

УДК 550.388

С. В. КАЦКО, Л. Ф. ЧЕРНОГОР

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ БУРЬ НА ИОНОСФЕРНЫЕ КАНАЛЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЯ НА ХАРЬКОВСКОМ РАДАРЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Оценено влияние ионосферных бурь на ионосферные каналы распространения радиоволн. Подтверждено, что вариации параметров ионосферы во время ионосферных бурь вызывают существенную перестройку каналов распространения радиоволн, а основные характеристики радиоволн (фаза, амплитуда и др.) при этом значительно изменяются. Проведен расчет изменения частоты соударений электронов с ионами, показателя поглощения радиоволн и частотной емкости ионосферного канала для отрицательных и положительных ионосферных возмущений во время магнитных бурь 1998–2012 гг.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферная буря, канал распространения радиоволн, коэффициент поглощения, частота соударения, частотная емкость.

Введение. Возмущения околоземной среды могут существенно сказываться на параметрах ионосферного канала распространения радиоволн. До настоящего времени величина этих возмущений и степень их влияния на распространение радиоволн различных диапазонов остаются мало изученными. Известно [1], что в процессе бури больше всего изменяется энергетика ионосферы и электрического поля.

Исследование среднеширотной ионосферы в периоды ионосферных бурь в течение 1998–2012 гг. [2–4] показало, что параметры плазмы при этом значительно возмущаются: концентрация электронов N_e и полное электронное содержание в течение отрицательных ионосферных бурь уменьшается до 10 и 2 раз соответственно; высота z_m слоя F2 ионосферы увеличивается на 150–300 км, температура электронов и ионов в ночное время увеличивается до 2–3 раз, относительная концентрация ионов водорода уменьшается до 3–4 раз [5]. В течение положительных ионосферных бурь в области F наблюдается увеличение концентрации электронов на 20–30 %, увеличение высоты максимума z_m достигает 50–70 км [2].

Уменьшение концентрации N_e во время отрицательных ионосферных бурь в 10 раз приводит к уменьшению максимально применимых частот примерно в 3 раза. Частотная емкость канала распространения F , равная по определению f_{\max}/f_{\min} , за счет уменьшения максимально применимых частот уменьшается также примерно в 3 раза [4, 6, 7]. Рост поглощения радиоволн в нижней ионосфере приводит к увеличению f_{\min} в 1.5–2 раза, в результате чего частотная емкость канала распространения радиоволн дополнительно уменьшается в 1.5–2 раза [4, 6, 7]. Общее уменьшение F достигает 4.5–6 раз. Возможности радиосвязи и радиолокации в диапазоне высоких частот существенно снижаются, многие радиолинии на трассах Земля – ионосфера – Земля фактически перестают функционировать.

Из-за значительного роста относительной интенсивности неоднородной структуры и усиления мерцаний уровня радиосигналов ОВЧ и УВЧ диапазонов ухудшается и даже нарушается

радиосвязь и функционирование радионавигационных систем на трассах Земля – космос и космос – Земля. Относительная плотность сбоев фазовых измерений систем GPS и ГЛОНАСС увеличивается в 10–100 раз. Резко возрастают (до 100–300 м) ошибки позиционирования. Продолжительность сбоев достигает 20–40 мин [5].

Результаты экспериментальных исследований [2] показали, что во время положительных ионосферных бурь электронная концентрация на высотах F-области ионосферы увеличивается до 2–3 раз. Отрицательная ионосферная буря сопровождается уменьшением концентрации электронов на тех же высотах на порядок. Также значительно (примерно до 1.5–2 раз) увеличивается температура ионов и электронов.

Установлено, что в течение сильных ионосферных бурь среднеширотная ионосфера может приобретать свойства высокоширотной ионосферы. Например, усиливается неоднородная структура ионосферной плазмы, что приводит к усилению рассеяния радиоволн, уменьшению их интенсивности и отношения сигнал/шум.

Указанные изменения существенно влияют на работу навигационных, радиолокационных и телекоммуникационных систем.

Рассмотрим влияние положительных и отрицательных ионосферных бурь 1998–2012 гг. на характеристики канала рассеяния.

Влияние ионосферных бурь на поглощение радиоволн различных диапазонов. Как известно, вдали от области отражения радиоволн показатель поглощения радиоволн к при их квазипродольном по отношению к геомагнитному полю распространении дается соотношением [8]:

$$\kappa = \frac{\omega_p^2 \nu}{2\omega(\omega \pm \omega_L)^2 + \nu^2}, \quad (1)$$

где $\omega_p = 2\pi f_p$, f_p – плазменная частота электронов, ν – частота соударений электронов с тяжелыми частицами,

© С. В. Кацко, Л. Ф. Черногор, 2015

$\omega = 2\pi f$, f – частота радиоволны, $\omega_L = 2\pi f_L$, f_L – продольная составляющая гирочастоты электронов, знаки «±» относятся к обыкновенной и необыкновенной волнам.

Изменение амплитуды радиоволн определяется интегральным коэффициентом поглощения

$$K = \frac{\omega}{c} \int_s \kappa(s) ds, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме, s – траектория радиоволн. Тогда амплитуда радиоволн дается следующим соотношением:

$$A = A_0 e^{-K}, \quad (3)$$

где A_0 – амплитуда радиоволн в отсутствие поглощения.

Поглощение радиоволн – эффект интегральный. Известно, что примерно половину вклада в интегральный коэффициент поглощения дает нижняя ионосфера (D- и E-области), а вторую половину дает F-область ионосферы [8, 9].

В F-области ионосферы (при $z \geq 250$ км) значение ν в основном определяется частотой соударений электронов с ионами ν_{ei} [9]. Используя зависимость частоты ν_{ei} от концентрации N_e и температуры электронов T_e , можно записать, что

$$\nu_{ei} \approx \nu_{ei0} \frac{N_e}{N_{e0}} \left(\frac{T_{e0}}{T_e} \right)^{3/2}, \quad (4)$$

где индекс «0» здесь и далее относится к невозмущенным условиям.

В F-области ионосферы частота радиоволны ω значительно больше частоты ν и продольной составляющей ω_L . Тогда из (1) следует, что

$$\kappa \approx \frac{\omega_p^2 \nu}{2\omega^3}. \quad (5)$$

Поскольку

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 N_e}{\epsilon_0 m}, \quad (6)$$

где e – заряд электрона, m – масса электрона, ϵ_0 – электрическая постоянная,

$$\kappa = \kappa_0 \frac{N_e}{N_{e0}} \frac{\nu_{ei}}{\nu_{ei0}} = \kappa_0 \left(\frac{N_e}{N_{e0}} \right)^2 \left(\frac{T_{e0}}{T_e} \right)^{3/2}. \quad (7)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета отношений ν_{ei}/ν_{ei0} и κ/κ_0 на высотах F-области ионосферы в зависимости от значений N_e/N_{e0} и T_e/T_{e0} во время ионосферных бурь в период 1998–2012 гг.

Таблица 1 – Результаты расчета отношений ν_{ei}/ν_{ei0} и κ/κ_0 во время ионосферных бурь 1998–2012 гг.

Ионосферная буря	Фаза бури	T_e/T_{e0}	N_e/N_{e0}	ν_{ei}/ν_{ei0}	κ/κ_0
25 сентября 1998 г.	Отрицательная	1.2	0.29	0.22	0.06
20–21 марта 2003 г.	Положительная	0.8	1.43	2.00	2.86
	Отрицательная	1.4	0.2	0.12	0.02
29–30 мая 2003 г.	Отрицательная	4	0.25	0.03	0.01
7–10 ноября 2004 г.	Отрицательная	2.6	0.14	0.14	0.005
4–6 апреля 2006 г.	Положительная	1.1	1.67	1.45	2.42
	Отрицательная	1.2	0.71	0.54	0.38
	Положительная	0.83	1.67	2.00	3.35
20–21 января 2010 г.	Отрицательная	1.2	0.77	0.56	0.45
5–6 августа 2011 г.	Отрицательная	2.6	0.29	0.07	0.02
13–14 ноября 2012 г.	Положительная	1.3	3.13	2.11	6.6
	Отрицательная	1.2	0.19	0.14	0.03
	Положительная	1.2	2.86	2.17	6.22

Из табл. 1 видно, что значение ν_{ei} во время положительной фазы существенно больше. Во время отрицательной фазы при $T_e/T_{e0} = \text{const}$ с ростом N_e/N_{e0} отношение ν_{ei}/ν_{ei0} увеличивается. Видно, что по мере уменьшения N_e/N_{e0} и роста T_e/T_{e0} отношение ν_{ei}/ν_{ei0} убывает. Минимальное изменение частоты наблюдалось во время магнитной бури 29 – 30 мая 2003 г.

Во время положительных ионосферных бурь, как следует из (4), с ростом отношения T_e/T_{e0} и N_e/N_{e0} , а также $N_e/N_{e0} = \text{const}$ и уменьшении T_e/T_{e0}

относительная частота соударений ν_{ei}/ν_{ei0} увеличивается.

Что касается показателя поглощения, то в соответствии с (7) во время положительных ионосферных бурь он также существенно больше, чем во время отрицательных, при этом увеличивается с уменьшением T_e/T_{e0} и $N_e/N_{e0} = \text{const}$. Во время отрицательных ионосферных бурь с ростом T_e/T_{e0} и уменьшением N_e/N_{e0} отношение κ/κ_0 увеличивается. Максимальное увеличение κ/κ_0 наблюдалось во время ионосферной бури 13–14 ноября 2012 г.

Если считать, что отношения T_e/T_{e0} и N_e/N_{e0} в

пределах F области слабо зависят от высоты, тогда

$$\frac{K}{K_0} \approx \frac{\kappa}{\kappa_0}. \quad (8)$$

Это означает, что во время отрицательных ионосферных бурь уменьшение относительного показателя поглощения в пределах 0.005–0.45 (см. таблицу 1) приводит к уменьшению интегрального коэффициента поглощения K в 200–2.2 раза соответственно. Увеличение κ/κ_0 во время положительных ионосферных бурь в 2.4–6.6 раз приводит к такому же (см. табл. 1) увеличению K .

Изменение частотной емкости ионосферного канала связи ВЧ диапазона. Частотной емкостью ионосферного канала связи называется безразмерный параметр [4]

$$F = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}, \quad (9)$$

где f_{\max} и f_{\min} – максимальное и минимальное значения рабочей частоты радиосигнала, определяющие дальнюю радиосвязь на трассах Земля – ионосфера – Земля в ВЧ диапазоне радиоволн.

Значение f_{\max} , называемое максимально применимой частотой, при наклонном падении на сферическую ионосферу дается известным приближенным соотношением (см., например, [8])

$$f_{\max} \approx \sqrt{\frac{R_e}{2h_r}} \cdot f_{cr}, \quad (10)$$

где R_e – радиус Земли, h_r – высота отражения радиоволны. При $R_e \approx 6370$ км, $h_r \approx 300$ –400 км множитель $\sqrt{R_e/2h_r} \approx 3.3$ –2.8 для дневного и ночного времени соответственно. Далее примем, что в среднем этот множитель равен 3. Тогда

$$f_{\max} \approx 3f_{cr}, \quad (11)$$

где f_{cr} – критическая частота области F ионосферы. Обычно в средних широтах значение $f_{cr} \approx 3$ и 10 МГц для ночного и дневного времени соответственно.

Величина f_{\min} определяется значением интегрального коэффициента поглощения K вдоль радиотрассы, относительно слабо зависит от солнечной активности [7, 9] и в невозмущенных условиях $f_{\min 0}$ в среднем составляет 1 и 3 МГц для ночного и дневного времени соответственно.

В условиях высокой активности Солнца $f_{\max} \approx 15$ –30 МГц максимальное значение $F_0 \approx 15$ и 10 в ночное и дневное время соответственно. При низкой активности $f_{\max} \approx 10$ и 20 МГц и $f_{\min 0} \approx 1$ и 2 МГц в ночное и дневное время соответственно, а $F_0 \approx 10$.

В возмущенных условиях

$$F = F_0 \frac{f_{\max}}{f_{\max 0}} \frac{f_{\min 0}}{f_{\min}}. \quad (12)$$

Учтем, что f_{\min} определяется в основном поглощением радиоволн в нижней ионосфере и увеличивается в результате роста концентрации N_e на высотах D- и E-областей ионосферы, например, под действием потоков высокоэнергичных высыпающихся частиц или рентгеновского излучения. При увеличении N_e в D-области ионосферы на 1–2 порядка, как показывают наши оценки, f_{\min} может увеличиваться до 3–10 МГц.

Значение $f_{\max}/f_{\max 0} = f_0 F^2 / (f_0 F^2)_0 = (N_e/N_{e0})^{1/2}$ определяется возмущением N_e в F-области ионосферы. При слабом возмущении N_e в F-области ионосферы

$$F \approx F_0 \frac{f_{\min 0}}{f_{\min}} \approx 0.3F_0 \approx 3, \quad (13)$$

т. е. уменьшается примерно в 3 раза.

При сильном возмущении N_e в области ионосферы параметр F изменяется также значительно (см. табл. 2). При расчетах учтено, что

$$\frac{F_0}{F} = \left(\frac{N_{e0}}{N_e} \right)^{1/2} \frac{f_{\min}}{f_{\min 0}}. \quad (14)$$

В табл. 2 приведены значения F_0/F при различных уровнях возмущенности ионосферы. Большие значения отношения F_0/F (от 3.4 до 8) во время отрицательных ионосферных бурь свидетельствуют о том, что частотная емкость канала значительно уменьшилась. Во время положительных ионосферных бурь изменения значения отношения $F_0/F = 1.7$ –2.5, были приемлемыми для распространения радиоволн на трассах Земля – ионосфера – Земля. Значения $F_0/F \geq 10$, когда связь во всем декаметровом диапазоне радиоволн на этих трассах становилась невозможной, не наблюдались.

Во время положительных ионосферных бурь для увеличения отношения сигнал/шум и более эффективного использования частотной емкости ионосферного канала связи рекомендуется увеличение рабочих частот на трассах Земля – ионосфера – Земля до $0.9f_{\max} \approx 2.7f_0 F^2$.

Выводы. 1. Продемонстрировано, что как сильные, так и умеренные ионосферные бури могут приводить к значительному возмущению параметров околоземной среды в целом и среднеширотной ионосферы в частности. Вариации параметров ионосферы во время ионосферных бурь вызывают существенную перестройку каналов распространения радиоволн. При этом значительно изменяются основные характеристики радиоволн: фаза, амплитуда и др.

2. Установлено, что в средних широтах во время отрицательных ионосферных бурь частотная ёмкость канала распространения радиоволн на трассах Земля – ионосфера – Земля уменьшалась в 3.4–8 раз. При этом нарушалось функционирование многих радиолиний ВЧ диапазона.

Таблица 2 – Значение частотной емкости F при различных уровнях возмущенности во время ионосферных бурь 1998–2012 гг. для $f_{\min}/f_{\min 0} \approx 3$

Ионосферная буря	Фаза бури	N_e/N_{e0}	F_0/F
25 сентября 1998 г.	Отрицательная	0.29	5.6
20–21 марта 2003 г.	Положительная	1.43	2.5
	Отрицательная	0.2	6.7
29–30 мая 2003 г.	Отрицательная	0.25	6
7–10 ноября 2004 г.	Отрицательная	0.14	8
4–6 апреля 2006 г.	Положительная	1.67	2.4
	Отрицательная	0.71	3.6
	Положительная	1.67	2.4
20–21 января 2010 г.	Отрицательная	0.77	3.4
5–6 августа 2011 г.	Отрицательная	0.29	5.6
13–14 ноября 2012 г.	Положительная	3.13	1.7
	Отрицательная	0.19	6.9
	Положительная	2.86	1.8

Для устойчивой дальней радиосвязи в декаметровом диапазоне радиоволн во время отрицательных ионосферных бурь рекомендуется уменьшать частоту радиосредств различного назначения в 2–3 раза, так как в противном случае связь на трассах Земля – ионосфера – Земля нарушится.

Во время положительных ионосферных бурь, напротив, рекомендуется увеличивать рабочую частоту на трассах Земля – ионосфера – Земля до $2.7f_oF_2$.

3. Показано, что во время положительных ионосферных бурь интегральный коэффициент поглощения радиоволн с длиной радиоволны, равной 0.1–100 м, увеличивался на десятки процентов, а во время отрицательных ионосферных бурь уменьшался в 2–200 раз. Важно, что при этом частотная емкость ионосферных каналов заметно сужалась (во время положительных бурь в 1.7–2.5 раза, а во время отрицательных бурь – в 3–8 раз).

4. Показано, что в результате значительного роста электронной концентрации в нижней ионосфере интегральный коэффициент поглощения увеличивался в 3–6.6 раз, приводя к существенному снижению отношения сигнал/шум на радиолиниях ОНЧ, НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов.

Список литературы: 1. Chernogor L.F. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System / L.F. Chernogor, V.T. Rozumenko // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2008. – V. 13, N. 2. – P. 120–137. 2. Черногор Л.Ф. Физика геокосмических бурь / Л.Ф. Черногор, И.Ф. Домнин – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. – 407 с. 3. Домнин И.Ф. Ионосферные эффекты геокосмической бури 13–14 ноября 2012 г. / И.Ф. Домнин, Л.Я. Емельянов, С.В. Кацко, Л.Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 170–180. 4. Черногор Л.Ф. Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн в течение геокосмических бурь / Л.Ф. Черногор, С.В. Кацко // Вестник Поволжского государственного технологического университета «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2013. – Т. 3, № 19. – С. 5–17. 5. Chen Z. Evaluation of

Solar Radio Burst's Effect on GPS Receiver Signal Tracking within IGS Network / Z. Chen, Y. Gao, Z.Z. Liu // Radio Science. – 2005. – V. 40. – RS3012, doi:10.1029/2004RS003066. 6. Черногор Л.Ф. Влияние геокосмических бурь на ионосферные каналы радиолокации, навигации и связи / Л.Ф. Черногор, В.А. Иванов, С.В. Кацко // Радиолокация, навигация, связь: XX международная научно-техническая конференция RLNC-2014, 15–17 апреля 2014 г.: сб. докл. – Воронеж, Россия, 2014. – С. 30–42. 7. Черногор Л.Ф. Искажения параметров ионосферного радиоканала в период геокосмических бурь / Л.Ф. Черногор, В.А. Иванов, С.В. Кацко // IV Всероссийские Армадовские чтения: VI Всероссийская научная конференция, 27–29 мая 2014 г.: сб. докл. – Муром, Россия, 2014. – С. 64–69. 8. Davies K. Ionospheric Radio / K. Davies. – Peter Peregrinus, London, 1990. – 587 p. 9. Ляшенко М.В. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности / М.В. Ляшенко, В.А. Пуляев, Л.Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2006. – Т. 12, № 5/6. – С. 58–68.

Bibliography (transliterated): 1. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2008. V. 13, N. 2. P. 120–137. 2. Chernogor L. F., Domnin I. F. Fizika geokosmicheskikh bur'. H.: HNU imeni V. N. Karazina, 2014. 407. Print. 3. Domnin I. F., Emel'janov L. Ia., Kacko S. V., Chernogor L. F. Ionosfernye jefekty geokosmicheskoi buri 13–14 nojabrja 2012 g. *Radiophysika i radioastronomija*. No. 19.2. 2014. 170–180. Print. 4. Chernogor L. F., Kacko S. V. Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн в течение геокосмических бурь. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta "Radiofizicheskie i infokommunikacionnye sistemy."* No. 3.19. 2013. 5–17. Print. 5. Chen Z., Y. Gao, Z. Z. Liu. Evaluation of Solar Radio Burst's Effect on GPS Receiver Signal Tracking within IGS Network. *Radio Science*. No. 40. 2005. RS3012, doi:10.1029/2004RS003066. 6. Chernogor L. F., Ivanov V. A., Kacko S. V. Vlijanie geokosmicheskikh bur' na ionosfernye kanaly radiolokacii, navigacii i svjazi. Radiolokacija, navigacija, svjaz': XX mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija RLNC-2014, 15–17 aprelja 2014 g.: sb. dokl. Voronezh, Rossija, 2014. 30–42. Print. 7. Chernogor L. F., Ivanov V. A., Kacko S. V. Iskazhenija parametrov ionosfernogo radiokanala v period geokosmicheskikh bur'. IV Vserossijskie Armandovskie chtenija: VI Vserossijskaja nauchnaja konferencija, 27–29 maja 2014 g.: sb. dokl. Murom, Rossija, 2014. 64–69. Print. 8. Davies K. Ionospheric Radio. Peter Peregrinus, London, 1990. 587. Print. 9. Ljashenko M. V., Pyljaev V. A., Chernogor L. F. Sutochnyje i sezonnye variacii parametrov ionosfernoj plazmy v period rosta solnechnoj aktivnosti. *Kosmichna nauka i tehnologija*. No. 12.5/6. 2006. 58–68. Print.

Поступила (received) 10.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

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

Черногор Леонід Феоктистович – доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, професор кафедри космічна радіофізика, м. Харків; 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.