

УДК 520.16+523.31+523.9:520.86, 550.388

М. В. Ляшенко¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове.

2. Результаты расчетов и обсуждение

Надійшла до редакції 06.04.07

Проведено розрахунків параметрів динамічних процесів і теплового режиму термосфери та іоносфери, які супроводжували часткове (близько 24 %) затемнення Сонця 3 жовтня 2005 р. Показано, що затемнення викликало значне збільшення повного потоку заряджених частинок на висотах 340—410 км, зменшення температури нейтралів на 5—15 К на висотах 300—360 км, зменшення на 40—20 % енергії, яка підводиться до електронного газу, на висотах 290—340 км, зменшення на 17—13 % модуля густини потоку тепла, яке переноситься електронами, на висотах 290—340 км. Проведено також порівняння атмосферно-іоносферних ефектів затемнень Сонця 11 серпня 1999 р., 31 травня 2003 р., 3 жовтня 2005 р. і 29 березня 2006 р., які мали місце поблизу м. Харкова.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение, интерпретация и моделирование эффектов затмений в геокосмосе позволяют расширить наши знания о поведении параметров атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли во время развития нестационарных процессов в системе Земля — Солнце. Затмение Солнца (ЗС) вызывает перестройку среды к ночным условиям и качественно напоминает поведение параметров плазмы в вечерне-утренние часы [1—7, 10—13, 15—18, 20].

Целью нашей работы является моделирование вариаций динамических процессов в геокосмосе во время затмения Солнца 3 октября 2005 г. на основе интерпретации данных его наблюдений в Харькове, описанных нами в работе [7]. В

работе также представлено сравнение эффектов в геокосмической плазме над Харьковом, вызванных частными затмениями Солнца 19 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ. ИСХОДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Радар некогерентного рассеяния (НР) в Харькове позволяет получать с высокой точностью и достаточным разрешением по высоте следующие параметры геокосмической плазмы: концентрацию электронов N , температуру электронов T_e и

ионов T_i , вертикальную составляющую скорости переноса частиц V_z и ионный состав [14].

Эти параметры вместе с оценками параметров нейтральной атмосферы, полученными в рамках современных моделей термосферы, можно использовать для расчета параметров среды, непосредственно не измеряемых на радаре НР. К таким параметрам относятся: продольные составляющие тензоров теплопроводности и амбиполярной диффузии, частоты соударений заряженных и нейтральных частиц, плотности потоков частиц, энергии, подводимой к заряженным частицам и т. п.

Потоки частиц в ионосфере. Плотность полного потока ионосферной плазмы в вертикальном направлении можно вычислить, используя данные о вертикальной составляющей скорости переноса плазмы и концентрации электронов. В общем виде выражение для вертикальной составляющей скорости переноса имеет вид [6, 20]

$$V_z = (V_{d\parallel})_z + (V_{n\parallel})_z + (V_{\perp})_z, \quad (1)$$

где $(V_{d\parallel})_z$ — вертикальная составляющая скорости частиц за счет амбиполярной диффузии, которая идет в основном вдоль силовых линий геомагнитного поля; $(V_{n\parallel})_z$ — вертикальная составляющая скорости ветрового увлечения заряженных частиц; $(V_{\perp})_z$ — вертикальная составляющая скорости увлечения частиц электромагнитным дрейфом. Подставив в выражение (1) значения каждого из слагаемых, получаем

$$V_z = V_{dz} + V_{nx} \sin I \cos I \cos D - V_{ny} \sin I \cos I \sin D + V_{nz} \sin^2 I + \frac{E_x}{B} \cos I \sin D + \frac{E_y}{B} \cos I \cos D, \quad (2)$$

где

$$V_{dz} = -D_a \sin^2 I \left(\frac{1}{H_p} + \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial z} + \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} \right)$$

— скорость переноса частиц за счет амбиполярной диффузии; $D_a = kT_p / (m_i v_{in})$ — продольная составляющая тензора амбиполярной диффузии; $v_{in} = \nu_{O^+,O} + \nu_{O^+,O_2} + \nu_{O^+,N_2} + \nu_{O^+,H} + \nu_{O^+,He}$ — суммарная частота соударений ионов с нейтралами, $\nu_{O^+,O}$, ν_{O^+,O_2} , ν_{O^+,N_2} , $\nu_{O^+,H}$, $\nu_{O^+,He}$ — частоты соударений ионов кислорода в собственном газе, с атомами и молекулами кислорода, азота, водо-

рода и гелия соответственно, $T_p = T_e + T_i$ — плазменная температура, $H_p = kT_p / (mg)$ — плазменная приведенная высота, I и D — наклонение и склонение геомагнитного поля; E_x и E_y — компоненты электрического поля, B — модуль индукции магнитного поля Земли.

Плотность полного потока плазмы в вертикальном направлении вычисляется по формуле

$$\Pi_p = V_z N. \quad (3)$$

Выражение для расчета величины плотности потока заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии имеет вид

$$\Pi_d = V_{dz} N. \quad (4)$$

Скорость эквивалентного нейтрального ветра и меридиональная составляющая скорости нейтрального ветра. Величину скорости эквивалентного нейтрального ветра можно рассчитать, используя выражение (2) и сделав следующие упрощения. Принимая во внимание незначительный вклад среднеширотных электрических полей ($E_{x,y} \rightarrow 0$) в спокойных гелиогеофизических условиях и пренебрегая эффектами склонения ($D \rightarrow 0$), выражение для скорости эквивалентного нейтрального ветра запишем в виде

$$w \approx V_z - V_{dz}. \quad (5)$$

Меридиональную составляющую скорости нейтрального ветра можно рассчитать, используя следующее соотношение

$$V_{nx} \approx \frac{V_z - V_{dz}}{\sin I \cos I}. \quad (6)$$

Энергия, подводимая к электронному газу. В области F ионосферы частота столкновений электронов с нейтралами становится меньше, чем частота столкновений с ионами. Основные механизмы охлаждения электронного газа здесь — потеря тепла при столкновениях электронов с ионами, потеря энергии на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода и перенос теплоты электронным газом [16]. Имеет место перенос фотоэлектронов и связанный с этим переносом нелокальный нагрев электронного газа.

На высотах $h \leq 350$ км теплопроводностью электронного газа можно пренебречь, и уравнение баланса энергии электронов в стационарном

случае будет иметь вид [16]

$$Q = L_{ei} + L_e,$$

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2}, \quad (7)$$

$$L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} N \cdot N(O) (T_e - T_i) T_n^{-1},$$

где Q — энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях с фотоэлектронами; L_{ei} — энергия, теряемая при электрон-ионных столкновениях; L_e — энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода; $N(O)$ — концентрация атомов кислорода. Температура нейтралов T_n и концентрация $N(O)$ рассчитывалась с привлечением модели NRLMSISE-00.

Поток тепла, переносимого электронами.

Тепловой баланс электронного газа зависит от величины потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу. Тепло в плазмосфере накапливается за счет сверхтепловых электронов, убегающих из места своего образования во внешнюю ионосферу. Часть электронов теряют свою энергию в кулоновских соударениях с тепловыми электронами и ионами. Другая часть электронов попадает в магнитную силовую трубку. В этой трубке захваченные электроны термализуются в процессе многократных отражений от ее концов. Таким образом, в плазмосфере имеет место накопление тепла, которое поступает обратно в ионосферу путем переноса теплоты электронным газом [6, 16, 20].

Тепловой поток можно определить из кинетического уравнения с учетом переноса сверхтепловых электронов. Выражение для расчета величины плотности потока теплоты, поступающей из плазмосферы в вертикальном направлении, имеет вид [16, 19]:

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial z}, \quad (8)$$

где $\kappa_e = 2.08 \cdot k^2 N T_e / (m v_{ei})$ — продольная составляющая тензора теплопроводности электронного газа, k — постоянная Больцмана, m — масса электрона.

Частоту соударений электронов с ионами O^+ для расчета величины продольной составляющей тензора теплопроводности в (8) можно найти, используя выражение вида [1, 2, 9]:

$$v_{ei} \approx 5.5 \cdot 10^{-6} N T_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N^{-1/3}).$$

Температура нейтралов. Температура нейтральных частиц, совпадающая с температурой атмосферы, на радаре НР непосредственно не измеряется. Ее можно вычислить по имеющимся значениям T_e , T_i , N , $N(O)$, $N(N_2)$ и $N(O_2)$ [1, 2]. Использование такой методики справедливо в диапазоне высот 250—350 км. Для высот $z \leq 250$ км температура атмосферы примерно равна T_i , выше 350 км в расчетах необходимо учитывать теплопроводность газа. Данная методика предполагает также квазистационарность процессов в ионосфере и атмосфере.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Потоки частиц в ионосфере. На рис. 1 представлены временные вариации плотности полного потока заряженных частиц в течение затмения Солнца и контрольный день 4 октября 2005 г. В течение ЗС поток частиц направлен вниз.

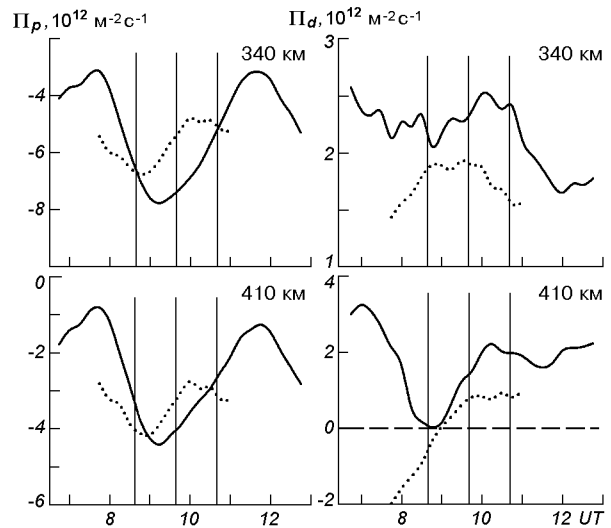


Рис. 1. Временные вариации плотности Π_p полного потока плазмы и плотности Π_d потока плазмы за счет амбиполярной диффузии на фиксированных высотах во время ЗС 3 октября (здесь и далее сплошная линия) и контрольный день 4 октября 2005 г. (здесь и далее точки). Вертикальными линиями отмечено начало, максимальная фаза и окончание ЗС

В момент максимальной фазы затмения 3 октября $|\Pi_p| \approx 7.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ и $4 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ на высотах 340 и 410 км соответственно. В контрольный день 4 октября значения модуля Π_p достигали величин $5.3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ и $3.2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ на аналогичных высотах.

На рис. 1 представлены временные зависимости плотности потока заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии. Видно, что ЗС сопровождалось существенными изменениями Π_d .

Скорость эквивалентного нейтрального ветра и меридиональная составляющая скорости нейтрального ветра. Результаты расчета w и V_{nx} на фиксированных высотах представлены на рис. 2. В момент максимального покрытия диска Солнца 3 октября и контрольный день 4 октября расчетные значения w и

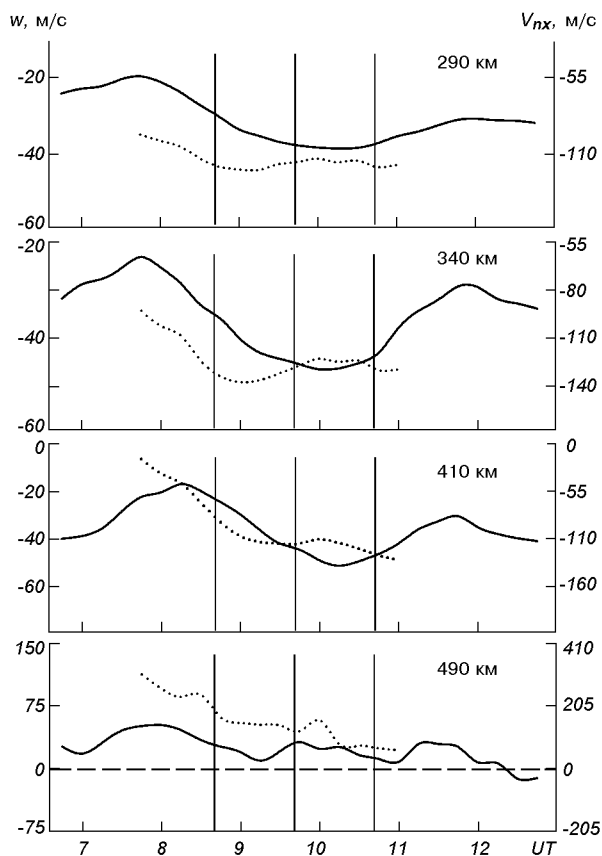


Рис. 2. Временные вариации скорости эквивалентного нейтрального ветра w и меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра V_{nx} на фиксированных высотах во время ЗС 3 октября и контрольный день 4 октября 2005 г.

V_{nx} заметно отличались. Так, на высоте 290 км во время ЗС и контрольный день w и V_{nx} составляли около -40 и -100 м/с соответственно. На высоте 490 км $w \approx 30-45$ м/с, $V_{nx} \approx 80-110$ м/с. Следует отметить, что в течение ЗС сохранялось направление нейтрального ветра от экватора к полюсу, что соответствует дневным условиям. По-видимому, кратковременное (~ 2 ч) и относительно локальное уменьшение освещенности Земли во время ЗС не сильно изменило глобальное распределение термосферных ветров.

Энергия, подводимая к электронному газу. Модельные вариации величины энергии, подводимой к электронам, представлены на рис. 3. Во время ЗС и контрольный день вариации Q/N подобны. Минимальные значения Q/N имели место около 09:00. В момент наступления максимальной фазы ЗС значения $Q/N \approx 5.9 \cdot 10^{-22}$ и $2.65 \cdot 10^{-22}$ Дж/с на высотах 290–340 км соответственно. В контрольные сутки 4 октября на этих же высотах Q/N составляла $6.6 \cdot 10^{-22}$ и $2.9 \cdot 10^{-22}$ Дж/с. Затмение вызвало уменьшение величины Q/N примерно на 40–20 % на высотах 290–340 км соответственно.

Плотность потока тепла в ионосфере. На рис. 3 представлены временные вариации плотности потока тепла Π_T , переносимого электрона-

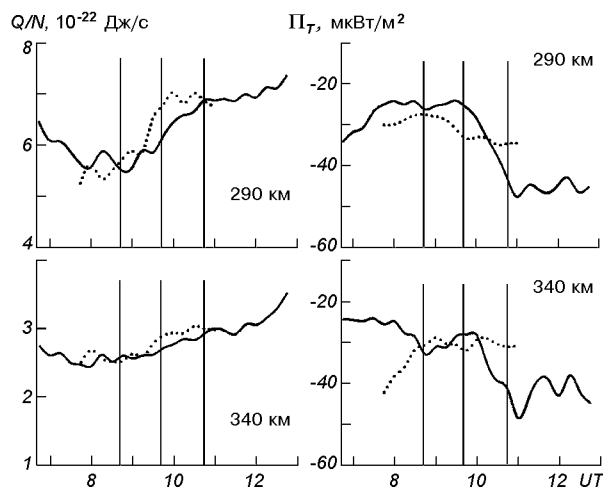


Рис. 3. Временные вариации величины энергии Q/N , подводимой к электронному газу, и плотности Π_T потока тепла во время затмения Солнца 3 октября и контрольный день 4 октября 2005 г.

ми из плазмосферы в ионосферу. Как видно, затмение привело к уменьшению величины $|\Pi_T|$ в диапазоне высот 290—340 км. В момент максимального покрытия диска Солнца 3 октября $|\Pi_T| \approx 2.5 \cdot 10^{-5} - 2.8 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² на высотах 290—340 км соответственно. В контрольный день для указанного временного интервала величина $|\Pi_T|$ составляла $3.3 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² на этих же высотах.

Температура нейтралов. На рис. 4 представлены временные вариации температуры нейтралов на фиксированных высотах во время ЗС 3 октября и контрольный день 23 сентября 2005 г. В контрольный день зависимость $T_n(t)$ не была монотонной: примерно в 09:30 наблюдался слабо возмущенный минимум (до 30 К). После 09:30 имело место увеличение T_n .

В день затмения T_n также уменьшалась после 09:00, но достигла минимальных значений в

09:50 и 09:53 на высотах 360 и 300 км соответственно, т. е. через 12 и 5 мин после момента главной фазы затмения. Уменьшение T_n составило 35 и 45 К для высот 300 и 360 км соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Температура воздуха в приземной атмосфере. Существенное уменьшение температуры воздуха в день ЗС началось после наступления главной фазы затмения. Значения t_a уменьшились на 1.0—1.4 °С или на 6—8 %. Это имело место в 10:30. В целом же эффект уменьшения t_a продолжался около 60—70 мин. Лишь через 10—20 мин после окончания затмения значения t_a достигли своих невозмущенных значений.

Уровень флуктуаций геомагнитного поля. В отличие от эффектов затмения в приземной атмосфере, эффекты в геомагнитном поле уверенно не наблюдались. С затмением, возможно, связано некоторое увеличение уровня H - и D -составляющих в интервалах времени 09:00—09:50 и 10:10—10:30. Эффект наблюдался в диапазоне периодов 20—1000 с, но сильнее был выражен в диапазоне $T = 300—1000$ с. Этот диапазон относится к диапазону внутренних гравитационных волн (ВГВ). Как известно [2, 9], ЗС обычно сопровождаются некоторым усилением волновой активности в нейтральной атмосфере и ионосфере. ВГВ модулируют плотность ионосферного тока в диапазоне высот 100—150 км, а также приводят к генерации стороннего электрического тока. Последний, в свою очередь, вызывает вариации индукции геомагнитного поля с периодами ВГВ. Наши расчеты показали, что относительные изменения концентрации электронов в ВГВ $\delta_N = 1\%$ в зависимости от состояния ионосферы могут привести к магнитному эффекту ВГВ от десятых долей до нескольких нанотесла. Примерно такие же значения наблюдались в эксперименте.

Концентрация электронов в ионосфере. Характерной особенностью дневных вариаций N в осеннее время является ее уменьшение примерно после 09:00—10:00. Поэтому уменьшение N , связанное с ЗС, маскировалось указанной особенностью. Тем не менее в зависимости $N_m(t)$ вблизи главной фазы затмения до-

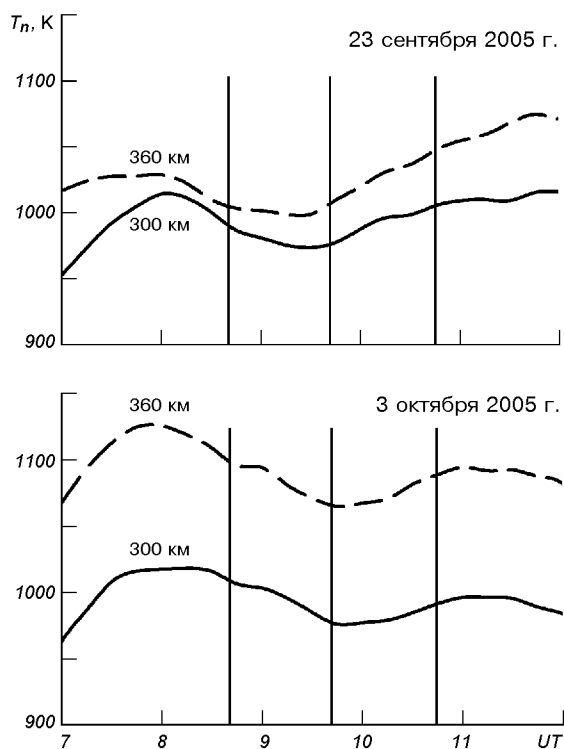


Рис. 4. Временные вариации температуры нейтралов T_n на фиксированных высотах во время ЗС 3 октября и контрольный день 23 сентября 2005 г. Скользящее усреднение на интервале 75 мин со сдвигом на 15 мин

статочно уверенно удалось выделить эффект уменьшения N_m , составляющий примерно 5–6 %. Увеличение z_m было незначительным.

С затмением Солнца, кроме того, связано замедление скорости падения N на высотах 190–250 км и ее ускорение на высотах 290–680 км.

Температуры электронов и ионов в ионосфере. Уменьшение T_e на 100–200 К в главную фазу ЗС четко выражено на высотах 400–500 км соответственно. На меньших высотах $\Delta T_e \approx 50$ –70 К. Как и следовало ожидать, временные вариации T_e практически без запаздывания повторяли изменения функции покрытия Солнца $A(t)$. Это обусловлено относительно небольшими (~ 100 с) временами становления T_e за счет теплопроводности электронов на этих высотах [2].

Затмение Солнца сопровождалось уменьшением T_i на 15–80 К на высотах 240–490 км соответственно. Эффект охлаждения ионов, в отличие от эффекта охлаждения электронов, был инерционным. Время запаздывания T_{\min} по отношению к A_{\min} составляло 25–5 мин на высотах 240–410 км соответственно. Время t_T становления T_i определяется процессом переноса тепла [2]. При этом $t_T = H\nu_{mn}/g$, где H — приведенная высота нейтральной атмосферы, ν_{mn} — частота соударений нейтралов с нейтралами, g — ускорение свободного падения. Например, при $H = 50$ км $\nu_{mn} = 0.1 \text{ с}^{-1}$ имеем $t_T \approx 8$ мин.

Затмению сопутствовало уменьшение T_n на 35–45 К на высотах 300–360 км. Важно, что время запаздывания этого эффекта по отношению к моменту главной фазы ЗС составляло 12–5 мин для указанных высот. Учитывая, что в контрольный день также имело место (хотя и несколько раньше) уменьшение T_n до 30 К, можно сделать вывод, что ЗС привело к уменьшению T_n по крайней мере на 5–15 К, или на 0.5–1.5 %.

Скорость переноса плазмы. В день ЗС на высотах 360–470 км наблюдалось увеличение модуля скорости $V_z(t)$ примерно на 20 м/с. Зависимость $V_z(t)$ практически отслеживала временные изменения $A(t)$. Наблюдаемое поведение $V_z(t)$ аналогично поведению в вечерне-утреннее время и связано с движением плазмы вниз для

частичного восполнения ионов в результате ослабления источника ионизации при ЗС.

Концентрация ионов водорода в ионосфере. Затмение Солнца вызвало увеличение на 20–10 % $N(\text{H}^+)/N$ на высотах 900–1200 км соответственно. Значения $N(\text{H}^+)$ увеличились в двое на высотах 400–800 км, в диапазоне высот 900–1200 км они уменьшились в 7–10 раз. Увеличение $N(\text{H}^+)$ является результатом усиления потока частиц из плазмосферы в ионосферу.

Волновые возмущения в ионосфере. О влиянии ЗС на волновую активность, по-видимому, свидетельствует «сбой фазы» колебания вскоре после наступления главной фазы затмения. При этом наблюдалось 1.5–2 колебания с существенно отличающимися от фоновых значений амплитудой и периодом. В соседний день, 4 октября 2005 г., подобный эффект не отмечался. Наиболее четко генерируемое волновое возмущение наблюдалось на высоте около 200 км, его период составлял 60 мин, а $\delta_N \approx 0.04$.

Причиной генерации колебательных процессов в плазме была генерация ВГВ в термосфере в результате ее охлаждения при частичном покрытии диска Солнца. И хотя уменьшение температуры атмосферы было незначительным (~ 10 К или около 1 %), это оказалось достаточным для генерации ВГВ с относительной амплитудой порядка 1 %.

Потоки частиц. В контрольный день 4 октября 2005 г. плотность полного потока плазмы Π_p из плазмосферы в ионосферу увеличивалась по величине примерно до 09:00, затем в течение одного часа она уменьшалась (рис. 1). Увеличение $|\Pi_p|$ не превышало 20–40 % на высотах 340–410 км. В день ЗС описанный процесс наложился на процесс, связанный с затмением, и $|\Pi_p|$ на тех же высотах увеличилась в 2.5–4.5 раза. Качественно Π_p изменялась так же, как и во время других ЗС [1, 2, 11].

Плотности потоков заряженных частиц Π_d за счет амбиполярной диффузии в контрольный день и день ЗС заметно отличались (рис. 1). В течение затмения значения Π_d увеличились на десятки процентов. Во время ЗС 29 марта 2006 г. значения Π_d уменьшались. Это связано с различным поведением ионосферных параметров (N , T_e , T_i и др.) в периоды затмений Солнца 2005 и 2006 гг.

Тепловые процессы в электронном газе.

Как и следовало ожидать, покрытие диска Солнца обусловило уменьшение энергии, подводимой к электронам, примерно на 40—20 % на высотах 290—340 км соответственно.

Уменьшение подводимой к электронам энергии привело к уменьшению T_e и, как следствие, — к уменьшению величины плотности потока тепла $|\Pi_T|$, переносимого электронами. При уменьшении T_e примерно на 4 % $|\Pi_T|$ уменьшилась на 17—13 % на высотах 290—340 км соответственно.

Такие же, но большие по величине, тепловые эффекты сопровождали ЗС 1999, 2003 и 2006 гг. [1, 2, 11].

Эффекты нейтральных ветров. На высотах 290—340 км составляющая скорости w вертикального переноса плазмы за счет ветрового увлечения и электромагнитного дрейфа, а также меридиональная скорость ветра V_{nx} в течение ЗС слабо отличались от своих значений в контрольный день (рис. 2). На высотах 410—490 км значения w и V_{nx} уменьшались на несколько десятков метров в секунду. Примерно такой же эффект, но больший по величине, наблюдался нами в течение ЗС 29 марта 2006 г. [11].

Сравнение атмосферно-ионосферных эффектов затмений Солнца 1999, 2003, 2005 и 2006 гг. Все ЗС были частными, A_{\max} составляло 0.73, 0.64, 0.24 и 0.77. Затмения 1999, 2005 и 2006 гг. имели место вблизи местного полудня. Затмение 2003 г. наблюдалось в утреннее время на фоне релаксирующей магнитной бури.

Наиболее удобным для сравнения эффектов затмения 2005 г. является затмение Солнца 2006 г. Они оба произошли вблизи равноденствия и минимума солнечной активности, но сильно (более чем в три раза) отличались по степени покрытия диска Солнца. При этом относительные уменьшения температуры воздуха, равные 8 и 18 %, отличались примерно в 2.2—2.3 раза. Относительные изменения концентрации электронов в максимуме слоя F_2 , составляющие 5—6 и 28—30 %, отличались в 5—6 раз. Значения ΔT_e и $\Delta T_e/T_e$ на высоте около 350 км отличались примерно в 3 и 2.3 раза соответственно. В значениях ΔT_i и $\Delta T_i/T_i$ на высотах 500—600 км различия были намного меньше (десятки процентов). Изменения $|V_z|$ составляли около

20 и 80 м/с, т. е. отличались примерно в 4 раза.

Для ЗС 2005 и 2006 гг. качественно подобными оказались и результаты моделирования процессов, сопутствовавших затмениям. Количественные характеристики, естественно, отличались.

Основным итогом проведенных экспериментальных исследований и модельных расчетов явилось доказательство того факта, что данное слабое частное ЗС ($A_{\max} \approx 0.24$) привело к регистрируемым возмущениям в атмосфере, ионосфере и, по-видимому, в магнитном поле.

Выводы

1. Показано, что на высотах 340—410 км ЗС сопровождалось существенным увеличением значений плотности полного потока плазмы из плазмосферы.

2. Установлено, что ЗС сопровождало увеличение на десятки процентов плотности потока заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии.

3. Выявлено, что ЗС на высотах 290—340 км привело к уменьшению на 40—20 % величины энергии, подводимой к электронам.

4. Показано, что величина плотности потока тепла, переносимого электронами, уменьшалась на 17—13 % на высотах 290—340 км соответственно.

5. Установлено, что ЗС сопровождалось уменьшением температуры нейтралов на 35—45 К на высотах 300—360 км. Затмение вызвало уменьшение этой температуры по крайней мере на 5—15 К.

Крупномасштабное (порядка несколько тысяч километров) уменьшение температуры газа в термосфере могло быть причиной наблюдавшихся изменений волновой активности в атмосфере и ионосфере.

6. Продемонстрировано, что на высотах 410—490 км в течение ЗС происходили существенные изменения составляющей скорости вертикального переноса плазмы за счет ветрового увлечения и электромагнитного дрейфа, а также меридиональной скорости ветра.

7. Указано, что атмосферно-ионосферные эффекты солнечных затмений 1999, 2003, 2005 и 2006 гг. в основном были качественно подобны-

ми, но различались количественно. Естественно, к различиям приводило и то, что эти затмения имели место в разных гелиогеофизических условиях (при разных уровнях солнечной и магнитной активностей, в разное время суток и т. д.).

8. Показано, что даже слабое частное ЗС способно привести к заметной перестройке физических процессов в атмосфере, ионосфере и, скорее всего, магнитном поле.

Авторы благодарят В. И. Тарана за интерес к работе, а также К. П. Гармаша и С. Г. Леуса за проведение измерений на магнитометре-флюксометре, Л. Я. Емельянова, А. Ф. Кононенко, В. Н. Лысенко, И. Б. Скларова и Ю. В. Черняка — на радаре некогерентного рассеяния.

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 аэронаука.—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 // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.—2002.—№ 2.—С. 25—63.
3. Бойтман О. Н., Калихман А. Д., Тащилин А. В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 1. Моделирование эффектов затмения // Геомагнетизм и аэронаука.—1999.—39, № 6.—С. 45—51.
4. Бойтман О. Н., Калихман А. Д., Тащилин А. В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 2. Данные наблюдений и сравнения с результатами моделирования // Геомагнетизм и аэронаука.—1999.—39, № 6.—С. 52—60.
5. Борисов Б. Б., Егоров Д. А., Егоров Н. Е. и др. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. // Геомагнетизм и аэронаука.—2000.—40, № 3.—С. 94—103.
6. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
7. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 6.—С. 74—86.
8. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники.—2005.—№ 3.—С. 4—35.
9. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967.—564 с.
10. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 348—360.
11. Григоренко Е. И., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в ионосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэронаука.—2008.—48, № 3.—С. 1—15.
12. Колоколов Л. Е., Легенька А. Д., Пулинец С. А. Ионосферные эффекты, связанные с солнечным затмением 18 марта 1988 г. // Геомагнетизм и аэронаука.—1993.—33, № 1.—С. 49—57.
13. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 361—370.
14. Таран В. И. Исследования ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронаука.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
15. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 371—375.
16. Эванс Дж. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР.—1969.—57, № 4.—С. 139—177.
17. Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., Lesyuta O. S. Effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—2002.—64, N. 18.—P. 1933—1941.
18. Stubbe P. The F-region during an eclipse — A theoretical study // J. Atmos. Terr. Phys.—1970.—32, N. 6.—P. 1109—1116.
19. Schunk R. W., Nagy A. F. Ionospheres: Physics, plasma physics, and chemistry. — Cambridge: atmospheric and space science series.—2000.—555 p.

TROPOSPHERIC-IONOSPHERIC EFFECTS OF THE 3 OCTOBER 2005 PARTIAL SOLAR ECLIPSE IN KHARKIV. 2. MODELING AND DISCUSSION

M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor

The thermal structure and dynamical processes that occurred in the thermosphere-ionosphere system during the 3 October 2005 partial (24 %) solar eclipse are modeled. The solar eclipse is shown to cause a significant increase in the plasma fluxes in the 340—410 km altitude range, respectively, a decrease of 5—15 K in the neutral temperature in the 300—360 km altitude range, a decrease of 40—20 % in the energy inputs to the electron gas in the 290—340 km altitude range, and a decrease of 17—13 % in the electron heat flow in the same 290—340 km altitude range. The effects which were observed in the thermosphere-ionosphere system near Kharkiv during the 11 August 1999, 31 May 2003, 3 October 2005, and 29 March 2006 solar eclipses are compared.