

Искажения параметров ионосферного радиоканала в период геокосмических бурь

Л. Ф. Черногор¹, В. А. Иванов², С. В. Кацко³

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

²Поволжский государственный технологический университет пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000, Россия E-mail: vl_a_ivanov@mail.ru

³Институт ионосферы НАН и МОН Украины, ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина E-mail: sophiaharytonova@gmail.com

Рассчитаны возмущения параметров ионосферного канала распространения радиоволн. Продемонстрировано, что геокосмические бури приводят к ряду регулярных и нерегулярных эффектов при распространении радиоволн в диапазоне частот от ~1 кГц до ~1 ГГц.

The disturbance of parameters of ionospheric channel of radio waves propagation are calculated. Geospace storms are shown to result in a number of regular and irregular radio waves propagation effects in frequency range from ~1 kHz to 1 GHz.

1. Введение

Мощные нестационарные процессы на Солнце, сопровождаемые значительным усилением солнечного ветра и выбросами корональной массы, приводят к интенсивным геокосмическим бурям. Геокосмическая буря (ГБ) представляет собой синергетически взаимодействующую совокупность магнитной, атмосферной, ионосферной и электрической бурь [1–3]. При этом значительно возмущаются параметры ионосферы, атмосферы и атмосферно-ионосферно-магнитосферного электрического поля, а также относительно незначительно изменяется уровень геомагнитного поля. Возмущения околоземной среды могут существенно сказываться на параметрах ионосферного канала распространения. До настоящего времени величина этих возмущений и степень их влияния на распространения радиоволн различных диапазонов остаются мало изученными.

Целью работы – изложение результатов расчета влияния ГБ на ионосферный канал распространения радиоволн различных диапазонов (от ОНЧ до УВЧ).

2. Радиофизические эффекты геокосмических бурь

2.1. Общие сведения. Во время положительных ионосферных бурь электронная концентрация N на высотах F-области ионосферы увеличивается до 2–3 раза. Отрицательная ионосферная буря сопровождается уменьшением N на тех же высотах на порядок. Также значительно (до 1.5–2 раз) увеличиваются температуры электронов T_e и ионов T_i . Важно, что в течение сильных ГБ среднеширотная ионосфера приобретает свойства высокоширотной ионосферы. В частности, усиливается неоднородная структура ионосферной плазмы [4–6]. Указанные изменения существенно влияют на работу навигационных, радиолокационных и телекоммуникационных систем.

2.2. Влияние ГБ на поглощение радиоволн различных диапазонов. Поглощение радиоволн – эффект интегральный. Примерно половину вклада дает нижняя ионосфера (D- и E-области), а вторую половину – F-область ионосферы [7].

При $z \geq 250$ км частота соударений в основном определяется частотой соударений электронов с ионами $v_{ei} \approx v_{ei0} (N/N_0)(T_{e0}/T_e)^{3/2}$ [8]. Результаты расчета v_{ei}/v_{ei0} для высот F-области ионосферы приведены в табл. 1. Индекс «0» здесь и далее относится к

невозмущенным условиям.

Таблица 1. Значения v_{ei}/v_{ei0} для положительных ионосферных бурь

N / N_0 T_e / T_{e0}	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1
1.0	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1
1.1	0.95	1.13	1.3	1.47	1.65	1.82
1.3	0.74	0.88	1.01	1.15	1.28	1.42
1.5	0.6	0.71	0.82	0.93	1.03	1.14
1.7	0.5	0.59	0.68	0.77	0.86	0.94
1.9	0.42	0.5	0.57	0.65	0.73	0.8

Из табл. 1 видно, что значение v_{ei} существенно изменяются в течении положительных ионосферных бурь, когда $N/N_0 > 1$. Так, при $N/N_0 = \text{const}$ отношение v_{ei}/v_{ei0} убывает, а при $T_e/T_{e0} = \text{const}$ – увеличивается. Результаты расчета v_{ei}/v_{ei0} для отрицательных ионосферных бурь приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения v_{ei}/v_{ei0} для отрицательных ионосферных бурь

N / N_0 T_e / T_{e0}	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
1.0	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
1.1	0.78	0.61	0.43	0.26	0.09
1.3	0.61	0.47	0.33	0.2	0.07
1.5	0.49	0.38	0.27	0.16	0.05
1.7	0.41	0.32	0.23	0.14	0.05
1.9	0.34	0.27	0.19	0.11	0.04

В F-области ионосферы показатель поглощения $\kappa = \kappa_0(N/N_0)(v_{ei}/v_{ei0}) = \kappa_0(N/N_0)^2 \times (T_{e0}/T_e)^{3/2}$. Результаты расчета отношения κ/κ_0 приведены в табл. 3 и 4. Во время положительных бурь κ и интегральный коэффициент поглощения K могут увеличиться в 1.4–1.7 раза, а во время отрицательных бурь – уменьшиться в 250 раз.

Таблица 3. Значения κ/κ_0 для положительных ионосферных бурь

N / N_0 T_e / T_{e0}	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1
1.0	1.21	1.69	2.25	2.89	3.61	4.41
1.1	1.05	1.46	1.95	2.51	3.13	3.82
1.3	0.82	1.14	1.52	1.95	2.44	2.98
1.5	0.66	0.92	1.22	1.57	1.97	2.40
1.7	0.55	0.76	1.02	1.30	1.63	1.99
1.9	0.46	0.65	0.86	1.10	1.38	1.68

2.3. Изменение частотной емкости ионосферного канала связи ВЧ диапазона.

На наземной ионосферной линии ВЧ связи возможно создание многомерного радиоканала [9-11]. Его элементами являются парциальные примыкающие каналы с

равной полосой частот. Размерность J такого канала можно оценить по формуле $J = INT [(f_{max} - f_{min}) / B]$. Здесь f_{max} - МПЧ и f_{min} - НПЧ (верхняя и нижняя границы полосы прозрачности линии связи), а B - полоса частот парциального канала. Очевидно, что характеристикой частотной емкости многомерного канала будет безразмерный параметр

$$F = \frac{f_{max}}{f_{min}}$$

Таблица 4. Значения k/k_0 для отрицательных ионосферных бурь

N / N_0 \ T_e / T_{e0}	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
1.0	0.81	0.49	0.25	0.09	0.01
1.1	0.7	0.42	0.22	0.08	0.009
1.3	0.55	0.33	0.17	0.06	0.007
1.5	0.44	0.27	0.14	0.05	0.005
1.7	0.37	0.22	0.11	0.04	0.005
1.9	0.31	0.19	0.09	0.03	0.004

Значение f_{max} (МПЧ), при наклонном падении на сферическую ионосферу дается приближенным соотношением $f_{max} \approx 3f_{cr}$, где f_{cr} – критическая частота области F ионосферы. Обычно в средних широтах значение $f_{cr} \approx 3-10$ МГц для ночного и дневного времени соответственно. Величина f_{min} определяется значением K вдоль радиотрассы и составляет в невозмущенных условиях $f_{min0} \approx 1-3$ МГц для ночного и дневного времени соответственно.

В условиях высокой солнечной активности максимальное значение $F_0 \approx 10$. При низкой солнечной активности $f_{max} \approx 10-20$ МГц и $f_{min0} \approx 1-2$ МГц, а $F_0 \approx 10$. В возмущенных условиях $F = F_0(f_{max}/f_{max0})(f_{min0}/f_{min})$. Учтем, что f_{min} определяется поглощением радиоволн в нижней ионосфере и увеличивается в результате роста N на высотах D- и E-областей ионосферы [4, 6]. При увеличении N в D-области ионосферы на 1–2 порядка, как показывают наши оценки, f_{min} может увеличиваться до 3–10 МГц. Значение $f_{max}/f_{max0} = f_{cr}/f_{cr0} = (N/N_0)^{1/2}$ определяется возмущением N в F-области ионосферы. При слабом возмущении N параметр $F \approx F_0(f_{min0}/f_{min}) \approx 0.3F_0 \approx 3$, т. е. уменьшается в 3 раза. При сильном возмущении N параметр F изменяется значительно (табл. 5, 6). При расчетах учтено, что $F/F_0 = (N_0/N)^{1/2}(f_{min}/f_{min0})$, $F_0 = 10$.

Таблица 5. Значения частотной емкости при различных уровнях возмущенности

N / N_0 \ f_{min0} / f_{min}	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1
1.0	3.16	5.48	7.07	8.37	9.49	10.0	10.49	11.40	12.25	13.04	13.78	14.49
0.9	2.84	4.93	6.36	7.53	8.54	9.00	9.44	10.26	11.03	11.74	12.40	13.84
0.7	2.21	3.84	4.95	5.86	6.64	7.00	7.34	7.98	8.58	9.13	9.65	10.14
0.5	1.58	2.74	3.54	4.19	4.75	5.00	5.25	5.70	6.13	6.52	6.89	7.25
0.3	0.95	1.64	2.12	2.51	2.85	3.00	3.10	3.42	3.68	3.91	4.13	4.25
0.1	0.32	0.55	0.71	0.84	0.95	1.00	1.05	1.14	1.23	1.30	1.38	1.45

Из табл. 5 видно, что отрицательные ионосферные бури приводят к уменьшению

частотной емкости, а положительные – к ее увеличению. При $F \leq 1$ связь при помощи радиоволн ВЧ диапазона на трассах Земля – ионосфера – Земля становится невозможной. При положительной ионосферной бури параметр F увеличивается по сравнению с F_0 . При $F_0/F \approx 1$ частотная емкость канала связи изменяется незначительно (табл. 6). Большие (3–10) значения F_0/F свидетельствуют о том, что частотная емкость канала значительно уменьшилась. При $F_0/F \geq 10$ связь становится невозможной.

Таблица 6. Значения F_0/F при различных уровнях возмущенности ионосферы (прочерки означают невозможность связи на трассах Земля – ионосфера – Земля)

N/N_0 $f_{\min 0} / f_{\min}$	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1
1.0	3.16	1.82	1.41	1.12	1.05	1.00	0.95	0.88	0.82	0.77	0.73	0.69
0.9	3.51	2.03	1.57	1.33	1.17	1.11	1.06	0.97	0.91	0.85	0.81	0.77
0.7	4.52	2.60	2.02	1.71	1.51	1.43	1.36	1.25	1.17	1.09	1.04	0.99
0.5	6.25	3.65	2.82	2.39	2.11	2.00	1.90	1.75	1.63	1.53	1.45	1.32
0.3	–	6.10	4.72	3.98	3.51	3.33	9.09	2.92	2.71	2.56	2.42	2.30
0.1	–	–	–	–	–	–	9.52	8.77	8.13	7.69	7.25	6.90

2.4. Фазовые вариации радиоволн УНЧ, ОНЧ и НЧ диапазонов. Для радиоволн с длиной волны $\lambda = 3\text{--}300$ км набег фазы $\Delta\phi$ связан с изменением высоты отражения h_r на величину $\Delta h \approx 10$ км (табл. 7).

Таблица 7. Результаты расчета $\Delta\phi/R$ в зависимости от длины радиоволны для дневного и ночного (в скобках) времени суток (R – длина радиотрассы)

λ , км	300	100	30	10	3
h_r , км	65 (85)	67 (87)	70 (90)	72 (92)	74 (94)
$\Delta\phi / R$, рад / км	$4.3 \cdot 10^{-3}$ ($1.9 \cdot 10^{-3}$)	$1.5 \cdot 10^{-3}$ ($6.9 \cdot 10^{-4}$)	$5.9 \cdot 10^{-4}$ ($3.5 \cdot 10^{-4}$)	$6.4 \cdot 10^{-4}$ ($5.5 \cdot 10^{-4}$)	$1.6 \cdot 10^{-4}$ ($1.6 \cdot 10^{-4}$)

2.5. Влияние усиления ионосферной турбулентности. В невозмущенных условиях в средних широтах относительная дисперсия флуктуаций N , равная $\sigma_N^2 = (\overline{\Delta N / N})^2$, составляет $10^{-4}\text{--}10^{-3}$ [8]. При ГБ этот параметр увеличивается на 1–2 порядка. При этом возрастает роль замираний радиосигналов, увеличивается дисперсия флуктуаций фазы σ_ϕ^2 , уменьшается их средняя амплитуда и отношение сигнал/шум. Результаты расчета $\Sigma = \sigma_\phi^2 / \sigma_{\phi_0}^2$ приведены в табл. 8.

Таблица 8. Зависимость Σ от степени возмущенности турбулентной структуры

N/N_0 $\sigma_N^2 / \sigma_{N_0}^2$	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1
1	0.01	0.09	0.25	0.49	0.81	1	1.21	1.69	2.15	2.89	3.61	4.41
3	0.03	0.27	0.75	1.47	2.43	3	1.63	5.07	6.45	8.67	10.8	13.2
10	0.1	0.9	2.5	4.9	8.1	10	12.1	16.9	21.5	28.9	36.1	44.1
30	0.3	2.7	7.5	14.7	24.3	30	16.3	50.7	64.5	86.7	108	132
100	1	9	25	49	81	100	121	169	215	289	361	441

3. Выводы

1. Сильные геокосмические бури приводят к значительному возмущению параметров околоземной среды в целом и среднеширотной ионосферы в частности.

2. Вариации параметров ионосферы в течение геокосмических бурь вызывают существенную перестройку канала распространения радиоволн. При этом значительно изменяются все основные характеристики радиоволн.

3. В средних широтах в течение отрицательных ионосферных бурь частотная ёмкость канала распространения радиоволн на трассах Земля – ионосфера – Земля уменьшается в 5–6 раз. При этом разрушаются радиолинии ВЧ диапазона. Для обеспечения дальней радиосвязи в ВЧ диапазоне во время отрицательных ионосферных бурь рекомендуется уменьшать рабочую частоту радиосредств до 3 раз. Если частоту оставлять неизменной, связь на трассах Земля – ионосфера – Земля вообще нарушится.

4. Во время положительных ионосферных бурь поглощение радиоволн с $\lambda = 0.1–100$ м увеличивается на 10–100 %. Поэтому связные системы ВЧ диапазона должны переходить на более высокие частоты, которые на несколько десятков процентов могут быть выше рабочей частоты в спокойных условиях. При этом также расширяется частотная ёмкость телекоммуникационного канала.

5. В результате значительного роста N в нижней ионосфере интегральный коэффициент поглощения увеличивается в 10–30 раз, приводя к существенному снижению отношения сигнал/шум на радиолиниях ОНЧ, НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов. При этом в НЧ и ОНЧ диапазонах имеют место также значительные фазовые искажения.

6. Рост интенсивности неоднородной структуры сопровождается ростом многолучевости в ВЧ диапазоне радиоволн, а также усилением мерцаний уровня радиосигналов в ОВЧ и УВЧ диапазонах, что может привести к нарушению функционирования радиолиний на трассах Земля – космос и космос – Земля.

Усиление ионосферной турбулентности во время геомагнитных бурь приведет к замираниям радиосигнала в широком диапазоне частот (вплоть до сантиметрового диапазона радиоволн). Для сохранения прежней (имеющей место в спокойных условиях) помехоустойчивости рекомендуется применение разнесенных по частоте радиотехнических средств различного назначения.

7. Для учета влияния геокосмических бурь на функционирование радиотехнических систем необходима разработка и усовершенствование моделей возмущенной ионосферы и возмущенного ионосферного канала связи.

8. Для адаптации радиотехнических систем различного назначения к изменениям условий в процессе геокосмических бурь рекомендуется непрерывный мониторинг состояния геокосмоса (ионосферы).

Литература

1. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59–106.
2. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2008. – V. 13, № 2. – P. 120–137.
3. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Монография – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
4. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. Физика геокосмических бурь – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2014. 408 с.
5. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N. et. al. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // Int. J. Geomagn. Aeron. – 2007. – V. 7. – GI3001 doi: 10.1029/2005GI000125.

6. Panasenko S. V., Chernogor L. F. Event of the November 7–10, 2004 Magnetic Storm in the Lower Ionosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2007. – V. 47, N.5. – P. 608–658.
7. Davies K. *Ionospheric Radio* – Peter Peregrinus, London, 1990. – 587 p.
8. Shunk R. W., Nagy A. F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics And Chemistry* – Atmospheric and Space Science Series. Cambridge University Press, 2000. – 555 p.
8. Ivanov V.A. The investigation of long-distance hf propagation on the basis of a chirp sounder /Uryadov V.P., Ryabova N.V., Shumaev V.V.// *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1995. Т. 57. № 11. С. 1263-1271.
9. Иванов В.А. Использование ЛЧМ ионозонда в адаптивной системе КВ радиосвязи /Богута Н.М., Нога Ю.В., Терехов С.А., Урядов В.П., Шумаев В.В. // Радиотехника. 1993. № 4. С. 77.
10. Иванов В.А. Аппаратура частотного обеспечения в адаптивной системе кв радиосвязи /Рябова Н.В., Урядов В.П., Шумаев В.В. // Электросвязь. 1995. № 11. С. 30.