

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕНИЙ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

С.В. Кацко, Л.Ф. Черногор

COMPARATIVE ANALYSIS OF DISTURBANCES OF MAIN IONOSPHERE PARAMETERS DURING GEOMAGNETIC STORMS OF DIFFERENT INTENSITIES

S.V. Katsko, L.F. Chernogor

Проведен сравнительный анализ основных параметров ионосферной плазмы во время геомагнитных бурь за цикл солнечной активности с 1998 по 2012 г., наблюдавшихся в обсерватории Института ионосферы (Харьков, Украина). Измерения проведены с помощью радара некогерентного рассеяния (НР) и ионозонда «Базис».

Результаты анализа показали непропорциональное изменение параметров ионосферной плазмы при изменении параметров магнитных бурь, что затрудняет прогнозирование ионосферных возмущений.

Comparative analysis in main parameters of ionosphere plasma during geomagnetic storms of total cycle solar activity from 1998 to 2012, which were observed in the observatory of Institute of Ionosphere (Kharkiv, Ukraine), is presented. The observations are carried out by the incoherent scatter radar (IS) and ionosonde “Bazis”.

The analysis results have shown a disproportionate change of ionosphere plasma parameters when magnetic storms parameters are changing, that makes difficulties for ionospheric disturbances forecast.

Введение

Геокосмическая буря (ГБ) представляет собой значительное возмущение в системе магнитосфера–ионосфера–атмосфера–Земля (внутренние оболочки), которое происходит в результате возникновения солнечных бурь [Черногор, Домнин, 2014]. ГБ влечет за собой цепочку событий: сильное возмущение магнитного поля Земли – магнитную бурю (МБ), резкое изменение параметров ионосферы – ионосферную бурю (ИБ), атмосферы – атмосферную бурю, существенные изменения атмосферного, ионосферного и магнитосферного электрических полей – электрическую бурю [Gonzalez et al., 1994; Bell et al., 1997; Vijaya et al., 2007; Черногор, Домнин, 2014].

Многолетние исследования проявлений ГБ свидетельствуют о многообразии и сложном взаимодействии процессов, формирующих бури. Каждая буря уникальна, и прогнозировать возмущения в ионосфере, вызванные бурей, на сегодняшний день является сложной задачей [Домнин и др., 2011, 2012, 2014а, б, в; Черногор, Домнин, 2014].

Цель настоящей работы – представление результатов сравнительного анализа вариаций параметров геокосмических и ионосферных бурь, имевших место в 1998–2012 гг.

Общие сведения о геокосмических бурях в 1998–2012 гг.

Индекс ГБ определяется из следующего выражения [Черногор, Домнин, 2014]:

$$G_{st} = 10 \lg(\varepsilon_{Amax} / \varepsilon_{Amin}), \quad (1)$$

где $\varepsilon_{Amin} = 20$ ГВт – пороговое значение функции Акасофу, при котором возмущение в геокосмосе может считаться ГБ, ε_{Amax} – максимальное значение во время бури. Для количественной характеристики ИБ введены ионосферные индексы I_{NIS} (negative ionospheric storms, NIS) и I_{PIS} (positive ionospheric storms, PIS) [Черногор, Домнин, 2014]

$$I_{NIS} = 10 \lg(N_{m0} / N_{mmin}),$$

$$I_{PIS} = 10 \lg(N_{mmax} / N_{m0}), \quad (2)$$

где N_{m0} и N_{mmin} – невозмущенные и возмущенные значения концентрации электронов в максимуме слоя F2.

Основные параметры ГБ и результаты расчета индексов G_{st} , I_{NIS} и I_{PIS} по соотношениям (1) и (2) приведены в табл. 1. Также представлены максимальные значения зональной компоненты напряженности электрического поля E_y во время бури, рассчитанной по величине индекса AE_{max} .

Анализ табл. 1 показывает, что ГБ большей интенсивности не обязательно вызывает большие эффекты в магнитосфере и ионосфере. В свою очередь, бури приблизительно одинаковой интенсивности могут сопровождаться существенно отличающимися как МБ, так и ИБ. Из табл. 1 также видно, что ГБ большей интенсивности соответствует и большее значение энергии ε_A . Однако во время сильной МБ 13–14 ноября 2012 г. ε_A было больше, чем во время очень сильной МБ 5–6 августа 2011 г. Индекс G_{st} был также больше.

Что касается энергии МБ E_{ms} , то она соответствовала их интенсивности. Так, во время крайне сильной МБ 7–10 ноября 2004 г. она была максимальной, $18.4 \cdot 10^{15}$ Дж, а во время весьма умеренной МБ 20–21 января 2010 г. была минимальной, $1.2 \cdot 10^{15}$ Дж.

Максимальные значения индекса AE для крайне сильной, сверхсильной и очень сильной МБ были одинаковыми, около 2500 нТл.

Сравнительный анализ результатов наблюдений ионосферных бурь

Сравнительная характеристика параметров ИБ, наблюдаемых на харьковском радаре НР и ионозонде «Базис» в период 1998–2012 гг., представлена в табл. 2. Для сравнения взяты отношение критических частот $(f_oF2)_0 / f_oF2$ и отношение концентраций электронов в максимуме слоя F2-ионосферы N_{m0} / N_m , а также вариации высоты максимума слоя F2 ионосферы, температуры электронов T_e и ионов T_i на высоте максимума ионизации (индекс «0» соответствует значениям в магнитоспокойных условиях).

Из табл. 2 видно, что наибольшее изменение N_m имели место во время ИБ 7–10 ноября 2004 г., а

Таблица 1

Сравнительная характеристика параметров геокосмических бурь

Параметр	ГБ 25 сентября 1998 г.	ГБ 20–21 марта 2003 г.	ГБ 29–30 мая 2003 г.	ГБ 7–10 ноября 2004 г.	ГБ 4–6 апреля 2006 г.	ГБ 20–21 января 2010 г.	ГБ 5–6 августа 2011 г.	ГБ 13–14 ноября 2012 г.
B_{zmin} , нТл	–17	–7	–15	–45	–12	–8,3	–18	–22
ε_{Amax} , ГДж/с	100	27	62	540	33	22	37–45	50–66
G_{st} , дБ	7	1.3	5.1	14.3	2.2	0.4	2.7–3.5	4–5.2
K_{pmax}	8+	5	8+	9–	5+	4	8–	6+
D_{stmin} , нТл	–202	–57	–131	–373	–79	–38	–113	–108
E_{ms} , Дж	$10 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{15}$	$9 \cdot 10^{15}$	$18.4 \cdot 10^{15}$	$6.4 \cdot 10^{15}$	$1.2 \cdot 10^{15}$	$6 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{15}$
AE_{max} , нТл	2500	1500	2000–2500	2500	1000	680	2500	1009
E_{ymin} , мВ/м	–24.5	–14.5	–(20–25)	–24.5	–9.5	–6.4	–24.5	–9.5
I_{NIS} , дБ	5.4	7	6	8.5	2.6	2	5.4	7
I_{PIS} , дБ	–	1.8	–	–	1.5, 1.5	–	–	4.8, 4.8

Таблица 2

Сравнительная характеристика параметров ИБ

Параметр	ИБ 25 сентября 1998 г.	ИБ 20–21 марта 2003 г.	ИБ 29–30 мая 2003 г.	ИБ 7–10 ноября 2004 г.	ИБ 4–6 апреля 2006 г.	ИБ 20–21 января 2010 г.	ИБ 5–6 августа 2011 г.	ИБ 13–14 ноября 2012 г.
$\frac{(f_0F2)_0}{f_0F2}$	1.9	0.8 (ПФ), 2.2 (ОФ)	2	2.6	0.8 (ПФ), 1.3 (ОФ), 0.8 (ПФ)	1.3	1.9	0.6 (ПФ), 2.3 (ОФ), 0.6 (ПФ)
N_{m0}/N_{mmin}	3.5	5.3	4	7	1.4	1.6	3.5	5.3
N_{m0}/N_{mmax}	–	0.7	–	–	0.6	–	–	0,32–0,35
$\Delta z_m F2$, км	100	20 (ПФ), 120 (ОФ)	160	300	40 (ПФ), 100 (ОФ), 30 (ПФ)	60	200	120 (ПФ), 75 (ОФ), 95 (ПФ)
T_e/T_{e0}	1.2	0.8 (ПФ) 1.4 (ОФ)	2.75–4	2.6	1.1 (ПФ) 1.2 (ОФ) 0.83 (ПФ)	1.2	2.6	1.3 (ОФ) 1.2 (ПФ) 1.2 (ПФ)
ΔT_e , К	840	–400 (ПФ), 700 (ОФ)	1400–2400	1100	50 (ПФ), 200–300 (ОФ), –250 (ПФ)	200	1100	700 (ПФ) 600 (ОФ) 400 (ПФ)
T_i/T_{i0}	1.2	1.1 (ПФ) 1.1 (ОФ)	1.5–3	1.6	1.1 1.1 1.1	1.07	1.6	1.4 (ОФ) 1.1 (ПФ) 1.1 (ПФ)
ΔT_i , К	500	50 (ПФ) 150 (ОФ)	400–1400	450	50 (ПФ), 50–100 (ОФ), 50 (ПФ)	50	450	500 (ПФ), 200 (ОФ), 50 (ПФ)

а наименьшее – во время ИБ 20–21 января 2010 г. Это же и относится к вариациям параметра $z_m F2$. В то же время наибольшее изменение отношения T_e/T_{e0} и T_i/T_{i0} наблюдалось во время более слабой ИБ 29–30 мая 2003 г. Наименьшие вариации этих параметров отмечались во время умеренной ИБ 20–21 января 2010 г. Это же можно сказать и об абсолютных изменениях T_e и T_i . Анализ табл. 2 показал непропорциональные изменения параметров ионосферной плазмы при изменении основного параметра ИБ – N_m .

Особенности двух- и трехфазных ионосферных бурь

Во время сильной МБ 13–14 ноября 2012 г. ($K_{pmax}=6+$) и умеренной бури 4–6 апреля 2006 г. ($K_{pmax}=5+$), развилась ИБ с двумя положительными (ПФ) и одной отрицательной (ОФ) фазами, а во время МБ 20–23 марта 2003 г. ($K_{pmax}=5$) – ИБ с ПФ и ОФ. Видно, что эффекты сильной бури 13–14 ноября

2012 г. были значительно сильнее, чем умеренной бури 4–6 апреля 2006 г. (табл. 3). Так, во время ИБ 13–14 ноября 2012 г. увеличение $N_m F2$ во время первой и второй ПФ составило около 3 раз, высота $z_m F2$ увеличилась на 100–120 км и 80–95 км соответственно. Во время ИБ 4–6 апреля 2006 г. концентрация $N_m F2$ увеличилась всего лишь в 1.4 раза, высота $z_m F2$ – на 30–40 км. Во время ОФ уменьшение $N_m F2$ во время бури 13–14 ноября 2012 г. составило 5.3 раза, а во время бури 4–6 апреля 2006 г. – 1.8 раз.

Эффекты умеренной МБ 20–23 марта 2003 г. во время ОФ ИБ были соизмеримы с эффектами сильной бури: $N_m F2$ уменьшилась в 5.3 раз, а $z_m F2$ увеличилась на 200 км.

Существенные изменения N_m во время бури 13–14 ноября 2012 г. сопровождалось нагревом плазмы: ΔT_e составляло 700, 600 и 400 К для каждой фазы ИБ соответственно, аналогично ΔT_i составляло 500, 200 и 50 К (см. табл. 3).

Характеристики ИБ 20–23 марта 2003 г., 4–6 апреля 2006 г. и 13–14 ноября 2012 г. со знакопеременными фазами

Фаза	Умеренная МБ 20–23 марта 2003 г. ($K_{pmax}=5$)	Умеренная МБ 4–6 апреля 2006 г. ($K_{pmax}=5+$)	Сильная МБ 13–14 ноября 2012 г. ($K_{pmax}=6+$)
I положительная	$\delta f_oF2_{max}=+22\%$ N_mF2 увеличилась в 1.5 раза z_mF2 увеличилась на 20 км	$\delta f_oF2_{max}=+18\%$ N_mF2 увеличилась в 1.4 раза z_mF2 увеличилась на 30– 40 км	$\delta f_oF2_{max}=+76\%$ N_mF2 увеличилась в 3.1 раза z_mF2 увеличилась на 100– 120 км
II отрицательная	$\delta f_oF2_{max}=-57\%$ N_mF2 уменьшилась в 5.3 раз z_mF2 увеличилась на 200 км	$\delta f_oF2_{max}=-25\%$ N_mF2 уменьшилась в 1.8 раз z_mF2 увеличилась на 80–100 км	$\delta f_oF2_{max}=-57\%$ N_mF2 уменьшилась в 5.3 раза z_mF2 увеличилась на 60–75 км
III положительная	Не было	$\delta f_oF2_{max}=+18\%$ N_mF2 увеличилась в 1.4 раза z_mF2 увеличилась на 30 км	$\delta f_oF2_{max}=+67\%$ N_mF2 увеличилась в 2.8 раза z_mF2 увеличилась на 80–95 км

Выводы

1. Сравнительный анализ ГБ подтвердил, что каждая буря уникальна. Схема ее развития сложна, что затрудняет прогнозирование процессов, которыми она сопровождается. Умеренные МБ могут сопровождаться сильными ИБ, сильные МБ – умеренными ИБ.

2. Проведен сравнительный анализ результатов наблюдений восьми ионосферных бурь разной интенсивности, выполненных с помощью радара НР в Харькове в течение 1998–2012 гг. Показано, что бури существенно отличались по своим проявлениям.

3. Установлено, что имеют место непропорциональные изменения параметров ионосферы при изменении основного параметра ионосферных бурь – концентрации электронов в F-области ионосферы. Это свидетельствует о большом разнообразии ИБ и трудности их моделирования.

4. Продемонстрировано, что как сильные, так и умеренные МБ могут приводить к значительному возмущению параметров околоземной среды (ионосферы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Домнин И.Ф., Харитонов С.В., Черногор Л.Ф. и др. Динамические процессы в ионосфере в течение весьма умеренной магнитной бури 20–21 января 2010 г. // Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17, № 4. С. 26–40.
- Черногор Л.Ф., Домнин И.Ф. Физика геокосмических бурь. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2014. 407 с.
- Домнин И.Ф., Харитонов С.В., Черногор Л.Ф. и др. Ионосферные процессы, сопровождавшие геокосмическую бурю 5–6 августа 2011 г. // Радиофизика и радиоастрономия. 2012. Т. 17, № 4. С. 320–332.
- Домнин И.Ф., Кацко С.В., Черногор Л.Ф. и др. Ионосферная буря 5–6 августа 2011 г.: результаты расчетов основных эффектов // Радиофизика и радиоастрономия. 2014а. Т. 19, № 1. С. 26–39.
- Домнин И.Ф., Кацко С.В., Черногор Л.Ф. и др. Ионосферные эффекты геокосмической бури 13–14 ноября 2012 г. // Радиофизика и радиоастрономия. 2014б. Т. 19, № 2. С. 170–180.
- Домнин И.Ф., Кацко С.В., Черногор Л.Ф. и др. Ионосферная буря 13–14 ноября 2012 г.: результаты расчетов тепловых и динамических эффектов // Радиофизика и радиоастрономия. 2014в. Т. 19, № 4. С. 336–347.
- Bell J.T., Gussenhoven M.S., Mullen E.G. Super storms // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N A7. P. 14189–14198.
- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N A4. P. 5771–5792.
- Vijaya Lekshmi D., Balan N., Vaidyan V.K., et al. Response of the ionosphere to super storms // Adv. Space Res. 2007. V. 41, N 4. P. 548–555.

Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков, Украина