

УДК 550.388.2

## СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 1 АВГУСТА 2008 г. НАД ХАРЬКОВОМ. 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

© 2013 г. М. В. Ляшенко<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт ионосферы НАН и МОН молодёспорта Украины, г. Харьков, Украина  
e-mail: mlyashenko@ya.ru

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина  
e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 15.03.2011 г.

После доработки 17.08.2012 г.

Представлены результаты расчетов параметров тепловых и динамических процессов в околоземной плазме в период частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. Расчеты показали, что во время затмения имело место уменьшение температуры нейтралов примерно на 17–40 К в диапазоне высот 250–350 км соответственно. На высотах 210–580 км затмение привело к увеличению на десятки процентов плотности полного потока плазмы и потока частиц за счет амбиполярной диффузии. Представлены результаты сравнительного анализа эффектов в ионосферной плазме в периоды частных затмений над Харьковом 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г., 29 марта 2006 г. и 1 августа 2008 г. Отмечены общие закономерности в эффектах затмений.

DOI: 10.7868/S0016794013020090

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Затмение Солнца (ЗС) представляет собой одно из уникальных событий в геокосмосе [Акимов и др., 2005; Акимов и др., 2002; Бессараб и др., 2002; Бурмака и др., 2007а, б; Бурмака и Черногор, 2012; Григоренко и др., 2008; Дзюбанов и др., 2009; Домнин и др., 2013; Емельянов и др., 2009; Колодолов и др., 1993; Котов и др., 2009; Ляшенко и Черногор, 2008; Черногор, 2010]. Как было показано ранее, такое высокоэнергетическое явление оказывает существенное влияние на вариации параметров динамических и тепловых режимов в открытой нелинейной системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ) [Черногор, 2006, 2007; Chernogor and Rozumenko, 2008]. ЗС вызывает заметную перестройку подсистем в системе ЗАИМ и, в частности, в структуре атмосферы и ионосферы. Динамические процессы в плазме при ЗС качественно подобны процессам, которые наблюдаются при переходе от дня к ночи и наоборот, но имеют значительно отличающиеся временные и пространственные масштабы. Кроме того, вариации параметров среды, вызываемые ЗС, существенно зависят от условий наблюдения (состояния космической погоды, времени суток, фазы цикла солнечной активности и т.п.). Эффекты ЗС в ионосфере изучены хуже, чем эффекты прохождения солнечного терминатора. Последние исследуются давно и весьма успешно [Сомсиков, 1983, 1991, 1992]. Таким образом, исследование эффектов в геокосмической плазме

во время таких уникальных событий является одной из актуальных задач современной геофизики.

В части 1 настоящей статьи представлены результаты анализа пространственно-временных вариаций параметров ионосферы во время частного ЗС 1 августа 2008 г., полученных на радаре некогерентного рассеяния (НР) в Харькове [Домнин и др., 2013].

В части 2 представлены результаты исследования волновых возмущений в ионосферной плазме, сопутствовавших частному ЗС 1 августа 2008 г. [Бурмака и Черногор, 2013].

Целью настоящей статьи, которая представляет собой 3-ю часть работы, является проведение теоретических расчетов параметров среды, непосредственно не измеряемых при помощи радара НР параметров динамических, тепловых процессов в геокосмической плазме во время частного ЗС 1 августа 2008 г., анализ результатов расчетов, а также обсуждение результатов, представленных в частях 1 и 2 настоящей работы.

### 2. ИСХОДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Процессы переноса заряженных частиц и энергии в геокосмической плазме играют определяющую роль в формировании высотной структуры  $F$ -области ионосферы на высотах главного максимума и выше. В настоящей работе выполнены расчеты основных параметров динамических и тепловых процессов в ионосфере во время ЗС 1

августа 2008 г. В качестве контрольных суток выбрана дата 2 августа 2008 г.

Теоретические соотношения, используемые в данной работе, такие же, как и в работах [Акимов и др., 2002; Акимов и др., 2005; Бурмака и др., 2007а; Ляшенко и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008]. В качестве исходных использовались параметры ионосферы ( $N$ ,  $T_e$ ,  $T_i$  и  $V_z$ ), полученные на харьковском радаре НР. Расчет параметров нейтральной атмосферы выполнен с помощью эмпирической атмосферной модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002].

### 2.1. Температура нейтральных частиц

Для расчета температуры нейтральных частиц  $T_n$  в диапазоне высот 250–350 км использовалась методика, основанная на уравнении теплового баланса ионного газа [Бэнкс, 1969; Эванс, 1969]. На высотах  $z > 350$  км данная методика неприменима из-за необходимости учета теплопроводности газа, а при  $z < 250$  км необходимо учитывать потери тепла при соударениях электронов с нейтральными частицами.

При сохранении условия квазистационарности в плазме 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 [Бэнкс, 1969]

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

где  $T_e$  и  $T_i$  – температуры электронов и ионов соответственно,  $N$ ,  $N(N_2)$ ,  $N(O_2)$  и  $N(O)$  – концентрации электронов, молекулярного азота и кислорода, атомарного кислорода соответственно.

### 2.2. Коэффициент амбиполярной диффузии

Хорошо известно, что в общем случае концентрацию электронов определяют три процесса: ионизация, рекомбинация и диффузия. На рассматриваемой высоте, либо фотохимия, либо диффузия является доминирующим процессом, который и контролирует распределение заряженных частиц. Действительно, для  $z > 150$ –180 км скорость ионизации падает с высотой пропорционально уменьшению концентрации нейтральных частиц. В то же время скорость диффузии увеличивается с уменьшением плотности атмосферы и, следовательно, на больших высотах процессы переноса играют значительную роль в формировании высотного профиля заряженных частиц.

Плазма диффундирует через нейтральную атмосферу. В общем случае, процесс диффузии описывается тензором. В настоящей работе ограничимся рассмотрением диффузии вдоль магнитных силовых линий. Соответствующая компонента тензора дается соотношением [Schunk and Nagy, 2000]:

$$D_a = \frac{kT_p}{m_i v_{in}},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_p = T_e + T_i$  – плазменная температура,  $m_i$  – масса иона  $O^+$ ,  $v_{in}$  – суммарная частота соударений ионов с нейтрами. Выражение для  $v_{in}$  диапазоне высот  $z = 240$ –340 км имеет вид [Фаткуллин и др., 1981]

$$v_{in} = v_{O^+,O} + v_{O^+,O_2} + v_{O^+,N_2} + v_{O^+,H} + v_{O^+,He}, \quad (2)$$

где  $v_{O^+,O}$ ,  $v_{O^+,O_2}$ ,  $v_{O^+,N_2}$ ,  $v_{O^+,H}$ ,  $v_{O^+,He}$  – частоты соударений ионов кислорода в собственном газе, с атомами и молекулами кислорода, азота, водорода и гелия соответственно. Каждое из слагаемых в выражении (2) можно рассчитать по следующим соотношениям [Фаткуллин и др., 1981]:

$$v_{O^+,O} = 1.86 \cdot 10^{-9} N(O_2) \left( \frac{T_i + T_n}{2000} \right)^{0.37};$$

$$v_{O^+,O_2} = N(O) \cdot 10^{-9},$$

$$v_{O^+,N_2} = 1.08 \cdot 10^{-9} N(N_2), \quad v_{O^+,H} = 2.19 \cdot 10^{-9} N(H),$$

$$v_{O^+,He} = 0.88 \cdot 10^{-9} N(He),$$

где  $N(H)$  и  $N(He)$  – концентрации атомарного водорода и гелия соответственно.

### 2.3. Коэффициент теплопроводности

При наличии разности температур в ионизированной среде от слоя с более высокой температурой к слою с более низкой температурой возникает тепловой поток. В ионосферной плазме выражение для коэффициента теплопроводности электронов имеет вид [Schunk and Nagy, 2000]

$$\kappa_e = 2.08 k^2 N T_e / m v_{ei},$$

где  $m$  – масса электрона. Частоту соударений электронов с ионами в системе СИ можно рассчитать, используя следующее выражение [Schunk and Nagy, 2000]

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

#### 2.4. Плазменная приведенная высота

Для расчета плазменной приведенной высоты воспользуемся следующим выражением [Schunk and Nagy, 2000]

$$H_p = \frac{kT_p}{m_i g},$$

где  $g$  – модуль ускорения свободного падения на соответствующей высоте.

#### 2.5. Скорость переноса заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии

Для расчета скорости переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии воспользуемся соотношением из работы [Schunk and Nagy, 2000]:

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

где  $I$  – наклонение геомагнитного поля (для Харькова  $I = 66.4^\circ$ ).

#### 2.6. Плотность потоков плазмы

Выражения для расчета плотностей потока плазмы в вертикальном направлении и потока частиц за счет амбиполярной диффузии имеют вид:

$$\Pi_p = V_z N,$$

$$\Pi_d = V_d N,$$

где  $V_z$  – вертикальная составляющая скорости движения плазмы, измеряемая на радаре НР.

#### 2.7. Величина энергии, подводимой к электронам

В области  $F$  ионосферы  $v_{en}$  становится меньше, чем  $v_{ei}$ , и основными механизмами охлаждения электронов являются потеря тепла при их столкновениях с ионами, возбуждение тонкой структуры атомов кислорода и теплопроводность электронного газа. В общем случае имеет место перенос фотоэлектронов и связанный с ним нелокальный нагрев электронного газа [Schunk and Nagy, 2000].

На высотах  $z < 350$  км теплопроводностью электронного газа можно пренебречь и уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае в системе СИ имеет вид [Schunk and Nagy, 2000]:

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

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

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

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.

#### 2.8. Плотность потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу

Тепловой баланс электронного газа зависит от величины плотности 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 теряет свою энергию в кулоновских соударениях с тепловыми электронами и ионами. Другая часть электронов попадает в магнитную силовую трубку. В силовой магнитной трубке происходят многократные отражения электронов от ее концов, за счет чего захваченные электроны разогреваются. Таким образом, в плазмосфере имеет место накопление тепла, которое поступает обратно в ионосферу в результате высокой теплопроводности электронного газа [Брюнелли и Намгаладзе, 1988].

Плотность теплового потока вычисляется из следующего соотношения [Schunk and Nagy, 2000]:

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial z}.$$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

#### 3.1. Температура нейтралов

На рисунке 1 представлены результаты расчета по соотношению (1) температуры нейтралов во время ЗС 1 августа 2008 г.

Как видно из рис. 1, во время ЗС имело место уменьшение  $T_n$  на 17, 17, 29, 32 и 40 К на высотах 250, 270, 300, 320 и 350 км соответственно. Время запаздывания эффекта в вариациях  $T_n$  по отношению к моменту наступления главной фазы ЗС составило ~32, 23, 18 и 0 мин для рассматриваемых высот.

#### 3.2. Частоты соударений заряженных и нейтральных частиц

В диапазоне высот 240–340 км в момент максимального покрытия диска Солнца уменьшение частоты соударений электронов с ионами составило примерно ~20–30%. Временной ход  $v_{ei}$  день затмения качественно и количественно отличается от суточных вариаций частоты соударений 2 августа 2008 г. Такие различия вызваны эффектами ЗС 1 августа 2008 г.

**Рис. 1.** Временные вариации температуры нейтралов (расчет) во время ЗС 1 августа 2008 г. Штрихами показаны ожидаемые значения  $T_n$  в отсутствие затмения.

### 3.3. Продольные составляющие тензоров амбиполярной диффузии и теплопроводности

Как показали расчеты, в момент наступления главной фазы ЗС должно иметь место уменьшение на 7–18% величины продольной составляющей тензора  $D_a$  в диапазоне высот 240–340 км.

В момент максимального покрытия диска Солнца имело место незначительное (на 10–20%) уменьшение значений  $\kappa_e$  диапазоне высот 240–340 км.

### 3.4. Плазменная приведенная высота

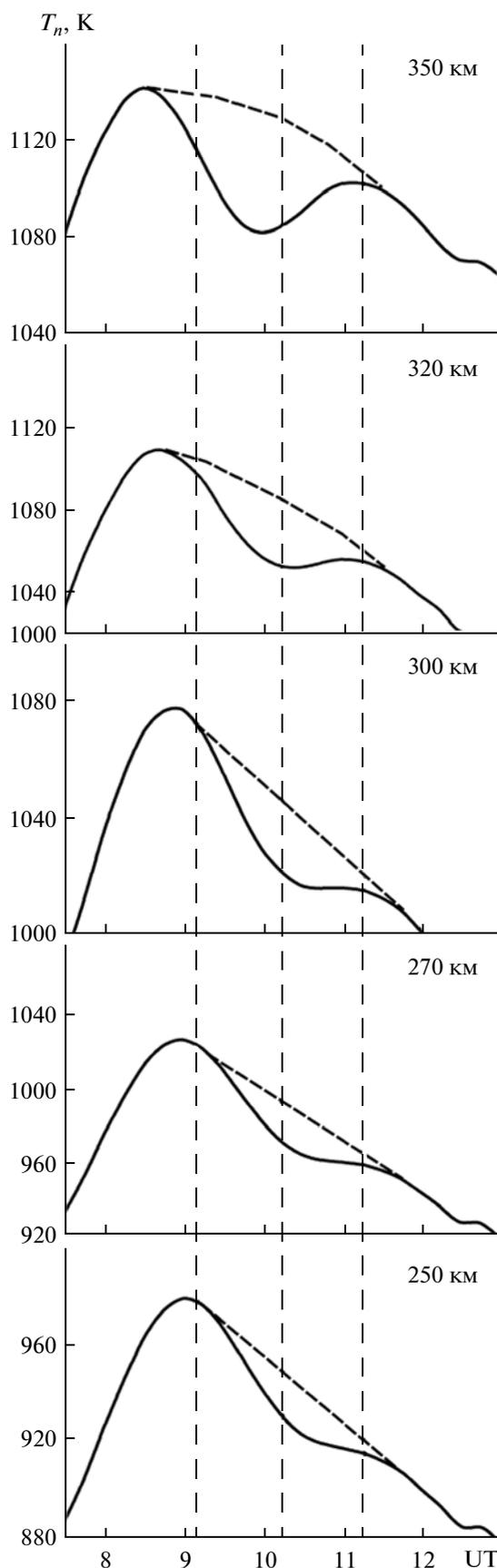
ЗС привело к уменьшению плазменной приведенной высоты  $H_p$  на ~6–7 км. Такое поведение  $H_p$  связано с охлаждением ионосферной плазмы ( $H_p \propto T_p$ ), которое имело место во время ЗС.

### 3.5. Поток заряженных частиц

Временные вариации плотностей полного потока плазмы  $\Pi_p$  и потока частиц за счет амбиполярной диффузии  $\Pi_d$  во время ЗС 1 августа 2008 г. и контрольный день 2 августа 2008 г. представлены на рисунках 2 и 3. Из рисунка 2 видно, что во время ЗС имело место увеличение по модулю  $\Pi_p$  в диапазоне высот 210–580 км. В момент главной фазы ЗС значения плотности полного потока достигали  $1.5 \cdot 10^{12}$ ;  $2 \cdot 10^{12}$ ;  $5 \cdot 10^{12}$  и  $10^{13} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$  на высотах 210, 290, 410 и 580 км соответственно. В контрольный день 2 августа 2008 г. на высоте 410 км в течение всего времени наблюдения имел место поток частиц, направленный вниз в ионосферу. 1 августа 2008 г. до начала затмения поток частиц был направлен вверх, после наступления ЗС наблюдалось изменение направления движения плазмы вниз. Обратная ситуация имела место на высоте 580 км. В контрольные сутки поток частиц был направлен вверх в течение всего времени наблюдения. В день затмения также происходило изменение направления переноса заряженных частиц. Таким образом, во время ЗС имело место либо увеличение по модулю плотности потока частиц, направленного в ионосферу, либо смена знака и тем самым направления движения плазмы на высотах 410 и 580 км.

### 3.6. Передача энергии к электронам и потоки тепла из плазмосферы

Вариации величины энергии, подводимой к электронам  $Q/N$ , в период затмения и контрольный день имели сложный характер. По этой причине выявить эффекты ЗС в вариациях  $Q/N$  в диа-



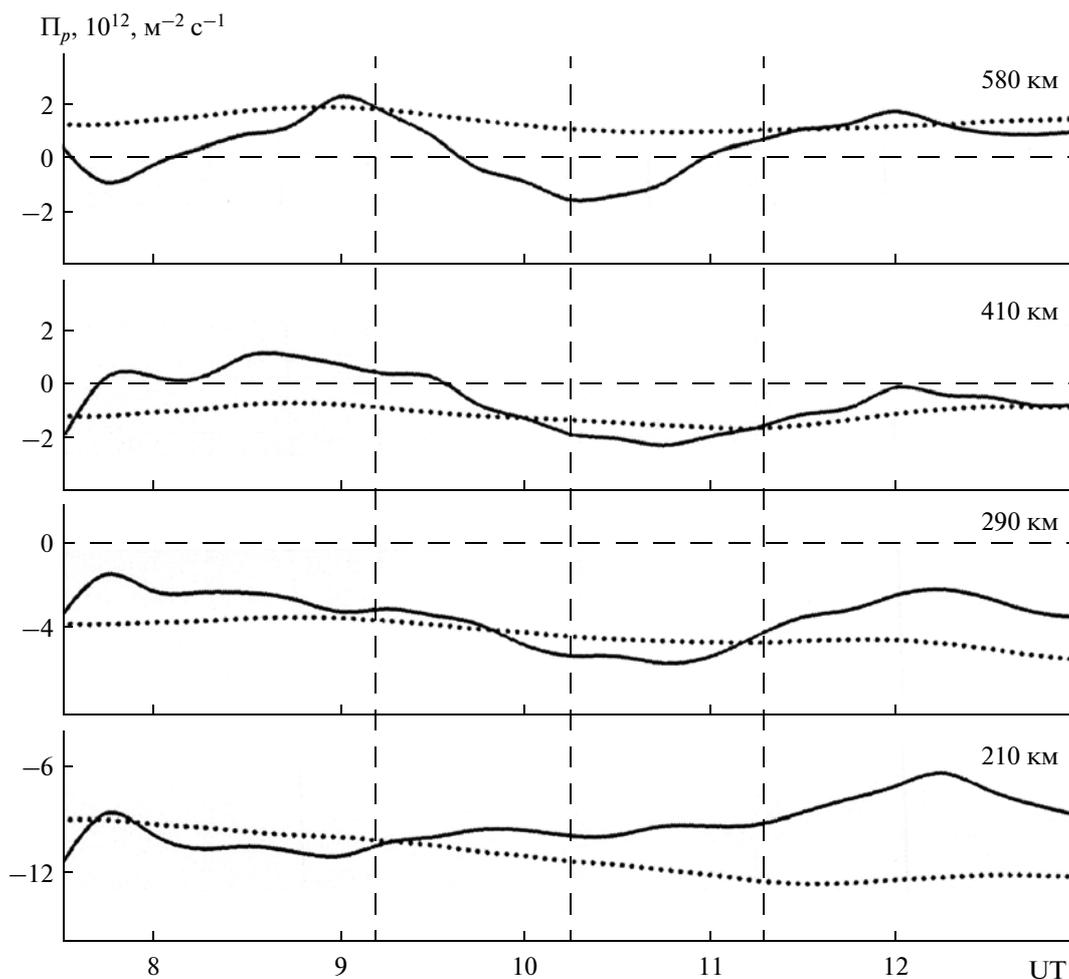


Рис. 2. Временные вариации плотности полного потока плазмы  $P_p$  во время ЗС 1 августа 2008 г. (сплошная) и контрольные сутки 2 августа 2008 г. (точки).

пазоне высот 210–290 км оказалось довольно трудно. В момент главной фазы ЗС уменьшение  $Q/N$  составило не более 12%, что сравнимо с погрешностью определения этой величины.

Подобная ситуация наблюдалась и в вариациях плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу в диапазоне высот 240–340 км. Следовало ожидать, что ЗС приведет к уменьшению величины  $P_T$ . Однако, фоновые вариации  $P_T$  по-видимому, маскировали эффекты затмения. Расчеты показали, что уменьшение величины  $P_T$  в главную фазу ЗС составило всего 9–16% в диапазоне высот 240–340 км.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

##### 4.1. Концентрация электронов

Как известно, в околополуденные часы концентрация в максимуме области  $F$  ионосферы  $N_m$  достигает своих максимальных значений. ЗС 1 августа 2008 г. имело место как раз в указанное вре-

мя. В момент главной фазы затмения отмечено уменьшение  $N_m$  на ~32%. Это значение очень близко к расчетному значению, равному 31% [Черногор, 2010]. Уменьшение концентрации  $N_m$  связано, в первую очередь, с падением потока ионизирующего ультрафиолетового излучения Солнца. Наибольшее уменьшение концентрации электронов имело место в нижней части области  $F$  ионосферы. На больших высотах уменьшение концентрации электронов частично компенсируется за счет потоков заряженных частиц из плазмосферы в ионосферу. Этот факт подтверждается расчетами в данной работе и полученными ранее результатами [Акимов и др., 2002; Акимов и др., 2005; Бурмака и др., 2007а; Емельянов и др., 2009; Ляшенко и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008].

Данное затмение имело место вблизи глубокого минимума солнечной активности. Это наложило отпечаток на реакцию среды, вызванную ЗС. Например, высота максимума ионизации в

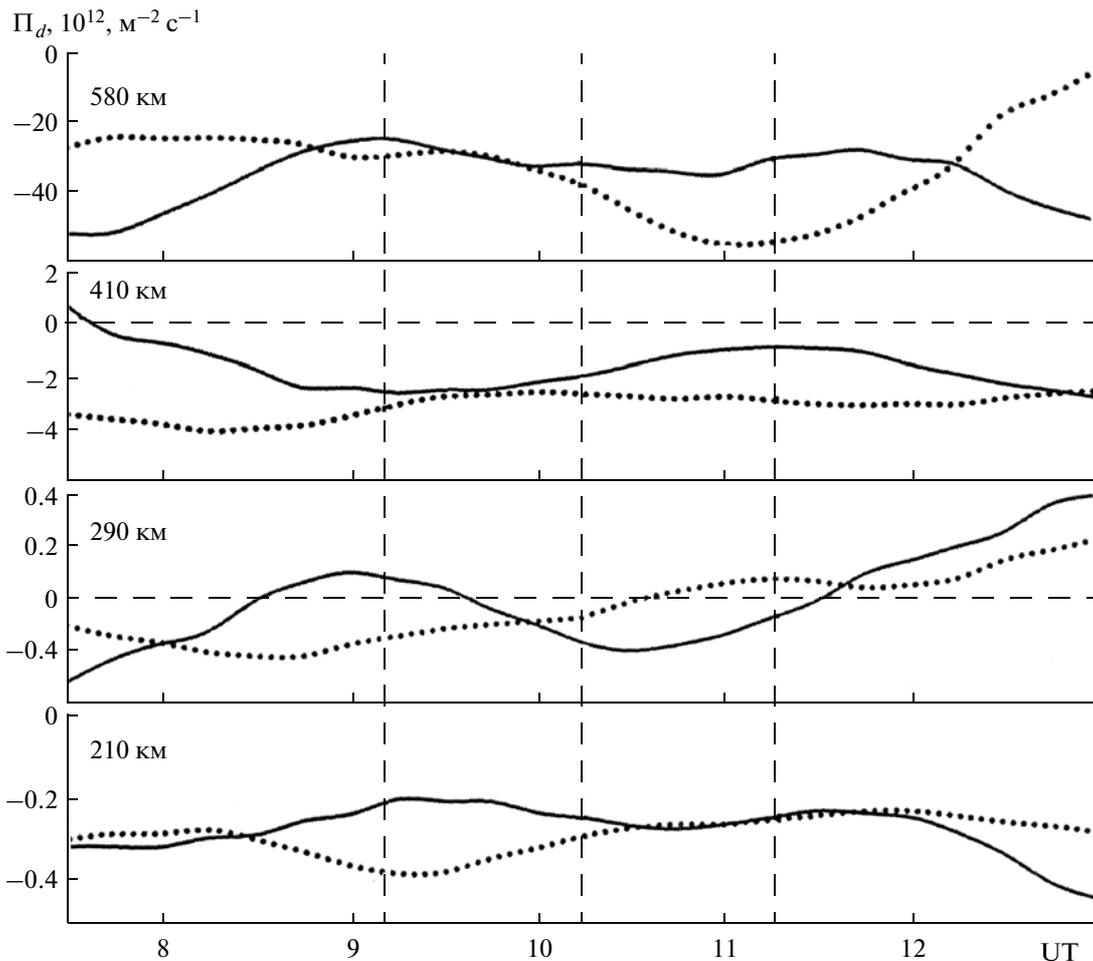


Рис. 3. Временные вариации потока частиц за счет амбиполярной диффузии  $\Pi_d$  во время ЗС 1 августа 2008 г. (сплошная) и контрольные сутки 2 августа 2008 г. (точки).

дневное время не превышала 200 км, а концентрация электронов  $N = 2.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  [Емельянов и др., 2009]. Это означает, что максимум ионизации формировался преимущественно под действием химических, а не динамических, процессов. В результате относительные изменения,  $N$  во время частного ЗС в период минимума солнечной активности были практически такими же, как и при полном ЗС вблизи фазы максимальной солнечной активности, когда динамические процессы были ярко выраженными. По данным работы [Бессараб и др., 2002] в период полного ЗС  $|\Delta N/N| \approx 0.28$ . В настоящих измерениях  $|\Delta N/N| \approx 0.32$ , хотя площадь затененной части диска Солнца не превышала 0.31.

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 [Домнин и др., 2012]. ЗС привело к смещению профиля  $N(z)$ , соответствующему постепенному переходу к

ночным условиям. В работах [Акимов и др., 2002, 2005; Бурмака и др., 2007а; Ляшенко и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008] также отмечалось подобное поведение высотного профиля  $N$ .

Эффекты ЗС в вариациях высоты максимума области  $F$  ионосферы  $z_m$  проявились слабо. Небольшие эффекты затмения маскировались фоновыми флуктуациями высоты  $z_m$ .

#### 4.2. Температура электронов и ионов

Эффекты затмения хорошо заметны в вариациях  $T_e$  и  $T_i$ . Во время ЗС 1 августа 2008 г. наблюдалось уменьшение  $T_e$  на  $\sim 70$ – $180$  К в диапазоне высот 190–490 км. Такое поведение  $T_e$  во время ЗС связано с уменьшением интенсивности ионизирующего солнечного излучения и уменьшением числа фотоэлектронов, образующихся в  $F$ -области ионосферы [Акимов и др., 2002, 2005]. Во время ЗС 1 августа 2008 г. минимум в вариациях  $T_e$  запаздывал по отношению к моменту наступле-

ния главной фазы затмения на  $\sim 35$ – $15$  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  $T_e$  [Акимов и др., 2002, 2005; Бурмака и др., 2007а; Ляшенко и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008]. 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.

Температура ионов  $T_i$  во время ЗС уменьшилась на  $\sim 60$ – $140$  К в диапазоне высот  $190$ – $490$  км. Максимальное уменьшение  $T_i$  наблюдалось с запаздыванием на  $\sim 80$ – $35$  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  $T_i(z)$  в сторону меньших значений, что указывает на перестройку теплового режима ионосферы в широком диапазоне высот и постепенному переходу к ночным условиям, а затем снова к дневным [Домнин и др., 2012].

#### 4.3. Скорость переноса заряженных частиц

Эффекты ЗС 1 августа 2008 г. заметно проявились в вариациях вертикальной составляющей скорости переноса плазмы: имело место уменьшение  $V_z$  на  $\sim 10$ – $55$  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, запасы в дневное время в плазмосфере, посредством диффузии переносятся вниз в ионосферу, тем самым, компенсируя рекомбинационные потери на высотах области  $F$  ионосферы. В течение ЗС 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, а затем возврат к дневным. 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 [Дзюбанов и др., 2009; Домнин и др., 2012].

#### 4.4. Вариации концентрации ионов водорода

Во время ЗС увеличение относительной концентрации ионов водорода  $N(\text{H}^+)/N$  было обусловлено притоком ионов из плазмосферы подобно тому, как это имеет место в ночных условиях. Такое увеличение  $N(\text{H}^+)/N$  наблюдалось ранее по данным радара НР во время частных ЗС 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г. над Харьковом [Акимов и др., 2002, 2005; Бурмака и др., 2007а; Ляшенко и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008].

Во время затмения 1 августа 2008 г. имело место несовпадение моментов начала роста и уменьшения  $N(\text{H}^+)/N$  на разных высотах, что не столь отчетливо выражено для ранее наблюдаемых ЗС. Такое поведение  $N(\text{H}^+)/N$  отчасти может быть объяснено тем, что в верхней части ионосферы ЗС начиналось раньше, чем на малых высотах, а заканчивалось – позже. В этом случае охлаждение плазмы, и, как следствие, приток ионов водорода из плазмосферы, обнаруживалось сначала на больших высотах. Для ЗС 1 августа 2008 г. отмеченный эффект, скорее всего, усиливался благодаря тому, что лунная тень приближалась к месту наблюдения с севера. В этом случае основания трубок геомагнитного поля, проходящих над местом наблюдения на небольших высотах, еще не находились в области затмения. В то же время лунная тень уже накрывала основания трубок геомагнитного поля, берущих начало севернее, и, как следствие, проходящих над местом наблюдения на больших высотах. Плазма в этих трубках начинала охлаждаться еще до начала ЗС непосредственно над местом наблюдения. Это приводило к уменьшению давления плазмы в магнитной трубке и появлению нисходящего потока ионов водорода из плазмосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля. Вследствие этого, вероятно, и возникало опережение роста  $N(\text{H}^+)/N$  на больших высотах по сравнению с меньшими [Котов и др., 2009].

Вариации абсолютных значений  $N(\text{H}^+)$ , полученных умножением  $N$  на величину относительного содержания ионов водорода  $N(\text{H}^+)/N$ , могут быть объяснены при рассмотрении поведения каждого из этих параметров. Так, в главную фазу ЗС на высотах  $z \leq 490$  км сравнительно большое уменьшение значений  $N$  происходило при практически неизменном отношении  $N(\text{H}^+)/N$ . Как результат, на данных высотах произошло отмеченное выше уменьшение  $N(\text{H}^+)$ . На больших высотах, напротив, при более существенном росте  $N(\text{H}^+)/N$  концентрация электронов уменьшалась не так сильно. Вследствие этого снижение концентрации ионов водорода для высот  $z > 560$  км не отмечалось [Котов и др., 2009].

Краткие сведения о частных солнечных затмениях над Харьковом и данные о солнечной и геомагнитной активности в периоды ЗС

Дата	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 г.	09:57:32	11:15:40	12:29:27	0.746	0.794	131	158	6
31.05.03 г.	02:16:08	03:14:34	04:17:27	0.658	0.740	113	125	49
03.10.05 г.	08:41:40	09:41:57	10:42:34	0.153	0.263	74	79	7
29.03.06 г.	10:02:47	11:12:59	12:21:59	0.724	0.774	82	78	6
01.08.08 г.	09:11:28	10:15:41	11:17:47	0.310	0.439	66	66	3

Отклик в поведении ионного состава во внешней ионосфере на ЗС 1 августа 2008 г. был качественно подобен вариациям, наблюдавшимся во время затмений 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г. [Акимов и др., 2002, 2005; Бурмака и др., 2007а; Ляшенко и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008]. Количественные отличия можно объяснить тем, что эти ЗС имели место на разных фазах 23-го цикла солнечной активности, а также различной величиной покрытия диска Солнца и направлением движения лунной тени.

#### 4.5. Температура нейтралов

Уменьшение температуры  $T_n$  связано с уменьшением освещенности атмосферы и эффективности солнечного нагрева. Как видно из рис. 1, во время ЗС с ростом высоты уменьшение  $T_n$  возрастало и отслеживало вариации  $T_i$ . Запаздывание по времени реакции  $T_n$  относительно момента главной фазы затмения, наоборот, с ростом высоты уменьшалось. Подобная картина наблюдалась и в вариациях  $T_i$ . Такое временное запаздывание можно объяснить увеличением роли теплопроводности нейтрального и ионного газов 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 [Акимов и др., 2002, 2005; Ляшенко и Черногор, 2008]. Уменьшение  $\Delta T_n \approx 17\text{--}40$  К также является правдоподобным. При полном затмении оно увеличилось бы в  $\sim 3$  раза и достигало бы 50–120 К. Такое значение  $\Delta T_n$  хорошо соответствует результатам моделирования, выполненного в работе [Бессараб и др., 2002]. В этой работе  $\Delta T_n \approx 100$  К.

#### 4.6. Поток заряженных частиц в ионосфере

Поведение  $V_z$ , а следовательно, и плотностей потоков заряженных частиц свидетельствует о том, что во время ЗС происходило увеличение по модулю значений  $P_p$  и  $P_d$  в широком диапазоне высот. Это означает, что влияние ЗС было равноценно наступлению кратковременной ночи. Ре-

зультаты расчетов  $P_p$  и  $P_d$  в течение ЗС 1 августа 2008 г. согласуются с результатами моделирования, выполненного в работах [Акимов и др., 2002, 2005; Бурмака и др., 2007а; Ляшенко и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008] во время других ЗС.

#### 4.7. Тепловые процессы в геокосмосе

Наряду с процессами переноса заряженных частиц, эффекты ЗС были заметны в вариациях потоков тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, а также изменениях величины энергии, подводимой к электронному газу. Такие эффекты в геокосмосе были обнаружены во время ряда ЗС, наблюдаемых с помощью радара НР в Харькове [Акимов и др., 2002, 2005; Бурмака и др., 2007а; Ляшенко и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008]. Во время ЗС 1 августа 2008 г. эффекты в вариациях  $P_T$  и  $Q/N$  были малозаметны.

Причиной чего может быть то, что наблюдаемое затмение было частным с довольно малым (31%) покрытием диска Солнца. Кроме того, ЗС 1 августа 2008 г. имело место в течение глубокого минимума солнечной активности.

#### 4.8. Сравнение эффектов различных ЗС

В работах [Акимов и др., 2002, 2005; Бурмака и др., 2007а; Ляшенко и Черногор, 2008; Григоренко и др., 2008] 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 представлены основные характеристики частных ЗС над Харьковом в 1999–2008 гг., а именно: время начала, главной фазы и конца ЗС, значения функции покрытия солнечного диска по площади ( $A$ ) и диаметру ( $D/D_0$ ). Также приведены сведения о солнечной и геомагнитной активности во время солнечных затмений. Из таблицы видно, что наиболее подходящими для сравнения являются ЗС 11 августа 1999 г., 29 марта 2006 г. и 1 августа 2008 г. Перечисленные затмения имели место примерно в одно и то же время (око-

лополуденное и вскоре после него). Геомагнитная обстановка во время этих затмений была спокойной. ЗС 1999 г. и 2006 г. были близки по величине фазы затмения. Однако, ЗС 11 августа 1999 г. имело место в период максимума солнечной активности, а затмение 29 марта 2006 г. – в период ее минимума.

Рассмотрим вариации параметров максимума области  $F$  ионосферы во время этих ЗС. Концентрация электронов  $Nm$  уменьшилась 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  $N$ . Затмение 11 августа 1999 г. привело к уменьшению  $N$  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 ~32% в диапазоне высот 190–210 км и ~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 ~150–300 и 70–180 К соответственно.

Во время ЗС 11 августа 1999 г. температура ионов уменьшилась на ~100–600 К на высотах 350–700 км соответственно, 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 были более заметны в диапазоне высот 240–680 км.

Эффекты рассматриваемых ЗС в вариациях относительной концентрации ионов водорода качественно и количественно подобны. Так, во время затмений в 1999, 2006 и 2008 гг. наблюдалось увеличение  $N(H^+)/N$  на ~5–30% в диапазоне высот 500–900 км.

Все затмения привели к заметной перестройке динамического режима ионосферной плазмы. Во время ЗС имело место увеличение плотности потока заряженных частиц, направленного в ионосферу, что качественно напоминало перестройку среды к ночным условиям.

Во время ЗС в 1999 и 2006 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 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 с величиной

фазы самого затмения и незначительными (4–8%) изменениями  $T_e$  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 наблюдалось уменьшение модуля  $\Pi_T$  в момент максимального покрытия диска Солнца. Во время затмений 11 августа 1999 г. и 29 марта 2006 г.  $\Pi_T$  уменьшилась в ~2.5 раза и 1.5 раза соответственно. Для ЗС 1 августа 2008 г. уменьшение (по модулю)  $\Pi_T$  вблизи главной фазы составило ~9–16% в диапазоне высот 240–340 км.

Сравнительный анализ показал, что наблюдалось качественное подобие эффектов ЗС в вариациях параметров ионосферы и атмосферы. Подтверждено, что затмения существенно влияют на динамический и тепловой режим плазмы, а также спектральный состав волновых возмущений. Количественные различия в вариациях параметров ионосферы и динамических процессов, в большей степени, могут быть объяснены различным уровнем солнечной активности, состоянием космической погоды, а также величиной фазы ЗС.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Подтверждено, что реакция ионосферы на затмение носит индивидуальный характер. Она зависит от фазы цикла солнечной активности, состояния космической погоды, времени суток и т.д. Особенностью ЗС 1 августа 2008 г. было то, что оно происходило в период глубокого минимума солнечной активности. Значения  $Nm$  в околополуденные часы не превышали  $2.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , а высота максимума слоя  $F2$  равнялась ~200 км. Процессы переноса были ослаблены. Из-за этих факторов реакция на ЗС была выражена сравнительно слабо.

2. Продемонстрировано, что в течение частного ЗС заметно изменялись тепловые и динамические процессы в ионосфере. Вариации соответствующих параметров среды не превышали несколько десятков процентов.

3. Сравнительный анализ откликов ионосферы на пять ЗС позволил уточнить общие закономерности в эффектах солнечных затмений. Все ЗС сопровождалось уменьшением  $N$  на несколько десятков процентов,  $T_e$  – на сотни кельвинов, а  $T_i$  и  $T_n$  – на ~10–100 К. Значения  $N(H^+)/N$  увеличивались на 15–30%. Наблюдались значительные изменения модуля и направления скорости движения ионосферной плазмы. В течение всех ЗС заметно изменялся спектральный состав волновых возмущений.

4. Результаты измерений хорошо соответствуют результатам наших расчетов и результатам моделирования других исследователей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Акимов Л.А., Боговский В.К., Григоренко Е.И., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 45. № 4. С. 526–551. 2005.
- *Акимов Л.А., Григоренко Е.И., Таран В.И., Тырнов О.Ф., Черногор Л.Ф.* Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Успехи соврем. радиоэлектроники. № 2. С. 25–63. 2002.
- *Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Нацвалаян Н.С.* Численное моделирование эффектов солнечного затмения 11 августа 1999 года во внешней ионосфере // Космич. исслед. Т. 45. № 2. С. 114–121. 2002.
- *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 528 с. 1988.
- *Бурмака В.П., Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф.* Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Успехи соврем. радиоэлектроники. № 3. С. 38–53. 2007а.
- *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. Т. 13. № 6. С. 74–86. 2007б.
- *Бурмака В.П., Черногор Л.Ф.* Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 2. Результаты наблюдений волновых возмущений в ионосфере // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 53. № 4. С. .... 2013.
- *Бэнкс П.М.* Тепловая структура ионосферы // ТИИЭР. Т. 57. № 3. С. 6–30. 1969.
- *Григоренко Е.И., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф.* Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 48. № 3. С. 350–364. 2008.
- *Дзюбанов Д.А., Емельянов Л.Я., Черногор Л.Ф.* Динамика плазмы ионосферы над Харьковом в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. // Космічна наука і технологія. Т. 15. № 3. С. 62–69. 2009.
- *Домнин И.Ф., Емельянов Л.Я., Котов Д.В., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф.* Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений методом некогерентного рассеяния // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 53. № 1. С. 119–129. 2013.
- *Емельянов Л.Я., Складов И.Б., Черногор Л.Ф.* Отклик ионосферы на солнечное затмение 1 августа 2008 г.: результаты вертикального зондирования // Космічна наука і технологія. Т. 15. № 4. С. 12–21. 2009.
- *Колоколов Л.Е., Легенька А.Д., Пулинец С.А.* Ионосферные эффекты, связанные с солнечным затмением 18 марта 1988 г. // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 33. № 1. С. 49–57. 1993.
- *Котов Д.В., Пуляев В.А., Черногор Л.Ф.* Временные вариации ионного состава во внешней ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. // Космічна наука і технологія. Т. 15. № 5. С. 34–42. 2009.
- *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. Т. 14. № 1. С. 57–64. 2008.
- *Сомсиков В.М.* Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука, 192 с. 1983.
- *Сомсиков В.М.* Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 31. № 1. С. 1–12. 1991.
- *Сомсиков В.М.* О генерации турбулентности атмосферы солнечным терминатором // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 32. № 3. С. 55–59. 1992.
- *Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К., Легенька А.Д., Соболева Т.Н.* Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. М.: Наука, 256 с. 1981.
- *Черногор Л.Ф.* “Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера” как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 1) // Нелинейный мир. Т. 4. № 12. С. 655–697. 2006.
- *Черногор Л.Ф.* “Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера” как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 2) // Нелинейный мир. Т. 5. № 4. С. 198–231. 2007.
- *Черногор Л.Ф.* Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 50. № 3. С. 361–376. 2010.
- *Эванс Дж.* Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. Т. 57. № 4. С. 139–177. 1969.
- *Chernogor L.F., Rozumenko V.T.* Earth–Atmosphere–Geospace as an open nonlinear dynamical system // Radio Phys. Radio Astronomy. V. 13. № 2. P. 120–137. 2008.
- *Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. V. 107. № A12. P. SIA 15 1–16. 2002.
- *Schunk R.W., Nagy A.F.* Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Cambridge atmospheric and space science series. 555 p. 2000.