

## РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

УДК 500.388.2

М. В. ЛЯШЕНКО

PACS numbers: 94.20.Cf,  
94.20.Wc, 95.10.Gi

Институт ионосферы НАН и МОН Украины,  
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: mlyashenko@ya.ru

### ТЕПЛОВЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ИОНОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ ЧАСТНОГО ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА 20 МАРТА 2015 Г. НАД ХАРЬКОВОМ: РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

*Представлены результаты расчетов параметров динамических и тепловых процессов в геокосмической плазме во время частного солнечного затмения 20 марта 2015 г. Представлен краткий обзор работ, посвященных результатам наблюдений эффектов нескольких затмений Солнца над Харьковом в период с 1999 по 2011 г. по данным радара некогерентного рассеяния. Приведены исходные теоретические соотношения для расчета параметров динамических и тепловых процессов в ионосфере. Как показали расчеты, во время максимального покрытия диска Солнца абсолютное значение вертикальной составляющей скорости переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии увеличилось примерно на  $1 \div 5$  м/с. Значение плотности полного потока плазмы увеличилось примерно на 20, 26 и 73 % на высотах 250, 300 и 350 км, а на высоте 400 км – примерно в 1.2 раза. Плотность потока частиц за счет амбиполярной диффузии увеличилась примерно на 19 и 57 % на высотах 250 и 300 км соответственно, а на высотах 350 и 400 км – примерно в 2 и 1.4 раза по сравнению со значениями в контрольные сутки. Во время затмения Солнца, как показали расчеты, имело место существенное изменение теплового режима ионосферы. Так, в момент максимальной фазы затмения наблюдалось уменьшение энергии, подводимой к электронам, примерно на  $30 \div 35$  % в диапазоне высот  $200 \div 300$  км. Эффекты затмения хорошо проявились и в вариациях плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, – в момент максимального покрытия диска Солнца его абсолютные значения уменьшились примерно на 63, 50 и 42 % на высотах 300, 350 и 400 км соответственно.*

**Ключевые слова:** затмение Солнца, ионосферная плазма, динамические и тепловые процессы, некогерентное рассеяние

#### 1. Введение

Ранее с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния (НР) были выполнены наблюдения и моделирование вариаций параметров геокосмоса во время частных затмений Солнца над Харьковом 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г., 29 марта 2006 г., 4 января 2011 г. [1–10]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что процессы, наблюдаемые во время солнечных затмений (СЗ) качественно подобны процессам, протекающим во время восхода и захода Солнца. Установлено также, что во время затмений, даже частных, происходит заметная перестройка динамического и теплового режимов геокосмической плазмы. Выражен-

ность эффектов затмения зависит прежде всего от фазы затмения, фазы цикла солнечной активности, геомагнитной обстановки, времени суток и от других факторов.

Несмотря на большое число работ, посвященных исследованию эффектов затмений Солнца в вариациях параметров геокосмоса (см., например, работы [11–19] и ссылки в них), существует довольно много нерешенных проблем и вопросов в понимании механизмов перестройки высотной структуры ионосферы во время СЗ, влияния фазы затмения на динамический и тепловой режимы ионосферной плазмы, генерации волновых возмущений.

Целью настоящей работы является моделирование вариаций параметров динамических и тепловых процессов в ионосфере во время частного затмения Солнца 20 марта 2015 г. над Харьковом.

## 2. Общие сведения о затмении Солнца и гелиогеофизическая обстановка

СЗ над Харьковом 20 марта 2015 г. было частным. Первое касание имело место в 09:09 UT. Максимальное покрытие диска Солнца наблюдалось в 10:15 UT. Последнее касание зафиксировано в 11:21 UT. Общая продолжительность СЗ над Харьковом – 2 ч 12 мин. Максимальное покрытие диска Солнца по площади составило 45 %, по диаметру – 55 %.

СЗ 20 марта 2015 г. протекало на фоне фазы восстановления экстремальной геокосмической бури, которая имела место 17 – 18 марта 2015 г. (экспериментальное значение индекса геомагнитной активности  $K_{p\max} = 9$ ). Гелиогеофизическая обстановка во время затмения была возмущенной (значения индексов геомагнитной активности  $D_{st} = -50$  нТл,  $K_p = 5$ ,  $A_p = 24$ , индекс солнечной активности  $F_{10.7} = 113$ ). В качестве контрольных выбраны магнитоспокойные сутки 20 марта 2013 г. ( $K_{p\max} = 3$ ,  $A_p = 9$ ,  $F_{10.7} = 108$ ).

## 3. Средства и методы

Для расчета параметров динамических и тепловых процессов в ионосфере использованы экспериментальные данные, полученные в Харькове на радаре НР Института ионосферы НАН и МОН Украины. Харьковский радар НР является единственным и наиболее информативным источником сведений о параметрах и процессах, описывающих состояние ионосферы в средних широтах Европы.

Радар НР позволяет измерять с приемлемыми разрешением по высоте (10 ÷ 100 км) и точностью (обычно погрешность не более 10 %) следующие параметры ионосферы: концентрацию электронов  $N$ , температуры электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$ , вертикальную составляющую скорости переноса заряженных частиц  $v_z$ , ионный состав [20].

Технические характеристики и режимы работы радара НР более подробно описаны в работах [20, 21].

## 4. Основные теоретические соотношения

Воспользуемся известными теоретическими соотношениями для расчета следующих параметров динамических и тепловых процессов в околосем-

ной космической плазме во время частного затмения Солнца.

*Вертикальная составляющая скорости переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии.* В общем виде выражение для вертикальной составляющей скорости переноса имеет вид [22, 23]:

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

где  $(v_{d\parallel})_z$  – вертикальная компонента скорости частиц за счет амбиполярной диффузии вдоль силовых линий геомагнитного поля,  $(v_{n\parallel})_z$  – вертикальная компонента скорости переноса заряженных частиц за счет нейтрального ветра,  $(v_{\perp})_z$  – вертикальная компонента скорости переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа. Подставив в (1) выражения для каждого из слагаемых, получаем

$$v_z = v_d + v_{nx} \sin I \cos I \cos D - v_{ny} \sin I \cos I \sin D + v_{nz} \sin^2 I + \frac{E_x}{B} \cos I \sin D + \frac{E_y}{B} \cos I \cos D,$$

где  $v_{nx}$ ,  $v_{ny}$ ,  $v_{nz}$  – меридиональная, зональная и вертикальная составляющие скорости нейтрального

газа;  $v_d = -D_a \sin^2 I \left( \frac{1}{H_p} + \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial z} + \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial z} \right)$  –

вертикальная составляющая скорости переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии,  $D_a = kT_p / m_i v_{in}$  – продольная составляющая тензора амбиполярной диффузии,  $k$  – постоянная Больцмана,  $m_i$  – масса иона кислорода  $O^+$ ,  $v_{in}$  – суммарная частота соударений ионов с нейтралами,  $T_p = T_e + T_i$  – плазменная температура,  $T_e$  и  $T_i$  – температуры электронов и ионов,  $N$  – концентрация электронов,  $H_p = kT_p / mg$  – плазменная приведенная высота,  $m$  – масса электрона,  $g$  – ускорение свободного падения;  $I$  и  $D$  – наклонение и склонение геомагнитного поля;  $E_x$  и  $E_y$  – меридиональная и зональная компоненты электрического поля;  $B$  – модуль индукции магнитного поля Земли.

*Потоки частиц.* Плотность полного (суммарного) потока плазмы в вертикальном направлении вычисляется по формуле:

$$\Pi_p = v_z N. \quad (2)$$

Выражение для расчета плотности потока заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии аналогично (2) и имеет вид:

$$\Pi_d = v_d N.$$

Значение  $N$  измеряется на харьковском радаре НР.

*Подвод энергии к электронному газу.* Во внешней ионосфере частота столкновений электронов с нейтралами становится меньше частоты столкновений электронов с ионами, и основными механизмами охлаждения электронного газа являются потеря тепла при столкновениях электронов с ионами, возбуждение тонкой структуры атомов кислорода и теплопроводность электронного газа [22]. В рассматриваемом диапазоне высот имеет место перенос фотоэлектронов и связанный с этим переносом нелокальный нагрев электронного газа.

На высотах  $z \leq 350$  км теплопроводностью электронного газа можно пренебречь, и уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае имеет вид [22]:

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

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

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

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 эмпирической модели ионосферы NRLMSISE-00 [24].

*Поток тепла из плазмосферы в ионосферу.* Тепловой баланс электронного газа зависит от 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 захваченные электроны термализуются в процессе многократных отражений от концов трубки. Таким образом, в плазмосфере имеет место накопление тепла, которое поступает обратно

в ионосферу посредством теплопроводности электронного газа [22, 23].

Тепловой поток можно определить из кинетического уравнения с учетом переноса сверхтепловых электронов. Выражение для расчета плотности потока тепла, поступающего из плазмосферы в ионосферу в вертикальном направлении, имеет вид [22, 23]:

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

где  $\kappa_e = 2.08 k^2 N T_e / m v_{ei}$  – продольная составляющая тензора теплопроводности электронного газа.

Частоту соударений электронов с ионами  $O^+$ ,  $v_{ei}$ , для расчета продольной составляющей тензора теплопроводности можно найти, используя выражение вида [22]:

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

*Зональное электрическое поле и перенос плазмы за счет электромагнитного дрейфа.* В спокойных геомагнитных условиях в средних широтах эффектами электрических полей можно пренебречь. В этом случае основной вклад в вертикальный перенос плазмы вносят амбиполярная диффузия и нейтральный ветер. Во время сильных геомагнитных возмущений в средних широтах появляется еще и перенос заряженных частиц, связанный с электромагнитным дрейфом плазмы, вследствие проникновения электрических полей магнитосферного происхождения на высоты ионосферы средних широт.

Для оценки зональной компоненты напряженности электрического поля воспользуемся выражением, приведенным в [25]:

$$E_y = (0.55 - 0.01AE) \cdot 10^{-3},$$

где  $AE$  – индекс авроральной активности, нТл;  $E_y$  – зональная компонента напряженности электрического поля, В/м.

Выражение для расчета скорости переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа  $v_{EB}$  в пренебрежении эффектом склонения имеет вид [22, 23]:

$$v_{EB} \approx \frac{E_y}{B} \cos I,$$

где модуль индукции геомагнитного поля  $B \approx 4.4 \cdot 10^{-5}$  нТл на высоте 300 км [26].

*Нейтральный ветер в ионосфере.* В средних широтах вертикальная составляющая скорости ветрового увлечения ионов обусловлена меридиональной составляющей скорости горизонтального движения нейтрального газа. Нейтральный ветер, направленный к экватору, вызывает движение плазмы вверх по магнитным силовым линиям, а ветер, имеющий направление к полюсу, – движение плазмы вниз вдоль геомагнитных силовых линий [23].

Выражение для расчета меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра  $v_{nx}$  в пренебрежении эффектом склонения геомагнитного поля имеет вид [22, 23]:

$$v_{nx} = \frac{v_z - v_d - v_{EB}}{\sin I \cos I}.$$

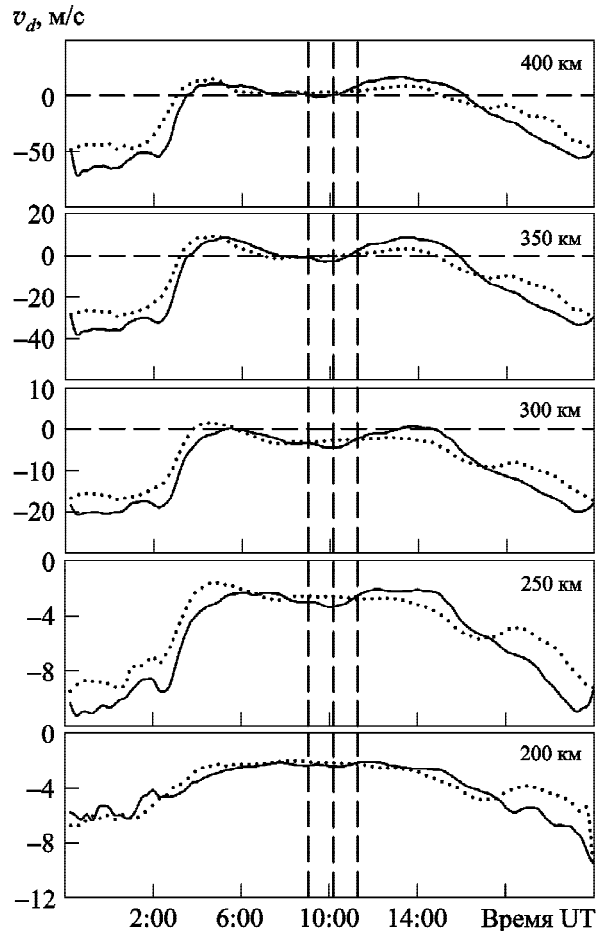
Здесь значение  $v_z$  получается экспериментально на радаре НР, а значения  $v_d$  и  $v_{EB}$  рассчитываются по приведенным выше формулам.

### 5. Результаты расчетов

*Скорость переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии.* Суточные вариации вертикальной составляющей скорости переноса заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии представлены на рис. 1. Значение скорости  $v_d$  во время затмения мало изменялось. В диапазоне высот 250 ÷ 400 км наблюдалось незначительное увеличение абсолютного значения  $v_d$  примерно на 1 ÷ 5 м/с. На высоте 200 км эффекты СЗ в вариациях  $v_d$  практически неразличимы.

*Потоки плазмы.* На рис. 2 и рис. 3 приведены суточные вариации плотностей полного потока плазмы и потока заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии. Эффекты СЗ в вариациях  $\Pi_p$  наблюдались в основном в диапазоне высот 250 ÷ 400 км (рис. 2). Как показали расчеты, во время максимальной фазы затмения имело место увеличение абсолютного значения  $\Pi_p$  примерно на 20, 26 и 73 % на высотах 250, 300 и 350 км соответственно. На высоте 400 км величина  $|\Pi_p|$  увеличилась примерно в 1.2 раза относительно значения в спокойный период 20 марта 2013 г.

Эффекты СЗ 20 марта 2015 г. хорошо заметны также в вариациях плотности потока плазмы за



**Рис. 1.** Временные вариации вертикальной составляющей скорости переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии  $v_d$  на фиксированных высотах во время затмения Солнца 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и в контрольные сутки 20 марта 2013 г. (пунктирная линия). Здесь и далее на графиках вертикальными штриховыми линиями показаны моменты начала, максимального покрытия и окончания СЗ

счет амбиполярной диффузии  $\Pi_d$ . В момент максимального покрытия диска Солнца имело место увеличение абсолютного значения  $\Pi_p$  в диапазоне высот 250 ÷ 400 км (см. рис. 3). Так, на высотах 250 и 300 км  $|\Pi_d|$  увеличилась примерно на 19 и 57 % соответственно. С ростом высоты, как показали расчеты, эффекты затмения еще более значительны. Так, на высотах 350 и 400 км наблюдалось увеличение  $|\Pi_d|$  примерно в 2 и 1.4 раза относительно значений в контрольные сутки.

*Подвод энергии к электронам.* На рис. 4 представлены временные вариации энергии, подводимой к электронам во время затмения Солнца

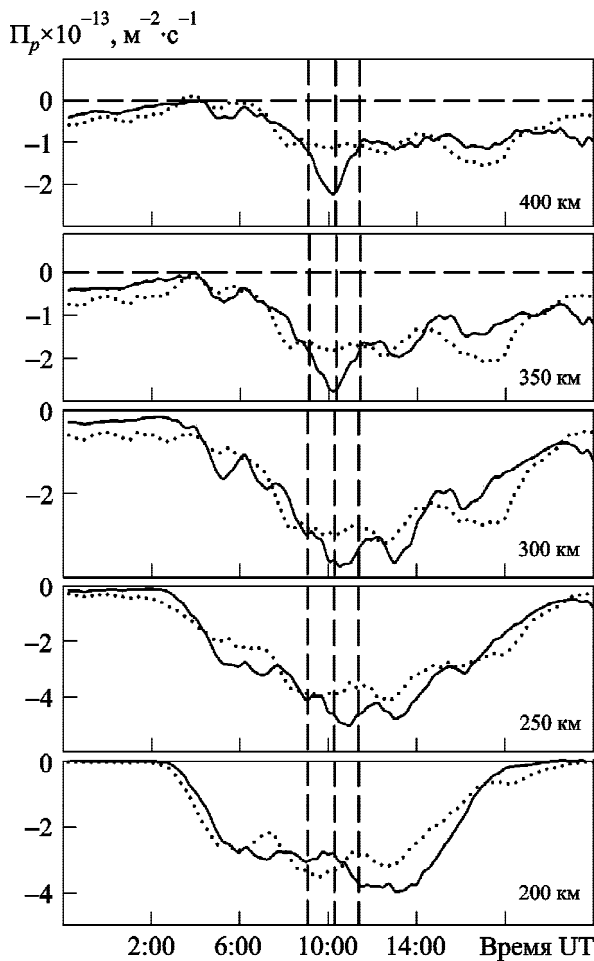


Рис. 2. Временные вариации плотности полного потока плазмы  $\Pi_p$  на фиксированных высотах во время затмения Солнца 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и в контрольные сутки 20 марта 2013 г. (пунктирная линия)

20 марта 2015 г. и в контрольный день 20 марта 2013 г. СЗ привело к существенному уменьшению значений  $Q/N$  во всем рассматриваемом диапазоне высот. Как показали расчеты,  $Q/N$  в момент максимального покрытия диска Солнца уменьшилась примерно на 30–35 %, что свидетельствует о перестройке теплового режима плазмы.

**Поток тепла.** Временные вариации плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, приведены на рис. 5. Эффекты СЗ существенно повлияли на процессы переноса тепла в системе “плазмосфера – ионосфера”. Так, по сравнению с контрольными сутками 20 марта 2013 г., во время СЗ имело место уменьшение абсолютных значений плотности

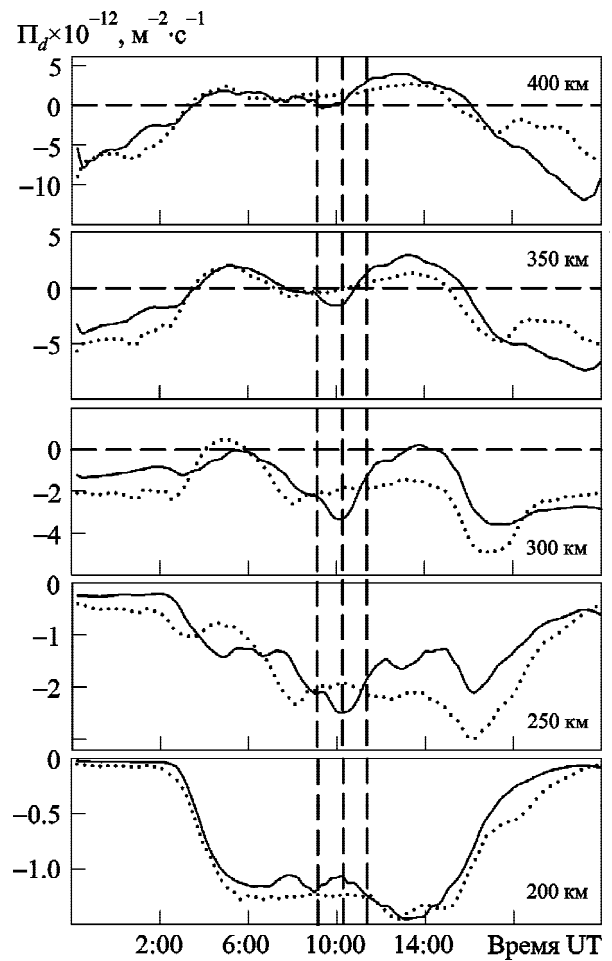


Рис. 3. Временные вариации плотности потока плазмы за счет амбиполярной диффузии  $\Pi_d$  на фиксированных высотах во время затмения Солнца 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и в контрольные сутки 20 марта 2013 г. (пунктирная линия)

потока тепла  $\Pi_T$  примерно на 63, 50 и 42 % на высотах 300, 350 и 400 км соответственно.

**Зональное электрическое поле и скорость переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа.** Затмение Солнца 20 марта 2015 г. происходило в течение фазы восстановления экстремальной геокосмической бури. Геомагнитная обстановка в рассматриваемый период была возмущенной, и целесообразно было учесть влияние электрических полей магнитосферного происхождения на поведение параметров динамических процессов в ионосфере во время СЗ. На рис. 6 приведены временные вариации зональной компоненты электрического поля и вертикальной составляющей скорости переноса частиц

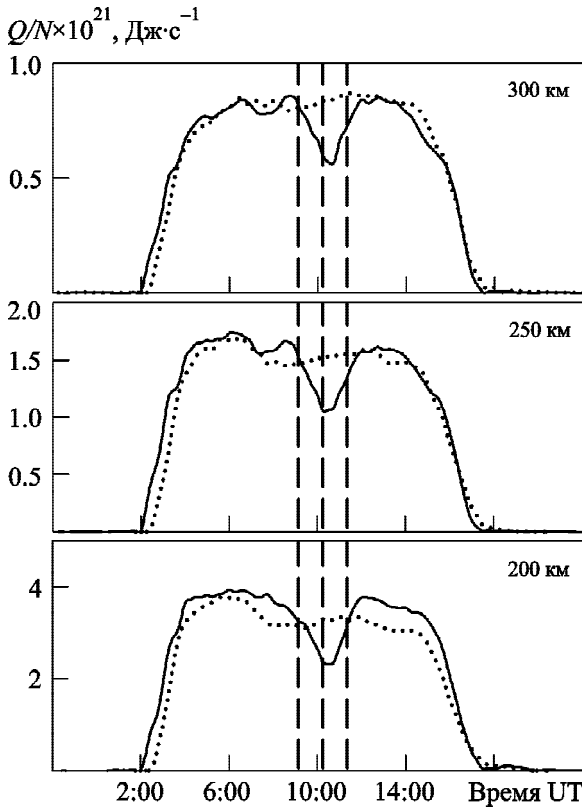


Рис. 4. Временные вариации энергии  $Q/N$ , подводимой к электронному газу, на фиксированных высотах во время затмения Солнца 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и в контрольные сутки 20 марта 2013 г. (пунктирная линия)

за счет электромагнитного дрейфа во время СЗ и в контрольные сутки.

В течение 20 марта 2015 г. величина  $E_y$  варьировалась в пределах от 0 до  $-5.6$  мВ/м. Ей соответствовала скорость дрейфа  $v_{EB} \approx -50$  м/с. В момент максимального покрытия диска Солнца  $E_y \approx -3.6$  мВ/м, а скорость  $v_{EB}$  достигала значения  $-32$  м/с. В контрольные сутки, как видно из рис. 6, величина  $E_y$  была близка к нулю и скорость плазмы за счет электромагнитного дрейфа  $v_{EB}$  составляла единицы метров в секунду.

**Нейтральный ветер.** Вариации скоростей меридиональной составляющей нейтрального ветра  $v_{nx}$  и эквивалентного нейтрального ветра  $w$  представлены на рис. 7. Эффекты СЗ в вариациях меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра и эквивалентного нейтрального ветра на высотах  $z < 350$  км практически не наблюдались. На высоте 400 км зафиксировано незначительное усиление нейтрального ветра, направленного от экватора к полюсу.

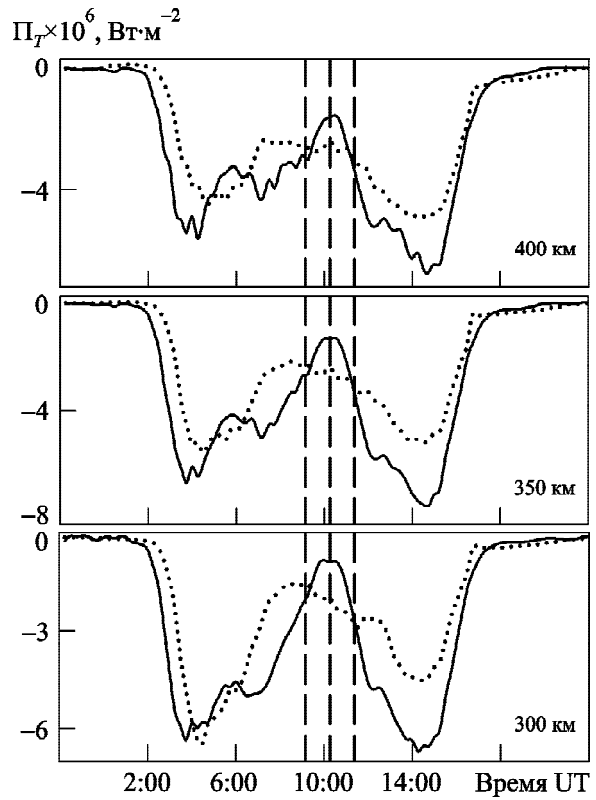


Рис. 5. Временные вариации плотности потока тепла  $\Pi_T$ , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, на фиксированных высотах во время затмения Солнца 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и в контрольные сутки 20 марта 2013 г. (пунктирная линия)

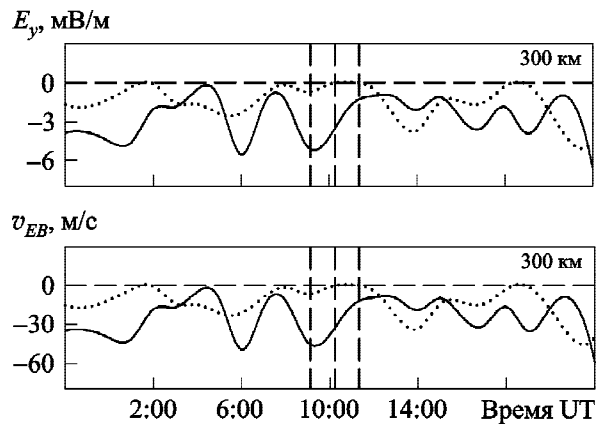


Рис. 6. Временные вариации зональной компоненты электрического поля  $E_y$  и вертикальной составляющей скорости переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа  $v_{EB}$  на высоте 300 км во время затмения Солнца 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и в контрольные сутки 20 марта 2013 г. (пунктирная линия)

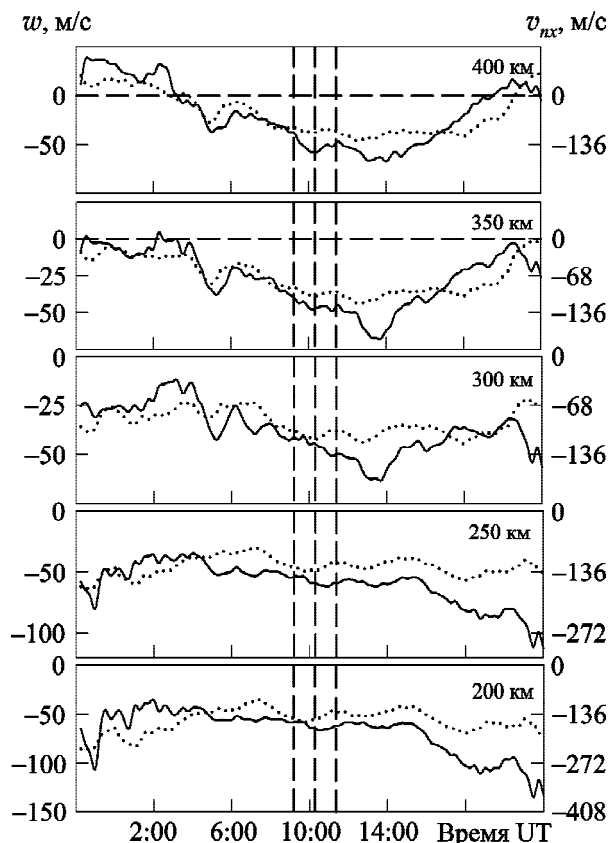


Рис. 7. Временные вариации меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра  $v_{nx}$  и эквивалентного нейтрального ветра  $w$  на фиксированных высотах во время затмения Солнца 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и в контрольные сутки 20 марта 2013 г. (пунктирная линия)

## 6. Обсуждение

Обсудим полученные результаты расчетов параметров динамических и тепловых процессов в геокосмической плазме во время СЗ 20 марта 2015 г.

Уникальность данного затмения заключается в том, что оно протекало на фоне фазы восстановления экстремальной геокосмической бури, имевшей место 17–18 марта 2015 г. ( $K_{p\max} = 9$ ). Несмотря на возмущенную обстановку, эффекты затмения Солнца хорошо заметны в вариациях динамических и тепловых процессов. Вариации параметров физических процессов в течение СЗ 20 марта 2015 г. качественно подобны вариациям динамических и тепловых процессов во время затмений над Харьковом, наблюдавшихся в период с 1999 по 2011 г. [1–10]. Однако имеются количественные различия, обусловленные в основном фазой затмений, гелиогеофизической обстановкой.

Теоретические расчеты показали, что СЗ 20 марта 2015 г. существенно повлияло на динамический и тепловой режимы ионосферной плазмы. Оценка зональной компоненты электрического поля позволила рассчитать вертикальную составляющую скорости переноса заряженных частиц за счет электромагнитного дрейфа  $v_{EB}$  и скорости нейтрального ветра  $v_{nx}$  и эквивалентного нейтрального ветра  $w$ . Значения скорости дрейфа  $v_{EB}$  сопоставимы со значениями скорости нейтрального ветра и превосходят значения скорости переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии. Можно сделать вывод, что учет  $v_{EB}$  в возмущенных условиях необходим и перенос плазмы за счет электромагнитного дрейфа является существенным. Скорость  $v_{EB}$  вносит сопоставимый вклад в общую скорость движения плазмы с вкладом скоростей нейтральных ветров и диффузионных потоков заряженных частиц.

## 7. Выводы

1. Эффекты СЗ 20 марта 2015 г. в вариациях вертикальной составляющей скорости переноса плазмы  $v_d$  проявились слабо. В диапазоне высот 250 ÷ 400 км наблюдалось незначительное увеличение абсолютного значения  $v_d$  примерно на 1 ÷ 5 м/с, что сопоставимо с погрешностью определения этой величины на рассматриваемых высотах.

2. Абсолютные значения плотности полного (суммарного) потока плазмы во время максимальной фазы увеличились примерно на 20, 26 и 73 % на высотах 250, 300 и 350 км соответственно. На высоте 400 км, как показали расчеты,  $|\Pi_p|$  увеличилась примерно в 1.2 раза относительно значения в контрольные сутки.

3. Во время максимального покрытия диска Солнца имело место увеличение плотности потока плазмы за счет амбиполярной диффузии примерно на 19 и 57 % на высотах 250 и 300 км соответственно. На высотах 350 и 400 км  $|\Pi_d|$  увеличилась примерно в 2 и 1.4 раза относительно соответствующих значений в спокойные контрольные сутки 20 марта 2013 г.

4. Энергия  $Q/N$ , подводимая к электронам, в момент максимальной фазы СЗ уменьшилась примерно на 30 ÷ 35 % в диапазоне высот 200 ÷ 300 км.

5. Абсолютные значения плотности потока тепла  $|\Pi_T|$ , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, во время максимального покрытия диска Солнца уменьшились примерно на 63, 50 и 42 % на высотах 300, 350 и 400 км.

6. Во время СЗ 20 марта 2015 г. зональная компонента электрического поля  $E_y \approx -3.6$  мВ/м, вертикальная составляющая скорости переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа  $v_{EB} \approx -32$  м/с.

7. Эффекты СЗ в вариациях меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра  $v_{nx}$  и эквивалентного нейтрального ветра  $w$  на высотах  $z < 350$  км практически не наблюдались. На высоте 400 км имело место незначительное усиление нейтрального ветра, направленного от экватора к полюсу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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 // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 2. – С. 25–63.
- 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 // Геомагнетизм и аэронаука. – 2005. – Т. 45, № 4. – С. 526–551.
- 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. – Т. 13, № 6. – С. 74–86.
- 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. – Т. 14, № 1. – С. 57–64.
- Grigorenko E. I., Lyashenko M. V., and Chernogor L. F. Effects of the Solar Eclipse of March 29, 2006, in the Ionosphere and Atmosphere // Geomagnetism and Aeronomy. – 2008. – Vol. 48, No. 3. – P. 337–351. DOI: 10.1134/S0016793208030092
- Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., and Lyashenko M. V. Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv // Int. J. Remote Sens. – 2011. – Vol. 32, Is. 11. – P. 3219–3229. DOI: 10.1080/01431161.2010.541509
- Domnin I. F., Yemelyanov L. Ya., Kotov D. V., Lyashenko M. V., and Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – Vol. 53, Is. 1. – P. 113–123. DOI: 10.1134/S0016793213010076
- Lyashenko M. V. and Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 3. Calculation results and discussion // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – Vol. 53, Is. 3. – P. 367–376. DOI: 10.1137/S0016793213020096
- Lyashenko M. V. The effects of the partial solar eclipse on January 4, 2011 in the variety of thermal process parameters in ionosphere // Sun and Geosphere. – 2013. – Vol. 8, Is. 1. – P. 15–18.
- Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., and Chernogor L. F. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: observation and simulation results // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – Vol. 54, Is. 5. – P. 583–592. DOI: 10.1134/S0016793214040112
- Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., and 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. Sol.-Terr. Phys. – 2002. – Vol. 64, Is. 18. – P. 1933–1941. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00221-3
- Stubbe P. The F-region during an eclipse – A theoretical study // J. Atmos. Terr. Phys. – 1970. – Vol. 32, Is. 6. – P. 1109–1116. DOI: 10.1016/0021-9169(70)90121-2
- Boitman O. N., Kalikhman A. D., and Tashchilin A. V. The midlatitude ionosphere during the total solar eclipse of March 9, 1997 // J. Geophys. Res. – 1999. – Vol. 104, Is. A12. – P. 28 197–28 206. DOI: 10.1029/1999JA900228
- Le H., Liu L., Yue X., and Wan W. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling // Ann. Geophys. – 2008. – Vol. 26, Is. 1. – P. 107–116. DOI: 10.5194/angeo-26-107-2008
- Le H., Liu L., Yue X., and Wan W. The ionospheric behavior in conjugate hemispheres during the 3 October 2005 solar eclipse // Ann. Geophys. – 2009. – Vol. 27, Is. 1. – P. 179–184. DOI: 10.5194/angeo-27-179-2009
- Sekar R., Gupta S. P., and Chakrabarty D. Characteristics of E-region background ionosphere and plasma waves measured over the dip equator during total solar eclipse campaign // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2014. – Vol. 114. – P. 58–65. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.04.006
- Babakhanov I. Y., Belinskaya A. Y., Bizin M. A., Grekhov O. M., Khomutov S. Y., Kuznetsov V. V., and Pavlov A. F. The geophysical disturbances during the total solar eclipse of 1 August 2008 in Novosibirsk, Russia // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2013. – Vol. 92. – P. 1–6. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.09.016
- Nymphas E. F., Otunla T. A., Adeniyi M. O., and Oladiran E. O. Impact of the total solar eclipse of 29 March 2006 on the surface energy fluxes at Ibadan, Nigeria // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2012. – Vol. 80. – P. 28–36. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.02.024
- Jakowski N., Stankov S. M., Wilken V., Borries C., Altadill D., Chum J., Buresova D., Boska J., Sauli P., Hruska F., and Cander Lj. R. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005 // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2008. – Vol. 70, Is. 6. – P. 836–853. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.02.016
- Таран В. И. Исследования ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронаука. – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 659–666.
- Лысенко В. Н. Измерение вертикальной составляющей скорости дрейфа плазмы и кинетических температур в ионосфере // Геомагнетизм и аэронаука. – 2001. – Т. 41, № 3. – С. 365–368.
- Schunk R. W., and Nagy A. F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004. – 554 p.
- Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1987. – 528 с.
- Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., and Aikin A. C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Sta-



- tistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 2002. – Vol. 107, Is. A12. – P. SIA 15-1–SIA 15-16. DOI: 10.1029/2002JA009430
25. Сергеевко Н. П. Оценки электрических полей во время ионосферных возмущений / Ионосферное прогнозирование. – М.: Наука, 1982. – С. 91–96.
26. Finlay C. C., Maus S., Beggan C. D., Bondar T. N., Chambodut A., Chernova T. A., Chulliat A., Golovkov V. P., Hamilton B., Hamoudi M., Holme R., Hulot G., Kuang W., Langlais B., Lesur V., Lowes F. J., Lühr H., MacMillan S., Manda M., McLean S., Manoj C., Menvielle M., Michaelis I., Olsen N., Rauberg J., Rother M., Sabaka T. J., Tangborn A., Tøffner-Clausen L., Thébault E., Thomson A. W. P., Wardinski I., Wei Z., and Zvereva T. I. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation // *Geophys. J.* – 2010. – Vol. 183, Is. 3. – P. 1216–1230. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x
- ## REFERENCES
- AKIMOV, L. A., GRIGORENKO, E. I., TARAN, V. I., TYRNOV, O. F. and CHERNOGOR, L. F., 2002. The complex radio physical and optical studies of dynamic processes in the atmosphere and geospace caused by a solar eclipse August 11, 1999. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoy radioelektroniki.* no. 2, pp. 25–63 (in Russian).
  - AKIMOV, L. A., BOGOVSKIY, V. K., GRIGORENKO, E. I., TARAN, V. I. and CHERNOGOR, L. F., 2005. Atmospheric-ionospheric effects of solar eclipse on May 31, 2003 in Kharkov. *Geomagnetism i aeronomiya.* vol. 45, no. 4, pp. 526–551 (in Russian).
  - BURMAKA, V. P., LYSENKO, V. N., LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2007. Atmospheric-ionospheric effects of partial solar eclipse on October 3, 2005 in Kharkov. 1. Observation results. *Kosmichna nauka i tekhnologiya.* vol. 13, no. 6, pp. 74–86 (in Russian).
  - LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2008. Atmospheric-ionospheric effects of partial solar eclipse on October 3, 2005 in Kharkov. 2. Modeling and discussion. *Kosmichna nauka i tekhnologiya.* vol. 14, no. 1, pp. 57–64 (in Russian).
  - GRIGORENKO, E. I., LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2008. Effects of the Solar Eclipse of March 29, 2006, in the Ionosphere and Atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* vol. 48, no 3, pp. 337–351. DOI: 10.1134/S0016793208030092
  - CHERNOGOR, L. F., GRIGORENKO, Ye. I. and LYASHENKO, M. V., 2011. Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *Int. J. Remote Sens.* vol. 32, no. 11, pp. 3219–3229. DOI: 10.1080/01431161.2010.541509
  - DOMNIN, I. F., YEMELYANOV, L. Ya., LYASHENKO, M. V., Kotov, D. V. and CHERNOGOR, L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* vol. 53, no. 1, pp. 113–123. DOI: 10.1134/S0016793213010076
  - LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2013. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 3. Calculation results and discussion. *Geomagnetism and Aeronomy.* vol. 53, no. 3, pp. 367–376. DOI: 10.1137/S0016793213020096
  - LYASHENKO, M. V., 2013. The effects of the partial solar eclipse on January 4, 2011 in the variety of thermal process parameters in ionosphere. *Sun and Geosphere.* vol. 8, no. 1, pp. 15–18.
  - DOMNIN, I. F., EMELYANOV, L. YA., LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2014. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: observation and simulation results. *Geomagnetism and Aeronomy.* vol. 54, no. 5, pp. 583–592. DOI: 10.1134/S0016793214040112
  - AFRAIMOVICH, E. L., KOSOGOROV, E. A. and LESYUTA, O. S., 2002. Effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 64, no. 18, pp. 1933–1941. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00221-3
  - STUBBE, P., 1970. The F-region during an eclipse – A theoretical study. *J. Atmos. Terr. Phys.* vol. 32, no. 6, pp. 1109–1116. DOI: 10.1029/1999JA900228
  - BOITMAN, O. N., KALIKHMAN, A. D. and TASHCHILIN, A. V., 1999. The midlatitude ionosphere during the total solar eclipse of March 9, 1997. *J. Geophys. Res.* vol. 104, no. A12, pp. 28 197–28 206. DOI: 10.1029/1999JA900228
  - LE, H., LIU, L., YUE, X. and WAN, W., 2008. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling. *Ann. Geophys.* vol. 26, is. 1, pp. 107–116. DOI: 10.5194/angeo-26-107-2008
  - LE, H., LIU, L., YUE, X. and WAN, W., 2009. The ionospheric behavior in conjugate hemispheres during the 3 October 2005 solar eclipse. *Ann. Geophys.* vol. 27, is.1, pp. 179–184. DOI: 10.5194/angeo-27-179-2009
  - SEKAR, R., GUPTA, S. P. and CHAKRABARTY, D., 2014. Characteristics of E-region background ionosphere and plasma waves measured over the dip equator during total solar eclipse campaign. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 114, pp. 58–65, DOI: 10.1016/j.jastp.2014.04.006
  - BABAKHANOV, I. Y., BELINSKAYA, A. Y., BIZIN, M. A., GREKHOV, O. M., KHOMUTOV, S. Y., KUZNETSOV, V. V. and PAVLOV, A. F., 2013. The geophysical disturbances during the total solar eclipse of 1 August 2008 in Novosibirsk, Russia. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 92, pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.09.016
  - NYMPHAS, E. F., OTUNLA, T. A., ADENIYI, M. O. and OLADIRAN, E. O., 2012. Impact of the total solar eclipse of 29 March 2006 on the surface energy fluxes at Ibadan, Nigeria. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 80, pp. 28–36. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.02.024
  - JAKOWSKI, N., STANKOV, S. M., WILKEN, V., BORRIES, C., ALTADILL, D., CHUM, J., BURESOVA, D., BOSKA, J., SAULI, P., HRUSKA, F. and CANDLER, L.J. R., 2008. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 70, no. 6, pp. 836–853. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.02.016
  - TARAN, V. I., 2001. Ionospheric investigation of ionosphere in natural and artificial disturbed conditions by incoherent scattering method. *Geomagnetism i aeronomiya.* vol. 41, no 5, pp. 659–666 (in Russian).
  - LYSENKO V. N., 2001. Measurement of vertical component of the drift velocity of plasma and kinetic temperatures in the ionosphere. *Geomagnetism i aeronomiya.* vol. 41, no. 3, pp. 365–368 (in Russian).

22. SCHUNK, R. W, and NAGY, A. F., 2004. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
23. BRYUNELLI, B. E. and NAMGALADZE, A. A., 1987. *Physics of the ionosphere*. Moscow: Nauka (in Russian).
24. PICONE, J. M., HEDIN, A. E., DROB, D. P. and AIKIN, A. C., 2002. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 107, no. A12, pp. SIA 15-1–SIA 15-16. DOI: 10.1029/2002JA009430
25. SERGEENKO, N. P., 1982. Estimates of electric fields during ionospheric disturbances. In: *Ionospheric forecasting*. Moscow: Nauka (in Russian).
26. FINLAY, C. C., MAUS, S., BEGGAN, C. D., BONDAR, T. N., CHAMBODUT, A., CHERNOVA, T. A., CHULLIAT, A., GOLOVKOV, V. P., HAMILTON, B., HAMOUDI, M., HOLME, R., HULOT, G., KUANG, W., LANGLAIS, B., LESUR, V., LOWES, F. J., LÜHR, H., MACMILLAN, S., MANDEA, M., MCLEAN, S., MANOJ, C., MENVIELLE, M., MICHAELIS, I., OLSEN, N., RAUBERG, J., ROTHER, M., SABAKA, T. J., TANGBORN, A., TÖFFNER-CLAUSEN, L., THÉBAULT, E., THOMSON, A. W. P., WARDINSKI, I., WEI, Z. and ZVEREVA, T. I., 2010. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. *Geophys. J.* vol. 183, no. 3, pp. 1216–1230. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x

M. V. Lyashenko

Institute of Ionosphere, National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine, 16, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### THERMAL AND DYNAMIC PROCESSES IN IONOSPHERE DURING PARTIAL SOLAR ECLIPSE OF MARCH 20, 2015 OVER KHARKIV: CALCULATION RESULTS

The results of calculations of dynamic and thermal processes in the geospace plasma during the partial solar eclipse of March 20, 2015 are presented. Also presented is a short review of studies devoted to the results of observations of the effects of several solar eclipses over Kharkiv within 1999 to 2011 according to the incoherent scatter radar data. For calculation of the dynamic and thermal processes in the ionosphere some basic theoretical ratios are presented. The calculations have showed that at the time of maximum coverage of the solar disk the absolute value of the vertical component of the plasma transport velocity by ambipolar diffusion increased by approximately 1 to 5 m/s. The full plasma flux density increased by approximately 20, 26 and 73 % at 250, 300 and 350 km. At the altitude of 400 km the it increased by about 1.2 times. The particle flux density due to ambipolar diffusion has increased by about 19 and 57 % at altitudes of 250 and 300 km, respectively. At the altitudes of 350 and 400 km the it increased by about 2 and 1.4 times as compared with the reference day of March 20, 2013. Calcula-

tions have showed that a significant change in the thermal mode of the ionosphere during solar eclipse took place. Thus, at the time of eclipse maximum phase there was a reduction in the energy supplied to electrons by about 30 to 35 % in the altitude range of 200 to 300 km. Also, the eclipse effects have well manifested in the variation of the heat flux density transferred by electrons from the plasmasphere into the ionosphere. At the moment of maximum coverage of the solar disk, its absolute value has decreased by about 63, 50 and 42 % at 300, 350 and 400 km, respectively.

*Key words:* solar eclipse, ionospheric plasma, dynamic and thermal processes, incoherent scatter

М. В. Ляшенко

Інститут іоносфери НАН і МОН України, вул. Червонопрапорна, 16, м. Харків, 61002, Україна

#### ТЕПЛОВІ ТА ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ІОНОСФЕРІ ПІД ЧАС ЧАСТКОВОГО ЗАТЕМНЕННЯ СОНЦЯ 20 БЕРЕЗНЯ 2015 Р. НАД ХАРКОВОМ: РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Надаються результати розрахунків параметрів динамічних і теплових процесів у геокосмічній плазмі під час часткового сонячного затемнення 20 березня 2015 р. Надається короткий огляд робіт, присвячених результатам спостережень ефектів декількох затемнень Сонця над Харковом у період з 1999 до 2011 р. за даними радара некогерентного розсіяння. Наводяться теоретичні співвідношення для розрахунку параметрів динамічних і теплових процесів у іоносфері. Як показали розрахунки, під час максимального покриття диска Сонця абсолютне значення вертикальної складової швидкості переносу плазми за рахунок амбіполярної дифузії зросло приблизно на  $1 \div 5$  м/с. Значення щільності повного потоку плазми зросло приблизно на 20, 26 і 73 % на висотах 250, 300 і 350 км, а на висоті 400 км – приблизно у 1.2 рази. Щільність потоку частинок за рахунок амбіполярної дифузії зросла приблизно на 19 і 57 % на висотах 250 і 300 км відповідно, на висотах 350 і 400 км – приблизно у 2 і 1.4 рази порівняно зі значеннями за контрольну добу. Під час затемнення Сонця, як показали розрахунки, мала місце істотна зміна теплового режиму іоносфери. Так, у момент максимальної фази затемнення спостерігалось зменшення енергії, що підводиться до електронів, приблизно на  $30 \div 35$  % у діапазоні висот 200 ÷ 300 км. Ефекти затемнення проявились і в варіаціях щільності потоку тепла, яке переноситься електронами із плазмосфери в іоносферу, – в момент максимального покриття диска Сонця його абсолютні значення зменшились приблизно на 63, 50 і 42 % на висотах 300, 350 і 400 км відповідно.

**Ключові слова:** затемнення Сонця, іоносферна плазма, динамічні та теплові процеси, некогерентне розсіяння

*Статья поступила в редакцию 30.09.2015*