor // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 8–12. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кацко Софія Валеріївна – кандидат фізико-математичних наук, Інститут іоносфери, науковий співробітник, м. Харків; тел. 057-706-22-87; e-mail: sophiaharytonova@gmail.com.

Кацко Софья Валериевна – кандидат физико-математических наук, Институт ионосферы, научный сотрудник, г. Харьков; тел. 057-706-22-87; e-mail: sophiaharytonova@gmail.com.

Katsko Sifia Valeryivna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Institute of Ionosphere, Researcher, Kharkiv; tel. 057-706-22-87; e-mail: sophiaharytonova@gmail.com.

Ємельянов Леонід Якович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери, завідувач відділу, м. Харків, тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Емельянов Леонид Яковлевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ионосферы, заведующий отделом, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Emelyanov Leonid Yakovlevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Ionosphere, Head of Department, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Черногор Леонід Феоктистович – доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний університет імені В. Н. Карабіна, професор кафедри космічної радіофізики, м. Харків; тел. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

Черногор Леонид Феоктистович – доктор физико-математических наук, профессор, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, профессор кафедры космической радиофизики, г. Харьков; тел. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

Chernogor Leonid Feoktistovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, V. N. Karazin Kharkiv National University, Professor at the Department of Space Radiophysics, Kharkiv; tel. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.