

УДК 550.388.2

**М. В. Ляшенко<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

## **ЭФФЕКТЫ В ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ВО ВРЕМЯ ЧАСТНОГО ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА 1 АВГУСТА 2008 г. НАД ХАРЬКОВОМ. 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ**

---

*Представлено результати теоретичних розрахунків параметрів динамічних процесів у геокозмичній плазмі під час часткового (фаза 0.42) затемнення Сонця 1 серпня 2008 р. Показано, що температура нейтральної атмосфери зменшувалась на 17–40 К у діапазоні висот 250–350 км. Густина повного потоку плазми та густина потоку плазми за рахунок амбіполярної дифузії збільшилися на висотах 210–580 км. В іоносфері відбувалося посилення швидкості нейтрального вітру в діапазоні висот 210–410 км. Енергія, що підводиться до електронів, зменшилась приблизно на 12 % на висотах 210–290 км, а густина потоку тепла зменшилась на 9–16 % у висотному діапазоні 240–340 км. Порівнюються варіації параметрів іоносферної плазми під час затемнень 11 серпня 1999 р., 31 травня 2003 р., 3 жовтня 2005 р., 29 березня 2006 р. і 1 серпня 2008 р.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Затмения Солнца (ЗС), как известно, относятся к высокоэнергетическим явлениям, которые существенно воздействуют на открытую динамическую нелинейную систему Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) [8–11, 14]. В частности, эффекты затмения оказывают существенное влияние на поведение параметров динамических и тепловых процессов в ионосферной плазме, ответственных за перенос заряженных частиц и энергии в подсистемах.

Вариации параметров среды во время ЗС качественно подобны вариациям, имеющим место при переходах день — ночь и ночь — день [1–7].

В предыдущей работе [6] мы представили результаты наблюдений вариаций основных параметров ионосферной плазмы по данным радара НР в Харькове во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г.

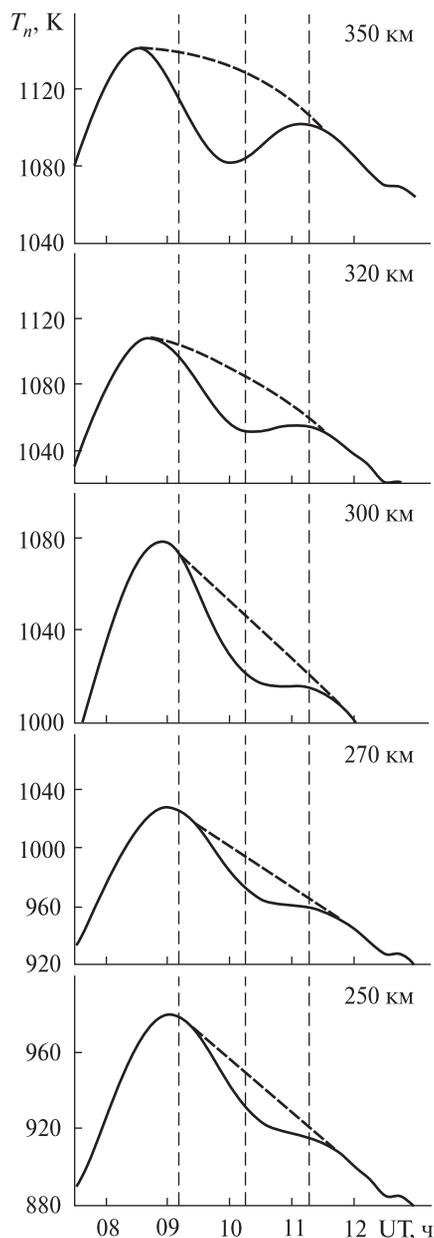
Целью настоящей работы является теоретическое моделирование временных вариаций параметров динамических и тепловых процессов в околоземной среде во время частного ЗС 1 августа 2008 г., а также анализ и обсуждение полученных результатов наблюдений и моделирования.

### **ИСХОДНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ**

Как известно, процессы переноса заряженных частиц и энергии играют доминирующую роль в формировании высотной структуры области F2 ионосферы на высотах главного максимума и выше. Мы выполнили теоретическое моделирование основных параметров динамических процессов в плазме во время ЗС 1 августа 2008 г., а также в контрольные сутки 2 августа 2008 г.

Теоретические соотношения, применяемые здесь, такие же, как и в работах [1–3, 5, 7]. В качестве исходных использованы основные параметры ионосферы ( $N$ ,  $T_e$ ,  $T_i$  и  $V_z$ ), полученные на харьковском радаре НР. Расчет параметров нейтральной атмосферы выполнен с помощью современной эмпирической термосферной модели NRLMSISE-00 [15].

Для расчета температуры нейтральных частиц применялась методика, основанная на уравнении теплового баланса ионного газа [12]. Данная методика справедлива только в диапазоне высот 250–350 км, так как для  $z > 350$  км необходим учет теплопроводности электронного газа, а для  $z < 250$  км имеет место интенсивная потеря тепла при соударениях электронов с нейтральными частицами.



**Рис. 1.** Временные вариации температуры нейтралов  $T_n$  во время затмения Солнца 1 августа 2008 г. Здесь и далее штриховой линией на графиках показана ожидаемая зависимость

Таким образом, при условии квазистационарности скорость нагрева ионов  $O^+$  за счет теплообмена с электронами можно приравнять к скорости охлаждения за счет передачи тепла нейтральным частицам. Выражение для расчета  $T_n$  в

системе СИ имеет вид

$$T_i - T_n = \frac{4.82 \cdot 10^7 N(T_e - T_i) T_e^{-3/2}}{6.6N(N_2) + 5.8N(O_2) + 0.2N(O)(T_i + T_n)^{1/2}},$$

где  $N$ ,  $N(N_2)$ ,  $N(O_2)$  и  $N(O)$  — концентрации электронов, молекулярного азота, молекулярного кислорода и атомарного кислорода соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

**Температура нейтралов.** На рис. 1 приведены результаты расчета температуры нейтралов во время ЗС 1 августа 2008 г.

Частное ЗС 1 августа 2008 г. привело к уменьшению  $T_n$  на 17, 17, 29, 32 и 40 К на высотах 250, 270, 300, 320 и 350 км соответственно. Время запаздывания этого эффекта в вариациях  $T_n$  по отношению к моменту главной фазы затмения на рассматриваемых высотах составило примерно 32, 23, 18 и 0 мин.

На рис. 2—6 представлены результаты теоретического моделирования временных вариаций параметров динамических процессов в геокосмической плазме во время солнечного затмения 1 августа 2008 г. и в контрольные сутки 2 августа 2008 г.

**Потоки заряженных частиц.** Временные вариации плотностей полного потока  $\Pi_p$  плазмы и потока  $\Pi_d$  частиц за счет амбиполярной диффузии во время ЗС 1 августа 2008 г. и в контрольный день 2 августа 2008 г. представлены на рис. 2 и 3. Видно, что во время ЗС имело место увеличение по модулю  $\Pi_p$  в диапазоне высот 210—580 км. В момент главной фазы ЗС значения плотностей полного потока достигали  $1.5 \cdot 10^{12}$ ,  $2 \cdot 10^{12}$ ,  $5 \cdot 10^{12}$  и  $10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  на высотах 210, 290, 410 и 580 км соответственно.

В контрольный день 2 августа 2008 г. на высоте 410 км в течение всего времени наблюдался поток частиц, направленный вниз в ионосферу. В день ЗС до начала затмения поток частиц был направлен вверх, после начала ЗС наблюдалось изменение направления движения плазмы. Обратная ситуация имела место на высоте 580 км.

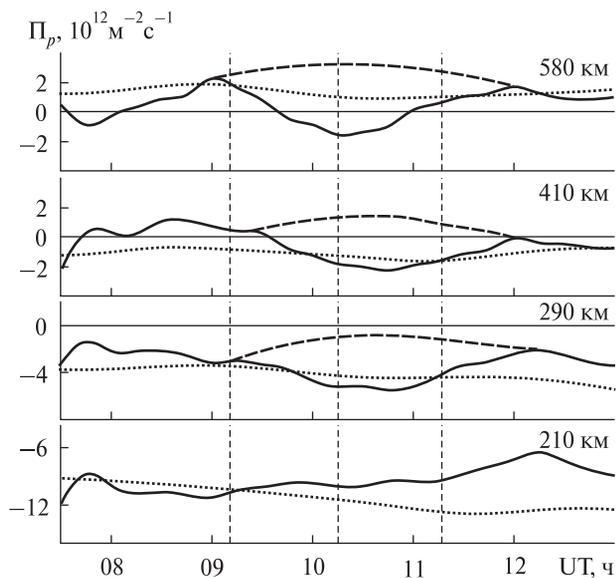


Рис. 2. Временные вариации плотности  $P_p$  полного потока плазмы. Здесь и далее сплошная кривая — день ЗС 1 августа 2008 г., пунктир — контрольные сутки 2 августа 2008 г.

В контрольные сутки поток частиц был направлен вверх в течение всего времени наблюдения. В день затмения 1 августа 2008 г. также происходит изменение направления переноса заряженных частиц. Таким образом, во время ЗС имело место либо увеличение по модулю плотности потока частиц, направленного в ионосферу, либо смена направления движения плазмы на высотах 410 и 580 км.

**Нейтральные ветры в ионосфере.** Временные вариации скорости эквивалентного нейтрального ветра  $w$  [13] и меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра  $V_{nx}$  в день затмения 1 августа 2008 г. и в контрольные сутки 2 августа 2008 г. представлены на рис. 4. Видно, что эффекты ЗС во временных вариациях скоростей нейтральных ветров проявились достаточно явно. Результаты расчетов  $w$  и  $V_{nx}$  показали, что в момент максимального покрытия диска Солнца изменение  $w$  составило примерно 16, 28 и 68 м/с;  $V_{nx}$  — примерно 43, 76 и 185 м/с на высотах 210, 290 и 410 км соответственно. На высотах 210 и 290 км ЗС вызвало увеличение скорости направленного от экватора к полюсу нейтрального вет-

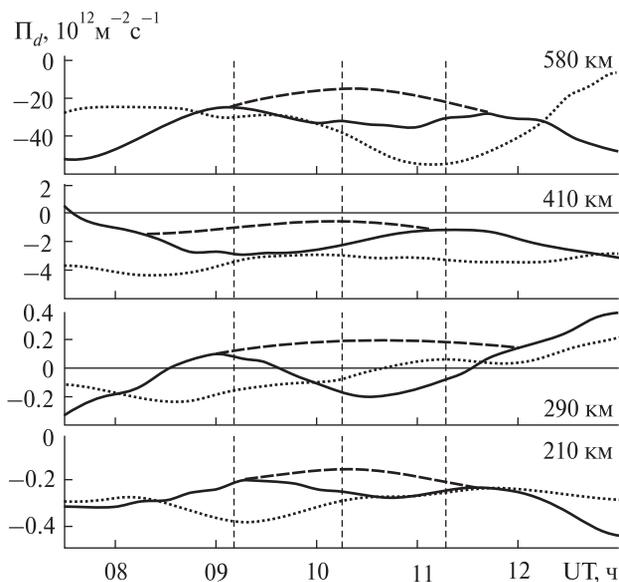


Рис. 3. Временные вариации плотности  $P_d$  потока плазмы за счет амбиполярной диффузии

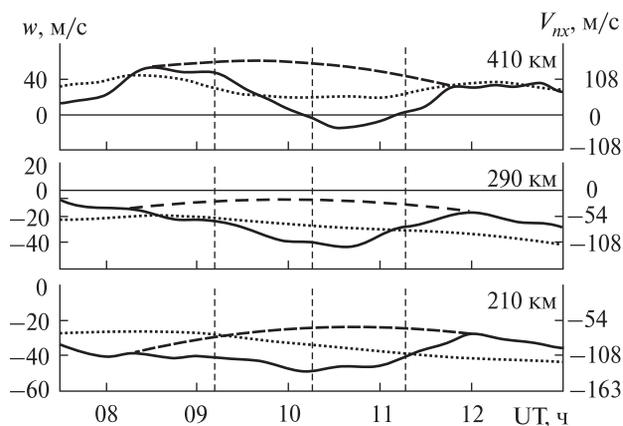


Рис. 4. Временные вариации скорости  $w$  эквивалентного нейтрального ветра и меридиональной составляющей  $V_{nx}$  скорости нейтрального ветра

ра. На высоте 410 км до затмения, после него и в контрольные сутки наблюдался нейтральный ветер, направленный от полюса к экватору. Во время затмения 1 августа 2008 г. имело место уменьшение скорости нейтрального ветра от полюса к экватору, изменение направления и усиление ветра от экватора к полюсу.

**Величина энергии, подводимой к электронам.**

На рис. 5 приведены временные вариации энер-

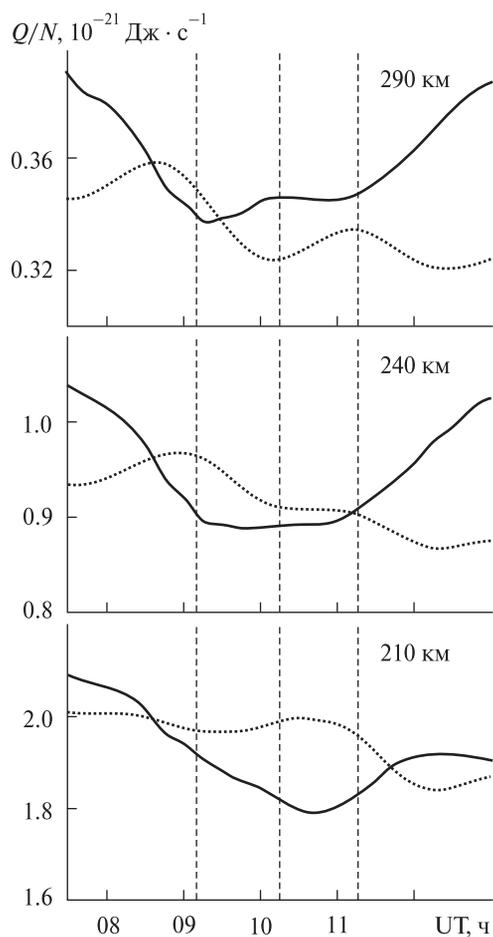


Рис. 5. Временные вариации энергии  $Q/N$ , подводимой к электронному газу

гии  $Q/N$ , подводимой к электронному газу в единицу времени во время ЗС 1 августа 2008 г. и в контрольные сутки 2 августа 2008 г. В момент главной фазы ЗС наблюдалось уменьшение величины энергии, подводимой к электронам. В диапазоне высот 210–290 км падение  $Q/N$  составило примерно 12 % (рис. 5).

**Поток тепла, переносимого электронами.** Временные вариации плотности потока тепла  $\Pi_T$ , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, представлены на рис. 6. Как и следовало ожидать, ЗС привело к уменьшению величины  $\Pi_T$  в диапазоне высот 240–340 км. Уменьшение  $\Pi_T$  во время ЗС составило 9, 11 и 16 % на высотах 240, 290 и 340 км.

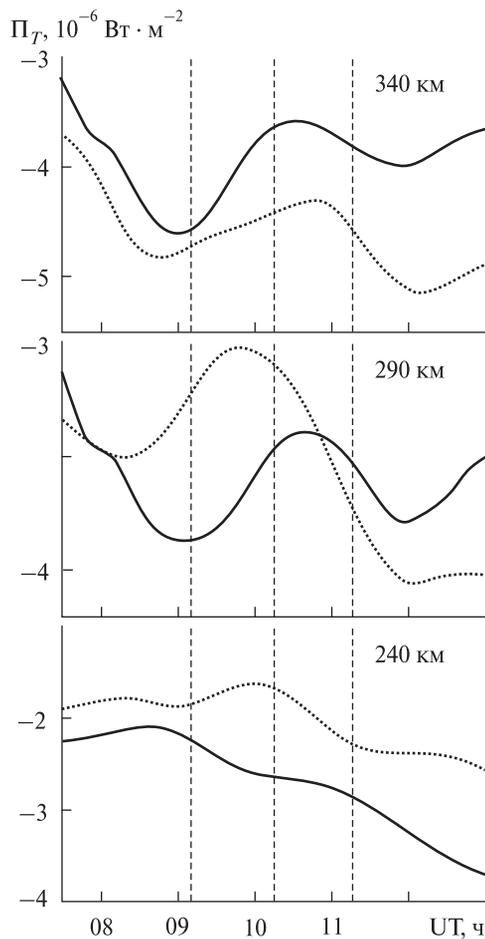


Рис. 6. Временные вариации плотности  $\Pi_T$  потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу

## ОБСУЖДЕНИЕ

Обсудим более подробно результаты наблюдений и теоретического моделирования вариаций параметров ионосферной плазмы во время затмения Солнца 1 августа 2008 г.

**Концентрация электронов в ионосфере.** Как известно, в околополуденные часы концентрация в максимуме области F2 ионосферы  $N_m$  достигает своих максимальных значений. Затмение Солнца 1 августа 2008 г. произошло как раз в указанное время. В момент главной фазы затмения зафиксировано уменьшение  $N_m$  примерно на 32 %. Высота максимума слоя F2 во время ЗС увеличилась примерно на 3 км. Уменьшение

концентрации  $N_m$  связано в первую очередь с падением потока ионизирующего ультрафиолетового излучения Солнца. Наибольшее уменьшение концентрации электронов имеет место в нижней части области F ионосферы. На больших высотах уменьшение концентрации электронов компенсируется за счет потоков заряженных частиц в ионосферу из плазмосферы. Этот факт подтверждается теоретическими расчетами в данной работе и данными [1—5, 7].

Затмение Солнца приводит к заметной перестройке структуры ионосферы в целом, ее динамического и теплового режимов. Об этом свидетельствует высотный профиль  $N(z)$  в момент времени, близкий к главной фазе затмения [6]. Затмение привело к смещению профиля  $N(z)$ , что соответствует постепенному переходу к ночным условиям. В работах [2—5] наблюдалось подобное поведение высотного профиля  $N$ .

Увеличение высоты  $z_m$  слоя F2 в момент главной фазы ЗС также указывает на то, что во время затмения имел место переход к «ночным» условиям.

**Температуры электронов и ионов.** Эффекты затмения хорошо заметны в вариациях температуры электронов и ионов. Во время ЗС 1 августа 2008 г. наблюдалось уменьшение  $T_e$  примерно на 70—180 К на высотах 190—490 км. Такое поведение  $T_e$  во время ЗС связано с уменьшением интенсивности ионизирующего солнечного излучения и, тем самым, с уменьшением числа фотоэлектронов, образующихся в F-области ионосферы [1, 2].

Следует обратить внимание на то, что во время затмения Солнца 1 августа 2008 г. минимум в вариациях  $T_e$  запаздывал по отношению к моменту наступления затмения примерно на 95—75 мин в высотном диапазоне 190—490 км. Во время ЗС 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г. наблюдалось практически безынерционное уменьшение  $T_e$  [1—5]. Такое поведение  $T_e$  связано прежде всего с малой инерционностью процесса охлаждения электронного газа на высотах, где времена переноса тепла за счет теплопроводности и теплообмена между электронами, ионами и нейтральными частицами достаточно малы [2].

Рассмотрим временные вариации температуры ионов. Во время ЗС  $T_i$  уменьшилась примерно на 60—140 К в диапазоне высот 190—490 км. Максимальное уменьшение  $T_i$  наблюдалось с запаздыванием примерно на 80—35 мин после начала затмения на высотах 190—490 км соответственно.

Эффекты ЗС хорошо заметны и в высотном распределении температуры электронов и ионов. В момент, близкий к главной фазе затмения, имело место смещение высотных профилей  $T_e(z)$  и  $T_i(z)$ , что указывает на перестройку теплового режима ионосферы в широком диапазоне высот и постепенному переходу к ночным условиям.

**Скорость переноса заряженных частиц.** Эффекты ЗС 1 августа 2008 г. заметно проявились в вариациях вертикальной составляющей скорости переноса заряженных частиц и тем самым повлияли на динамический режим ионосферной плазмы. Во время ЗС наблюдалось уменьшение  $V_z$  примерно на 10—55 м/с в диапазоне высот 200—530 км. Как известно, в дневные часы перенос плазмы преимущественно направлен вверх вдоль магнитных силовых линий. В ночные часы имеет место обратный процесс — заряженные частицы, запасенные в дневное время в плазмосфере, посредством диффузии переносятся вниз в ионосферу, компенсируя рекомбинационные потери на высотах области F2 ионосферы.

В течение ЗС 1 августа 2008 г. на высотах 200 и 310 км наблюдалось усиление направленной вниз скорости переноса частиц, а на высотах 420 и 530 км имело место изменение направления движения заряженных частиц. Такое поведение  $V_z$  характерно для ночного времени и свидетельствует о том, что во время ЗС происходил постепенный переход к «ночным» условиям. Это хорошо иллюстрируют высотные профили  $V_z$ . Действительно, в момент времени, близкий к максимальной фазе ЗС, профиль  $V_z$  качественно похож на высотный профиль скорости переноса плазмы в ночные часы [6].

**Вариации концентрации ионов водорода.** Как уже говорилось выше, ЗС заметно влияет на высотное распределение заряженных частиц в

ионосфере. По данным радара НР во время ЗС 1 августа 2008 г. наблюдалось увеличение примерно на 10—20 % относительной концентрации ионов водорода  $N(\text{H}^+)/N$  в широком диапазоне высот по сравнению с контрольными сутками 2 августа 2008 г.

По высотным профилям концентрации ионов водорода получено, что ЗС привело к увеличению  $N(\text{H}^+)$  примерно на 15—20 % в диапазоне высот 500—900 км, причем высотный профиль  $N(\text{H}^+)$  в фазу максимального покрытия диска Солнца качественно подобен профилю концентрации ионов  $\text{H}^+$  в ночное время. Поведение  $N(\text{H}^+)/N$  в период ЗС 1 августа 2008 г. согласуется с ранее полученными вариациями концентрации ионов водорода во время нескольких затмений Солнца [1—5].

**Температура нейтралов.** Уменьшение температуры  $T_n$  связано с уменьшением освещенности атмосферы, и следовательно, эффективности солнечного нагрева. Как видно из рис. 1, во время ЗС с увеличением высоты уменьшение  $T_n$  возрастало и отслеживало вариации температуры ионов. Запаздывание реакции  $T_n$  относительно момента главной фазы затмения, наоборот, с увеличением высоты уменьшалось. Такая же картина наблюдалась и в вариациях  $T_i$ . Такое временное запаздывание можно объяснить увеличением роли теплопроводности нейтрального и ионного газа с ростом высоты. В целом временные вариации  $T_n$  во время ЗС 1 августа 2008 г., 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г. и 3 октября 2005 г. согласуются между собой [1, 2, 7].

**Потоки заряженных частиц в ионосфере.** Поведение вертикальной составляющей скорости переноса плазмы и плотностей потоков заряженных частиц свидетельствует о том, что во время ЗС происходит увеличение по модулю значений  $\Pi_p$  и  $\Pi_d$  в широком диапазоне высот. Поскольку увеличение потоков сверху характерно для ночного времени, можно считать, что ЗС привело к наступлению кратковременной ночи. Результаты расчетов  $\Pi_p$  и  $\Pi_d$  в течение солнечного затмения 1 августа 2008 г. согласуются с результатами теоретического моделирования, выполненного в работах [1—3, 5, 7] для других ЗС.

**Скорости нейтральных ветров.** Поведение параметров нейтральных ветров в периоды солнечных затмений в средних широтах исследовалось крайне редко. Данные харьковского радара НР о вертикальной составляющей скорости переноса заряженных частиц позволяют рассчитывать величины скоростей нейтральных ветров. Как уже было описано выше, эффекты ЗС заметны в вариациях скоростей нейтральных ветров. Достаточно очевидным является факт усиления направленного от экватора к полюсу нейтрального ветра во время ЗС. Такое поведение  $w$  и  $V_{nx}$  наблюдалось в периоды затмений в 1999 и 2005 гг. [1, 2, 7].

Однако есть и различия в поведении  $w$  и  $V_{nx}$  во время ЗС. Так, 1 августа 2008 г. на высоте 410 км наблюдалась смена направления  $w$  и  $V_{nx}$ . Похожая ситуация имела место во время ЗС 29 марта 2006 г., когда за несколько часов до ЗС  $w$  и  $V_{nx}$  были направлены от экватора к полюсу, а в период затмения их направление изменилось на противоположное.

**Подвод энергии к электронному газу.** Как и следовало ожидать, солнечное затмение привело к уменьшению величины энергии, подводимой к электронам. Уменьшение  $Q/N$  в диапазоне высот 210—290 км составило не более 12 %. Следует также отметить, что поведение  $Q/N$  во время ЗС качественно отражает вариации температуры электронов. Уменьшение величины энергии, подводимой к электронному газу, связано с уменьшением в период затмения удельной энергии, передаваемой фотоэлектронами электронам на высотах  $z < 350$  км [1—3, 5, 7].

**Поток тепла из плазмосферы в ионосферу.** Хорошо известно, что при наличии разности температур в среде устанавливается тепловой поток от слоя с высокой температурой к слою с низкой температурой. В ионосфере обычно  $\partial T_e / \partial z > 0$  и  $\Pi_T < 0$ . Это означает, что поток тепла направлен вниз в ионосферу. В работе [6] уже говорилось о том, что ЗС привело к уменьшению  $T_e$  в широком диапазоне высот. Уменьшение (по модулю)  $\Pi_T$  вблизи главной фазы затмения составило примерно 9—16 % в диапазоне высот 240—340 км. Это связано главным образом с охлаждением электронного газа ( $\Pi_T \propto T_e^{5/2} \partial T_e / \partial z$ ). Таким

образом, эффекты ЗС 1 августа 2008 г. заметно проявились и в вариациях плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмы в ионосферу.

**Сравнение эффектов ЗС 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г., 29 марта 2006 г. и 1 августа 2008 г.** В работах [1–7] представлены результаты наблюдений эффектов в околоземной среде во время частных ЗС 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г., 29 марта 2006 г. и 1 августа 2008 г., полученных с помощью радара НР в Харькове.

В таблице приведены основные характеристики частных ЗС над Харьковом в 1999–2008 гг.: время начала, главной фазы и конца ЗС, значения функции покрытия солнечного диска по площади ( $A$ ) и диаметру ( $D/D_0$ ). Приведена также информация о солнечной и геомагнитной активности во время солнечных затмений. Видно, что наиболее подходящими для сравнения являются ЗС 11 августа 1999 г., 29 марта 2006 г. и 1 августа 2008 г. Следует отметить, что перечисленные затмения происходили примерно в одно и то же время (околополуденное и вскоре после него). Геомагнитная обстановка во время этих затмений была спокойной. Затмения Солнца 1999 и 2006 гг. были близки по величине фазы затмения. Однако ЗС 11 августа 1999 г. происходило в период максимума солнечной активности (СА), а затмение 29 марта 2006 г. — в период минимума СА.

Рассмотрим вариации основных параметров максимума области F2 ионосферы во время этих ЗС. Концентрация электронов  $N_m$  уменьшилась примерно на 15, 33 и 32 %, а высота максимума  $z_m$  увеличилась на 30, 25 и 3 км соответственно во время затмений 1999, 2006 и 2008 гг.

Во время затмений 1999, 2006 и 2008 гг. эффекты проявились и в высотном распределении концентрации  $N$  электронов. Затмение 11 августа 1999 г. привело к уменьшению  $N$  примерно на 15–20 % в диапазоне высот 250–300 км, а с ростом высоты падение концентрации было незначительным. Во время ЗС 29 марта 2006 г. уменьшение  $N$  составило 30–40, 50 и 20 % на высотах 190–210, 290 и 410 км. Во время затмения 1 августа 2008 г. уменьшение  $N$  составило около 32 % в диапазоне высот 190–210 км и примерно 25 % на высотах 290–680 км.

Температура электронов во время затмения 11 августа 1999 г. уменьшилась на 400–600 К в диапазоне высот 200–700 км. Во время ЗС 2006 и 2008 гг. на высотах 190–490 км уменьшение  $T_e$  составило примерно 150–300 и 70–180 К соответственно.

Во время ЗС 11 августа 1999 г. температура ионов уменьшилась примерно на 600 К на высоте 700 км, для ЗС 29 марта 2006 г. падение  $T_i$  составило 30–50 К в диапазоне высот 290–410 км, во время ЗС 1 августа 2008 г. — 10–30 К на высотах 190–210 км и 60–140 К на высотах 240–490 км. Следует отметить, что эффекты ЗС в вариациях  $T_i$  более заметны в диапазоне высот 240–680 км.

Эффекты рассматриваемых ЗС в вариациях относительной концентрации ионов водорода количественно и качественно подобны. Так, во время затмений в 1999, 2006 и 2008 гг. наблюдалось увеличение  $N(H^+)/N$  примерно на 15–30 % в диапазоне высот 500–900 км.

Как уже было описано выше, ЗС привели к заметной перестройке динамического режима ионосферной плазмы. Во время ЗС имело место увеличение плотности потока заряженных частиц, направленного в ионосферу, что качествен-

**Краткие сведения о частных солнечных затмениях над Харьковом и данные о солнечной и геомагнитной активности в периоды затмения Солнца**

Дата ЗС	Начало ЗС, UT	Главная фаза ЗС, UT	Конец ЗС, UT	$A$	$D/D_0$	$F_{10.7}$	$\bar{F}_{10.7}$	$A_p$
11.08.99	09:57:32	11:15:40	12:29:27	0.746	0.794	131	158	6
31.05.03	02:16:08	03:14:34	04:17:27	0.658	0.740	113	125	49
03.10.05	08:41:40	09:41:57	10:42:34	0.153	0.263	74	79	7
29.03.06	10:02:47	11:12:59	12:21:59	0.724	0.774	82	78	6
01.08.08	09:11:28	10:15:41	11:17:47	0.329	0.439	66	66	3

но напоминало перестройку среды к ночным условиям.

Во время ЗС в 1999, 2006 и 2008 гг. эффекты наблюдались и в вариациях величины энергии, подводимой к электронному газу. Так, во время затмений 11 августа 1999 г. и 29 марта 2006 г. величина  $Q/N$  уменьшилась примерно на 20—30 % в диапазоне высот 250—350 км. В момент главной фазы ЗС 1 августа 2008 г. падение  $Q/N$  в диапазоне высот 210—290 км составило не более 12 %. Такое количественное отличие в вариациях  $Q/N$  связано, скорее всего, с величиной фазы самого затмения и изменениями температуры электронов во время ЗС, а также с тем, что последнее ЗС наблюдалось в период глубокого минимума солнечной активности.

Вариации плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, для ЗС 1999, 2006 и 2008 гг. качественно подобны. Во всех трех случаях наблюдается уменьшение модуля  $\Pi_T$  в момент максимального покрытия диска Солнца. Во время затмения 11 августа 1999 г. и 29 марта 2006 г.  $\Pi_T$  уменьшилась в 2.5 и 1.5 раза соответственно. Для ЗС 1 августа 2008 г. уменьшение (по модулю)  $\Pi_T$  вблизи главной фазы составило примерно 9—16 % в диапазоне высот 240—340 км.

Сравнительный анализ показал качественное подобие эффектов ЗС в вариациях параметров ионосферы и атмосферы. Затмения существенно влияют на динамический и тепловой режим плазмы. Количественные различия вариаций параметров ионосферы и динамических процессов в большой степени могут быть объяснены различным уровнем солнечной и геомагнитной активности, а также величиной фазы ЗС.

## ВЫВОДЫ

Частное затмение Солнца 1 августа 2008 г. привело к заметной перестройке структуры ионосферы, ее динамического и теплового режимов в широком диапазоне высот. Как показали результаты экспериментальных наблюдений и теоретических расчетов, вариации параметров ионосферной плазмы, динамических и тепловых процессов в период ЗС качественно подобны

вариациям при переходе сначала к ночным, а затем к дневным условиям.

Основные результаты, полученные в данной работе, заключаются в следующем.

1. Затмение Солнца сопровождалось уменьшением температуры нейтралов на 17, 17, 29, 32 и 40 К на высотах 250, 270, 300, 320 и 350 км соответственно, время запаздывания этого эффекта в вариациях  $T_n$  по отношению к моменту главной фазы затмения на рассматриваемых высотах составило примерно 32, 23, 18 и 0 мин.

2. Во время ЗС имело место увеличение модуля  $\Pi_p$  в диапазоне высот 210—580 км. В момент главной фазы затмения величина плотности полного потока достигала  $1.5 \cdot 10^{12}$ ,  $2 \cdot 10^{12}$ ,  $5 \cdot 10^{12}$  и  $10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  на высотах 210, 290, 410 и 580 км соответственно.

3. Вариации плотности потока заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии  $\Pi_d$  во время ЗС 1 августа 2008 г. подобны вариациям  $\Pi_p$ . Затмение привело к увеличению модуля плотности потока  $\Pi_d$  и переносу плазмы на более низкие высоты, что характерно для ночных условий.

4. Эффект ЗС в вариациях скоростей нейтральных ветров проявился достаточно заметно. В момент максимального покрытия диска Солнца изменение  $w$  составило примерно 16, 28 и 68 м/с;  $V_{nx}$  — примерно 43, 76 и 185 м/с на высотах 210, 290 и 410 км соответственно.

5. В момент главной фазы ЗС в диапазоне высот 210—290 км наблюдалось уменьшение величины энергии  $Q/N$ , подводимой к электронам, примерно на 12 %. Также вариации  $Q/N$  в период ЗС обусловлены вариациями температуры электронов.

6. Затмение Солнца привело к уменьшению величины  $\Pi_T$  на 9, 11 и 16 % на высотах 240, 290 и 340 км соответственно.

7. Сравнительный анализ эффектов частных ЗС 11 августа 1999 г., 29 марта 2006 г. и 1 августа 2008 г. показал, что поведение параметров ионосферы во время ЗС качественно подобно. Количественные различия вариаций параметров ионосферной плазмы объясняются различным уровнем солнечной и геомагнитной активности, а также величиной фазы ЗС.

Авторы благодарны Л. Я. Емельянову, А. Ф. Кочоненко, И. Б. Склярву, С. В. Черняеву за организацию и проведение измерений на радаре НР, а также Д. А. Дзюбанову за интерес к работе.

1. Акимов Л. А., Боговский В. К., Григоренко Е. И. и др. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэрономия. — 2005. — **45**, № 4. — С. 526—551.
2. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И. и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 2002. — № 2. — С. 25—63.
3. Бурмака В. П., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я. и др. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Успехи современной радиоэлектроники. — 2007. — № 3. — С. 38—53.
4. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. — 2007. — **13**, № 6. — С. 74—86.
5. Григоренко Е. И., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в ионосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2008. — **48**, № 3. — С. 350—364.
6. Емельянов Л. Я., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. — 2009. — **15**, № 3. — С. 70—81.
7. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Моделирование и обсуждение результатов // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 1. — С. 57—64.
8. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 1. — С. 56—104.
9. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія. — 2003. — **9**, № 5/6. — С. 96—105.
10. Черногор Л. Ф. «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 1) // Нелинейный мир. — 2006. — **4**, № 12. — С. 655—697.
11. Черногор Л. Ф. «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 2) // Нелинейный мир. — 2007. — **5**, № 4. — С. 198—231.
12. Эванс Дж. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. — 1969. — **57**, № 4. — С. 139—177.
13. Buonsanto M. J., Richards P. G., Torr D. G., Sipler D. P. Ionospheric effects of the March 1990 magnetic storm: Comparison of the theory and measurement // J. Geophys. Res. — 1994. — **99A**, N 12. — P. 359—365.
14. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth — Atmosphere — Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Phys. and Radio Astron. — 2008. — **13**, N 2. — P. 120—137.
15. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. NRLM-SISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. — 2002. — **107A**, N 12. — P. 1—16.

Надійшла до редакції 18.05.09

M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor

## SOME EFFECTS IN THE GEOSPACE PLASMA DURING THE PARTIAL SOLAR ECLIPSE OF 1 AUGUST 2008 ABOVE KHARKOV. 2. CALCULATION RESULTS AND DISCUSSION

We present our theoretical calculation results for dynamic processes parameters in geospace plasma during partial (phase is about 0.42) solar eclipse of 1 August 2008. It is shown that the neutral atmosphere temperature decreased by 17—40 K in the height range from 250 to 350 km. The densities of the total plasma flux and flux due to ambipolar diffusion increased in the height range from 210 to 580 km. In the ionosphere an intensification of the neutral wind velocity took place in the height range between 210 and 410 km. The energy delivered to the electron gas decreased approximately by 12 % at heights from 210 to 290 km and the heat flux density was diminished by 9—16 % in the height range from 240 to 340 km. We compared the ionospheric plasma parameter variations during the eclipses of 11 August 1999, 31 May 2003, 3 October 2005, 29 March 2006 and 1 August 2008.