

УДК 550.388.2

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОШУМОВ СРЕДНЕЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА В ПЕРИОД СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 1 АВГУСТА 2008 г.

С.В. Панасенко, Л.Ф. Черногор

### STATISTICAL CHARACTERISTICS OF MF-BAND RADIO NOISES DURING THE SOLAR ECLIPSE OF AUGUST 1, 2008

S.V. Panasenko, L.F. Chernogor

Обнаружено уменьшение интенсивности обоих компонентов ионосферных радиошумов в период затмения. Минимальные значения наблюдались примерно через 2 ч после начала затмения. В 09:30–11:30 имел место мощный квазипериодический процесс с периодом около 50–55 мин. Его относительная амплитуда составляла 2–4 %, что особенно было заметно по необыкновенному компоненту радиошумов. Во время затмения также наблюдались волновые возмущения (ВВ) с периодами 8, 12 и 20–30 мин. В фоновые сутки амплитуды ВВ не превышали 1–2 %.

During the eclipse, decrease in intensity of both components of ionospheric radio noises was detected. Minimal values were registered approximately in two hours after beginning of the eclipse. Quasi-periodic process with the period of 50–55 min was observed at 09:30–11:30. Its relative amplitude was 2–4 %. It was especially noticeable due to the extraordinary component of radio noises. During the eclipse, WDs with periods of 8, 12, and 20–30 min were observed. Relative amplitudes of WDs did not exceed 1–2 % on the day without the solar eclipse.

#### Введение

Изучение эффектов солнечных затмений (СЗ) в атмосфере проводится в течение многих десятилетий с использованием целого ряда методов. К ним относятся методы вертикального зондирования [1, 2], некогерентного рассеяния [3, 4], доплеровский метод [5, 6], спутниковые методы [7, 8] и другие методы [9, 10].

Благодаря проведенным исследованиям было установлено, что физические процессы в ионосфере отличаются многообразием и существенно зависят от состояния космической погоды, фазы затмения, положения в цикле солнечной активности и других факторов.

Наименее изучены эффекты в нижней ионосфере или мезосфере (60–90 км).

Наибольшее число измерений выполнено с использованием радиосигналов очень низкочастотного (ОНЧ) диапазона, распространяющихся в нижней ионосфере [11–13]. Многократно подтверждено, что параметры верхней стенки волновода Земля–ионосфера существенно изменяются с течением времени. В работе [14] с использованием ракетных измерений показано, что при полном СЗ концентрация электронов уменьшается в течение затмения до 10 раз.

Для исследования эффектов затмения в D-области ионосферы используется также метод частичных отражений. В работах [15, 16] обнаружено, что, кроме уменьшения концентрации электронов на стадии покрытия диска Солнца, концентрация электронов увеличивается. В работе [16] последнее явление объясняется высыпанием частиц с энергиями 50–100 кэВ из магнитосферы.

В настоящей работе радар среднечастотного (СЧ) диапазона применялся для исследования временных вариаций интенсивностей радиошумов обыкновенной и необыкновенной поляризаций.

Целью работы является описание результатов статистического и спектрального анализа временных вариаций радиошумов на частоте 2.4 МГц, сопровождавших СЗ.

СЗ в месте расположения радиофизической обсер-

ватории было частным. Оно началось в 09:11, закончилось в 11:17 (здесь и далее UT). Максимальная фаза СЗ составляла 0.42 и наблюдалась в 10:15. Общая продолжительность СЗ в окрестности Харькова составила примерно 2 ч 06 мин. День СЗ, 1 августа 2008 г., так же как и фоновый день 2 августа 2008 г., был спокойным.

#### Средства и методы

Технические характеристики радара, расположенного в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, и режимы его работы более подробно описаны в работе [17]. Здесь отметим лишь следующее. Зондирование D-области ионосферы производилось радиопульсами длительностью 25 мкс с частотой заполнения  $f=2.4$  МГц и частотой повторения  $F=10$  Гц. В эксперименте регистрировались огибающие обыкновенного и необыкновенного компонентов радиошума  $A_{o,x}$ . Измерения проводились в период СЗ, а также в фоновый день.

Исследовались временные зависимости средних квадратов огибающих обоих компонентов  $I_{o,x} = \langle A_{o,x}^2 \rangle$ , которые пропорциональны интенсивностям компонентов радиошума. Здесь угловые скобки означают скользящее усреднение на интервале времени 60 мин с шагом 1 мин.

Для определения параметров волновых возмущений (ВВ) использовался пассивный метод дистанционного радиозондирования, описанный в работах [18, 19], а также методы спектрального анализа, изложенные в [20, 21].

#### Результаты анализа интенсивности радиошума

Временные вариации  $I_{o,x}$ , нормированные на максимальное значение, в день затмения и в фоновый день приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что  $I_o$  в день затмения вначале плавно возрастала и достигла максимального значения вблизи 07:28. После этого началось уменьшение ее значения до минимального, равного 0.225. Это минимальное значение наблюдалось вблизи 11:00. Затем началось возрастание интен-

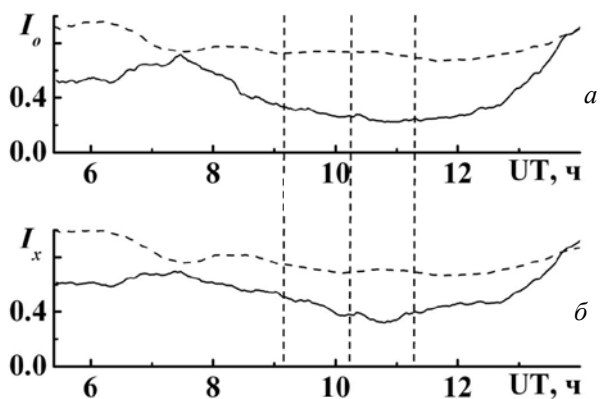


Рис. 1. Временные вариации интенсивностей обычного (а) и необыкновенного (б) компонентов радиощума в день затмения (сплошная линия) и в фоновый день 2 августа 2008 г. (штриховая линия)

сивности необыкновенного компонента, которое продолжалось до окончания эксперимента.

В фоновый день значение  $I_o$  также уменьшилось с течением времени, однако это уменьшение было не таким существенным, как в фоновый день. В интервале времени 07:00–13:00 величина интенсивности незначительно отклонялась от значения, равного 0.7, после чего ее значение возросло до конца эксперимента.

Величина  $I_x$  в день ЗС изменялась следующим образом. Вначале наблюдалось небольшое увеличение ее значения, а после 07:30 ее значение стало уменьшаться. В 10:47 величина интенсивности необыкновенного компонента достигла минимального значения 0.32, после чего начался ее рост вплоть до окончания эксперимента.

В фоновый день величина  $I_x$  вначале несколько уменьшилась. В период с 08:00 до 13:00 ее значения в основном лежали в пределах 0.65–0.75, а затем имело место их небольшое увеличение.

В целом вариации интенсивностей обычного и необыкновенного компонента радиопомехи были подобны.

### Результаты анализа волновых возмущений

Результаты исследования ВВ в день затмения по данным спектрального анализа  $I_o(t)$  приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что на протяжении всего дня существовали ВВ различной длительности, с разными периодами и относительными амплитудами 0.02–0.04.

После начала ЗС вблизи 09:50 имело место усиление колебания с периодом около 50 мин. Продолжительность этого колебания была около 2 периодов. Также вблизи 10:00 имело место колебание с периодом 8 мин, продолжавшееся около 25 мин (3 периода).

Результаты спектрального анализа  $I_x(t)$  демонстрируют наличие мощного квазипериодического процесса с периодом 50–55 мин, возникшего примерно через 30 мин после начала затмения. Его продолжительность составила не более 2 периодов. Вблизи 10:00 наблюдалось ВВ с периодом около 8 мин и длительностью 20–30 мин. Кроме того, в интервале времени 10:30–11:00 имело место еще одно ВВ с периодом около 12 мин. Последнее возмущение

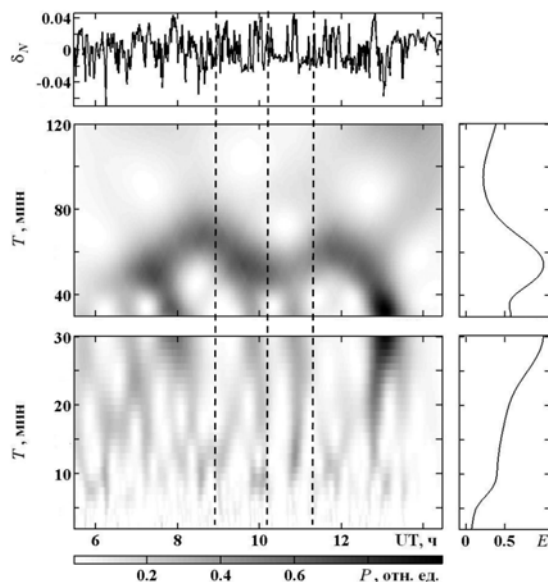


Рис. 2. Временная зависимость относительных вариаций электронной концентрации, полученная с использованием обычного компонента радиощума, в период ЗС 1 августа 2008 г. (первая панель), а также спектрограммы (в относительных единицах) соответственно оконного преобразования Фурье (вторая панель), адаптивного преобразования Фурье (третья панель) и вейвлет-преобразования на основе вейвлета Морле (четвертая панель) анализируемого сигнала. Справа приведены энергограммы соответствующих преобразований.

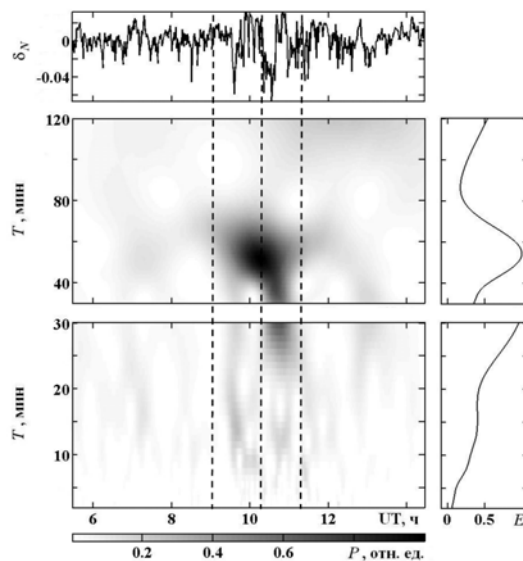


Рис. 3. То же, что на рис. 2, полученное с использованием необыкновенного компонента.

практически не просматривалось на спектрограммах, полученных в процессе анализа обычного компонента радиощума.

В фоновый день амплитуда ВВ не превышала 0.01–0.02. В этот день не обнаружено существенных вариаций параметров ВВ в течение времени наблюдения.

### Обсуждение

Ожидалось, что уменьшение потока солнечной радиации в течение ЗС приведет к уменьшению электронной концентрации  $N$ , а значит, и поглощения радиощумов. Оценим ожидаемое увеличение  $I_o$  в период затмения. На высотах 60–85 км в дневное

время справедлив линейный закон рекомбинации [2]. Тогда

$$\frac{N}{N_0} = \frac{q}{q_0}.$$

Здесь  $q$  – скорость ионизации, индексом «0» обозначены значения величин в отсутствие затмения. При максимальном значении функции покрытия  $A_{\max} \approx 0.31$  имеем

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = 1 - A_{\max} \approx 0.69,$$

где  $N_{\min}$  – минимальное значение электронной концентрации.

На высотах 85–120 км должен иметь место квадратичный закон рекомбинации. Здесь

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \sqrt{\frac{q}{q_0}} = \sqrt{1 - A_{\max}} \approx 0.83.$$

При таком уменьшении  $N$  вблизи главной фазы СЗ  $I_o$  должна бы увеличиться в

$$e^{2\Delta K_{o\max}} = e^{2K_o \delta_{N\max}} \approx 2 \text{ раза.}$$

Здесь учтено, что, согласно проведенным нами оценкам, интегральный коэффициент поглощения обыкновенного компонента  $K_o \approx 2$ , а

$$\delta_{N\max} = 1 - N_{\min} / N_0 \approx 0.17.$$

Реально произошло уменьшение  $I_o$  примерно в 4 раза.

Уменьшение  $I_{o,x}$ , очевидно, вызвано увеличением поглощения радиошумов. В свою очередь, увеличение интегрального коэффициента поглощения  $K$  должно вызываться увеличением  $N$ .

К росту  $N$  и  $K$  в глобальных масштабах может привести высыпание высокоэнергичных частиц из магнитосферы в результате опосредованного воздействия СЗ на подсистемы в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ) [22].

Возможность высыпания электронов в средних широтах в течение СЗ впервые была рассмотрена в работе [16]. Основные процессы взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ, стимулированные затмением, следующие.

Охлаждение нейтралов в нижней части термосферы и уменьшение  $N$  на этих же высотах приводят к возмущению тензора проводимости  $\hat{\sigma}$  ионосферной плазмы в районе динамо-области (высоты 90–150 км). Это обеспечивает генерацию ионосферного электрического поля. Проникая в магнитосферу, это поле способно уменьшить «поперечную» энергию электронов  $\varepsilon_{e\perp}$  и тем самым перевести их в конус потерь. Возникающее высыпание электронов приводит к ионизации нейтральных частиц в широком диапазоне высот. Последний определяется энергией высыпающихся частиц.

Оценить генерируемое электрическое поле можно по следующей формуле [16]:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} E_0,$$

где  $\sigma_0$  – компоненты тензора  $\hat{\sigma}$ ,  $\Delta\sigma$  – их возмущения,  $E_0$  – электрическое поле в динамо-области. В дневное время  $E_0 \approx 3$  мВ/м. Полагая  $\Delta\sigma/\sigma \approx 0.2$ , получим, что  $E \approx 0.6$  мВ/м. При поперечном размере области с возмущенным электрическим полем  $L_{\perp}$  имеем

$$\varepsilon_{e\perp} = eEL_{\perp}.$$

При затмении  $L_{\perp} \approx 4$  тыс. км. Тогда  $\varepsilon_{e\perp} \approx 2.4$  кэВ. Таких значений  $\varepsilon_{e\perp}$  часто оказывается достаточно для стимуляции высыпания электронов из магнитосферы и активизации взаимодействия подсистем ионосфера–магнитосфера–атмосфера–ионосфера.

Наблюдались ли высыпания частиц, вызванные СЗ, другими авторами?

Скорее всего, да. В работе [2] обнаружено, что вскоре после начала затмения на высоте 91 км значения  $N$  стали в 2–3 раза больше, чем в то же время в фоновый день. Заметный рост (в 1.5–2 раза) имел место и в конце СЗ, а также в течение некоторого времени и после него. На высоте 77 км отношение  $N/N_0$  в те же интервалы времени не превышало 1.5. Заметим, что в фоновые дни относительный разброс значений  $N$  составлял  $\sigma_N/N_0 \approx 0.2$ , где  $\sigma_N^2$  – дисперсия вариаций концентрации электронов на фиксированной высоте. Так что увеличение  $N$  в 1.5–3 раза может быть вызвано лишь дополнительным источником ионизации.

Таким образом, с определенной долей уверенности можно утверждать, что обнаруженное нами уменьшение до 4 раз интенсивностей радиошума СЧ-диапазона могло быть вызвано стимулированным СЗ глобальным высыпанием электронов из магнитосферы.

Кратко остановимся на результатах спектрального анализа. В течение СЗ эпизодически усиливались спектральные составляющие с периодами 8, 12, 20–30 и 50–55 мин и относительными амплитудами 2–4 %. Такие периоды и относительные амплитуды свойственны внутренним гравитационным волнам (ВГВ) на высотах мезосферы. Эти волны в течение затмений наблюдались и другими исследователями [10], но, как правило, в E- и F-областях ионосферы.

## Выводы

1. Обнаружено, что в течение СЗ 1 августа 2008 г. имело место уменьшение до 4 раз интенсивности радиошума СЧ-диапазона (частота 2.4 МГц).

2. Уменьшение интенсивности, скорее всего, вызвано стимуляцией затмением глобального высыпания электронов из магнитосферы.

3. Продемонстрировано, что в течение СЗ имело место усиление ВВ с периодами от 8 до 50–55 мин, свойственных ВГВ. Их относительная амплитуда составляла 2–4 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Перевалова Н.П. и др. Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. над Казахстаном // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47, № 4. С. 491–500.

2. Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е. и др. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Нижнем Новгороде и Мурманске // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 48, № 1. С. 103–108.
3. Акимов Л.А., Григоренко Е.И., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 г.: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 3. С. 55–70.
4. MacPherson B., Gonzalez S.A., Silzer M.P., et al. Measurements of the topside ionosphere over Arecibo during the total solar eclipse of February 26, 1998 // J. Geophys. Res. 1998. V. 105, N A10. P. 23.055–23.068.
5. Костров Л.С., Черногор Л.Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствовавших затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. 2000. Т. 5, № 4. С. 361–370.
6. Ishinose T., Ogawa T. Internal gravity waves deduced from HF Doppler data during the April 19, 1958, solar eclipse // J. Geophys. Res. 1976. V. 8, N 13. P. 2401–2404.
7. Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., Chernukhov V.V. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25, N 4. P. 465–468.
8. Rama Rao P.V.S., Rao B.V.P.S., Nru D., Niranjana K. TEC observations at Waltair during the total solar eclipse of 16 February 1980 // Proc. Indian Nat. Acad. Sci. 1982. V. 48, N 3. P. 434–438.
9. Мусатенко С.И., Максименко О. И., Мусатенко Ю.С. и др. Возмущения в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 11 августа 1999 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 1. С. 78–87.
10. Jones T.B., Wright D.M., Milner J., et al. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse 11 August 1999 // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2004. V. 66, N 5. P. 363–374.
11. Безродный В.Г., Блюх П.В., Шубова Р.С., Ямпольский Ю.М. Флуктуации сверхдлинных радиоволн в волноводе Земля–ионосфера. М.: Наука. 1984. 144 с.
12. Каримов Р.Р., Козлов В.И., Муллаяров В.А. Особенности вариаций характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 2. С. 250–254.
13. Crary J.H., Schneible D.E. Effect of the Eclipse of 20 July 1963 on VLF Signals Propagating Over Short Paths // Proc. of NBS. Radio Sci. 1965. V. 69D, N 7. P. 947–957.
14. Kane J.A. D-region electron density measurements during the solar eclipse of May 20, 1966 // Planet. Space Sci. 1969. V. 17, N 4. P. 609–616.
15. Гоков А.М., Черногор Л.Ф. Результаты наблюдений процессов в нижней ионосфере, сопутствовавших затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. 2000. Т. 5, № 4. С. 348–360.
16. Черногор Л.Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. 2000. Т. 5, № 4. С. 371–375.
17. Гармаш К.П., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1: Зарубежная радиоэлектроника // Успехи современной радиоэлектроники. 1999. № 7. С. 3–15.
18. Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Результаты радиофизических исследований волновых возмущений в нижней ионосфере // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 7. С. 38–56.
19. Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Выявление волновых возмущений в мезосфере с помощью СЧ–ВЧ-радаров // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 4. С. 525–535.
20. Бурмака В.П., Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 11. С. 3–24.
21. Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 5. С. 681–702.
22. 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.

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина МОН Украины, Харьков*