

УДК 520.86:550.388

**И. Ф. ДОМНИН, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, М. В. ЛЯШЕНКО, Л. Ф. ЧЕРНОГОР****РЕАКЦИЯ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 20 МАРТА 2015 г. НАД ХАРЬКОВОМ**

Наведено результати експериментальних і модельних досліджень варіацій параметрів іоносферної плазми, динамічних і теплових процесів в іоносфері під час часткового (0.54) сонячного затемнення 20 березня 2015 р. над Харківом. Сонячне затемнення проходило на тлі фази відновлення сильної магнітної бурі, яка мала місце 17–18 березня 2015 р. ( $K_{pmax}=8$ ). Для спостереження використовувалися радар некогерентного розсіяння та цифровий іонозонд. Виявлено реакцію іоносфери на затемнення в варіаціях висоти максимуму іонізації, концентрації та температури електронів, швидкості руху іоносферної плазми, параметрах динамічних і теплових процесів.

**Ключові слова:** сонячне затемнення, іоносфера, метод некогерентного розсіяння, варіації параметрів іоносфери, динамічні та теплові процеси.

Представлены результаты экспериментальных и модельных исследований вариаций параметров ионосферной плазмы, динамических и тепловых процессов в ионосфере во время частного (0.54) солнечного затмения 20 марта 2015 г. над Харьковом. Затмение протекало на фоне фазы восстановления сильной магнитной бури, которая имела место 17–18 марта. Использовались радар некогерентного рассеяния и цифровой ионозонд. Выявлено реакцию ионосферы на затмение в вариациях высоты максимума ионизации, концентрации и температуры электронов, скорости движения ионосферной плазмы, параметрах динамических и тепловых процессов.

**Ключевые слова:** солнечное затмение, ионосфера, метод некогерентного рассеяния, вариации параметров ионосферы, динамические и тепловые процессы.

The results of experimental and modeling studies of ionospheric plasma parameters variations, dynamic and thermal processes in the ionosphere during the partial solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv are presented. The solar disk diameter maximum coverage was about 0.54. The solar eclipse proceeded against the background of the recovery phase of strong magnetic storm which took place on 17–18 March 2015 ( $K_{pmax}=8$ ). The incoherent scatter radar and digital ionosonde were used for observation. We found that at the time of maximum Sun obscuration (10:15 UT), the F2-layer peak height increased by 40 km (from 240 to 280 km), a decrease in the electron density was approximately 18.5 and 16.5 % at altitudes of 190 and 210 km, respectively. The maximum decrease in electron temperature at the same time amounted to 19.5 % at altitude of 340 km. Velocity of the downward plasma movement  $V_z$  increased by 0–60 m/s with height increase within the altitude range of 310–650 km. The altitude profiles of  $V_z$  velocity near the main phase of the solar eclipse became similar to the nighttime ones. The ionosphere response on the solar eclipse was also revealed in variations of the dynamic and thermal processes.

**Key words:** solar eclipse, ionosphere, incoherent scatter method, variations of ionospheric parameters, dynamic and thermal processes.

**Введение.** Солнечное затмение (СЗ) представляет исследователю уникальную возможность проследить за динамикой системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера на интервале времени в несколько часов [1]. Возмущения в этой системе, вызванные различными СЗ, существенно отличаются. Параметры этих возмущений зависят от времени наступления СЗ, состояния космической погоды, сезона и положения в цикле солнечной активности, географических координат и величины покрытия диска Солнца [1].

Самым распространенным методом наблюдения СЗ сначала был метод вертикального зондирования, использующий ионосферные станции (ионозонды) (см., например, [2–4]). Арсенал используемых методов значительно расширился в 1960-х гг. Стали широко использоваться спутниковые и ракетные методы (см., например, [5–9]), метод некогерентного рассеяния (НР) (см., например, [10, 11]), метод доплеровского зондирования (см., например, [12–16]), а также целый ряд других методов (см., например, [8, 17–20]).

Начиная с 1999 г. регулярные исследования ионосферных эффектов в ионосфере во время СЗ проводились с помощью радара НР Института ионосферы, расположенного вблизи г. Харькова (см., например, [21–31]).

Наблюдения показали, что СЗ сопровождаются рядом устойчивых эффектов в ионосфере: уменьшением концентрации  $N_e$  и температуры  $T_e$  электронов, увеличением действующей высоты отражения, запаздыванием уменьшений  $N_e$  по отношению к моменту наступления максимальной

фазы затмения, значительными вариациями вертикальной скорости движения плазмы, потоков плазмы и тепла, а также генерацией квазипериодических (волновых) возмущений в ионосфере. В то же время следует иметь в виду, что каждому затмению присущи свои, индивидуальные, особенности. Спецификой СЗ 20 марта было то, что оно имело место на фоне релаксирующей геокосмической бури, начавшейся 17 марта 2015 г.

**Цель настоящей работы** – анализ результатов наблюдений возмущений в ионосфере сопровождавших СЗ 20 марта 2015 г. над Харьковом.

**Средства радиозондирования.** Радар некогерентного рассеяния. Радар НР Института ионосферы [32] расположен вблизи г. Харькова (49.6° с.ш., 36.3° в.д.). Радар предназначен для исследования ионосферы в диапазоне высот 100–1500 км. Рабочая частота около 158 МГц. В качестве приемно-передающей антенны используется одна из наиболее крупных в мире двухзеркальная параболическая антенна зенитного излучения диаметром 100 м, выполненная по схеме Кассегрена. Эффективная площадь антенны – около 3700 м<sup>2</sup>. Поляризация излучаемого и принимаемого сигнала – круговая. Импульсная мощность передатчика до 3.6 МВт. В описываемых измерениях она составляла около 2 МВт. Работа радара НР проводилась в режиме составного двухчастотного зондирующего сигнала с коротким (130 мкс) и длинным (около 660 мкс)

© И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор, 2016

радиоимпульсами, обеспечивающими высотное разрешение 20 и 100 км в диапазонах высот 100–550 км и 200–1000 км соответственно. Частота повторения 24.4 Гц. Параметры ионосферы определяются одновременно для ряда высот ионосферы по квадратурным составляющим комплексной корреляционной функции НР сигнала [27, 31].

**Цифровой ионозонд.** Совместно с радаром НР использовался цифровой ионозонд, расположенный в Радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина. Его основные параметры: диапазон частот 1–16 МГц, импульсная мощность до 1.5 кВт, длительность зондирующих радиоимпульсов 100 мкс, частота следования 125 Гц.

**Погрешности определения параметров ионосферы:** критической частоты  $f_oF2$  – 0.05 МГц, концентрации электронов  $N_e$  и температур ионов  $T_i$  и электронов  $T_e$  – 1–10 %, скорости движения плазмы  $V_z$  – 1–30 м/с для высот 200–600 км в зависимости от высоты, времени суток и состояния ионосферы.

**Состояние космической погоды.** СЗ началось в 09:09 UT, закончилось в 11:21 UT. Максимальное покрытие диска Солнца по площади составило 44%, по диаметру – 54%. СЗ протекало на фоне фазы восстановления сильной магнитной бури, которая имела место 17–18 марта 2015 г. (Максимальное значение индекса геомагнитной активности  $K_{pmax}=8$ ). Геофизическая обстановка в день затмения была возмущенной ( $D_{st}$  индекс достигал значений –50 нТл,  $K_p=5$ ,  $A_p=24$ ). Индекс солнечной активности  $F10.7=113$ .

Влияние бури не позволило использовать данные наблюдения 19 марта для сравнения с вариациями в день СЗ. В качестве контрольных суток были выбраны даты 20 марта 2013 г. и 29 марта 2012 г. Индексы солнечной ( $F_{10.7}$ ) и геомагнитной ( $A_p$  и  $k_p$ ) активности в рассматриваемые дни приведены в таблице 1.

Из таблицы видно, что контрольные сутки характеризовались спокойной геомагнитной обстановкой, в отличие от 19–21 марта 2015 г.

Солнечная активность в рассматриваемые периоды измерений была умеренной.

Таблица 1 – Индексы солнечной и геомагнитной активности

Дата	$F_{10.7}$	$A_p$	$k_p$
29.03.2012	112	3	10001112
20.03.2013	108	9	22212233
19.03.2015	109	28	44455334
20.03.2015	113	24	53533335
21.03.2015	114	14	43432222

**Результаты наблюдений.** Несмотря на возмущенное состояние геокосмической плазмы, эффекты СЗ были заметны в вариациях параметров ионосферы.

**Вариации критической частоты и высоты максимума ионизации.** Вариации критической частоты  $f_oF2$  и высоты максимума слоя F2 ионосферы  $h_mF2$  приведены на рис. 1.

В момент максимального покрытия Солнца (10:15 UT) высота максимума  $h_mF2$  увеличилась примерно на 40 км (от 240 до 280 км (рис. 1, б)).

В вариациях критической частоты (рис. 1, а) и, соответственно, концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы эффекты СЗ заметно маскировались ионосферной бурей. Скорее всего, изменения критической частоты были малозначительными (не более 12%).

**Вариации концентрации электронов.** На высотах 190 и 210 км уменьшение концентрации электронов  $N_e$  в максимальную фазу затмения составляло примерно 18.5 и 16.5% соответственно (рис. 2, а). На высотах 240 км и выше реакции  $N_e$  на СЗ не наблюдалось.

**Вариации температур электронов и ионов.** Уменьшение температуры электронов  $T_e$  во время максимального покрытия Солнца составило 12.1, 12, 17.7, 17, 19.5, 19, 15.5 и 13.4% на высотах 190, 210, 240, 290, 340, 410, 490 и 580 км соответственно (рис. 2, б). В вариациях температуры ионов  $T_i$  эффекты СЗ проявились слабо (рис. 2, в).

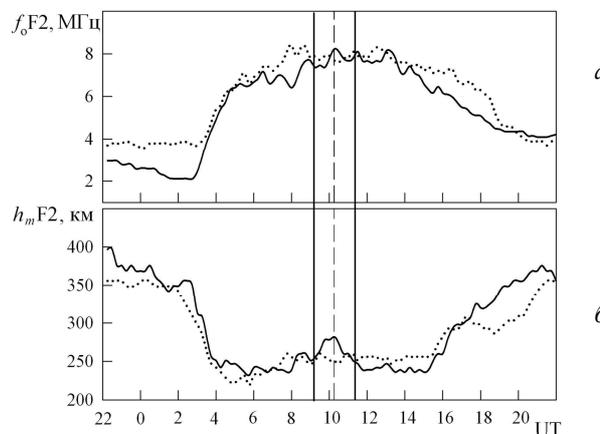


Рис. 1 – Временные вариации: а – критической частоты, б – высоты максимума слоя F2 в день СЗ 20 марта 2015 г. (сплошные линии) и контрольные сутки 20 марта 2013 г. (точки). Здесь и далее вертикальными линиями обозначены моменты начала, максимальной фазы и окончания СЗ.

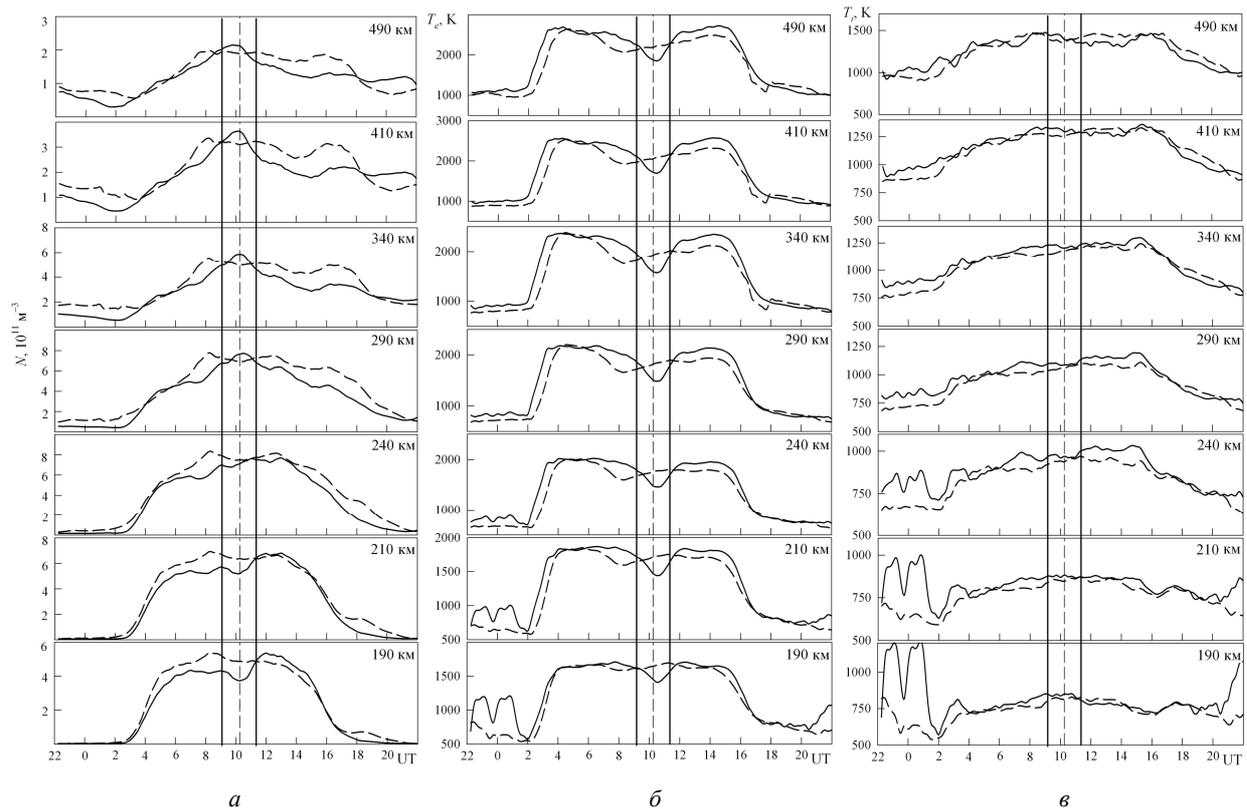


Рис. 2 – Высотно-временные вариации: *а* – концентрации электронов, *б* – температуры электронов, *в* – температуры ионов в день СЗ 20 марта 2015 г. (сплошные линии) и контрольные сутки 20 марта 2013 г. (штриховые линии)

Рис. 3, *а* показывает постепенное увеличение модуля скорости по мере закрытия диска Солнца. Скорость нисходящего движения плазмы изменилась с высотой на 0–60 м/с в высотном диапазоне 310–650 км. Вблизи главной фазы СЗ высотные профили  $V_z$  стали похожи на ночные. По мере открытия диска

Солнца значения модуля скорости уменьшались (рис. 3, *б*). При этом характер профиля  $V_z(h)$  в 11:45 стал идентичным характеру  $V_z(h)$  до начала СЗ в 9:00. Следует отметить, что высотные вариации до и после СЗ были типичными для дневной ионосферы.

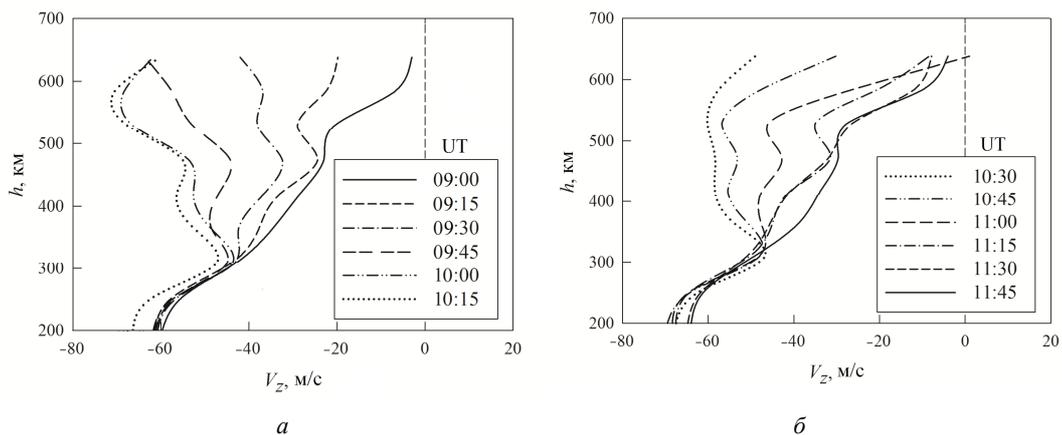


Рис. 3 – Высотные зависимости вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы до, во время и после солнечного затмения

Рис. 4, где представлены высотно-временные вариации  $V_z$  в день СЗ и контрольные дни, показывает хорошее согласие в вариациях  $V_z$  20 марта 2015 г. с данными контрольных суток 20 марта 2013 г. и 29 марта 2012 г. в периоды непосредственно до СЗ

(07:00–09:09) и после СЗ (11:21–13:00 UT). Особенно это легко увидеть из вариаций  $V_z$  на высотах 300–600 км, где отличия значений скорости плазмы находились в пределах статистического разброса.

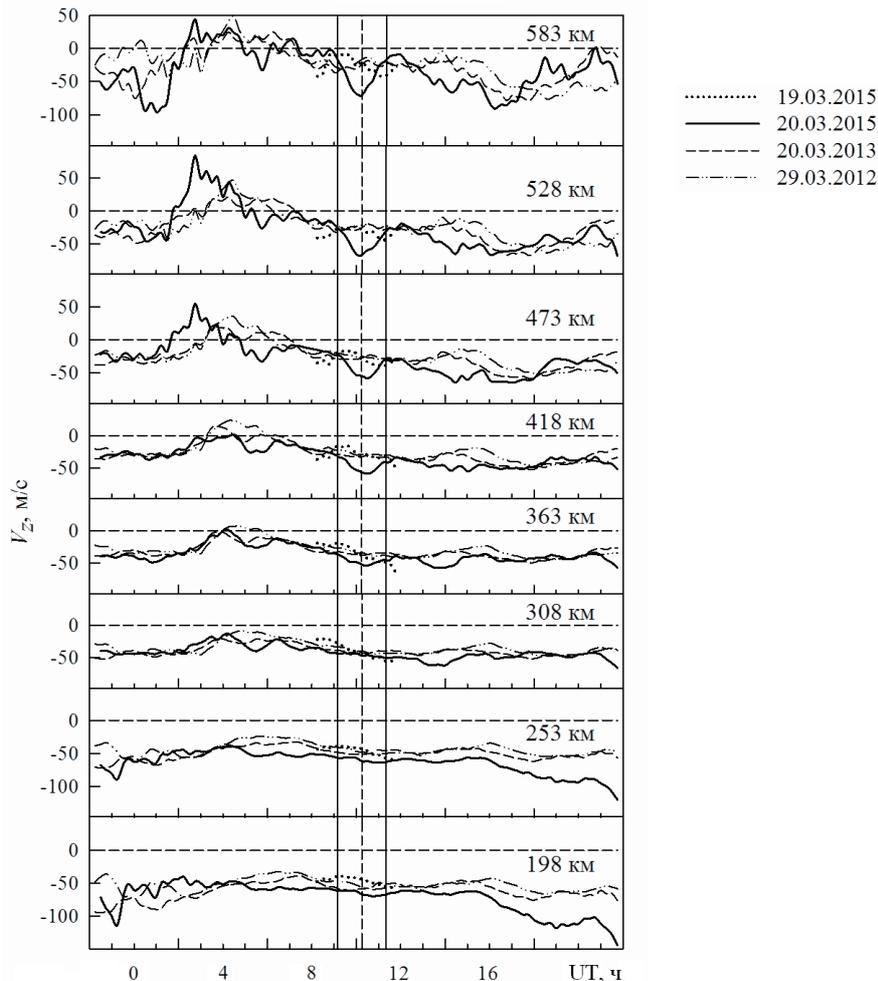


Рис. 4 – Высотно-временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы  $V_z$  в день С3 20 марта 2015 г. и контрольные дни 29 марта 2012 г., 20 марта 2013 г. и 19 марта 2015 г.

Во время С3 наблюдалось увеличение абсолютных значений скорости нисходящего ( $V_z < 0$ ) движения ионосферной плазмы на высотах, больших 308 км. Наибольшее изменение  $V_z$  пришлось на момент вблизи максимальной фазы С3. Затем началось восстановление первоначальных значений  $V_z$ . После окончания С3 величина  $V_z$  близка к первоначальной на всех высотах. Величина изменения  $V_z$  увеличивалась с ростом высоты, а наибольшие изменения (относительно данных контрольных суток и среднего значения накануне и после С3) составили 19, 28, 30, 43, 55 м/с на высотах 363, 418, 473, 528, 583 км соответственно. Следует отметить, что временные вариации  $V_z$  симметричны относительно момента максимальной фазы С3.

Аналогичная реакция скорости  $V_z$  на воздействие С3 была в предшествующих наблюдениях параметров ионосферы с помощью харьковского НР радара в 1999–2011 [21–22, 25–26, 28–29]. Некоторые отличия объясняются различием гелиогеокосмической обстановки. Индекс солнечной активности  $F_{10.7}$  в дни С3 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 29 марта 2006 г., 1 августа 2008 г. и 4 января 2011 г. был равен 131, 113, 82, 66, 91 соответственно. Затмения в 1999, 2006,

2008, 2011 произошли в дневное время в спокойных условиях (индекс  $A_p=8, 6, 3, 4$  соответственно), тогда как С3 в 2003 г. произошло после восхода Солнца во время фазы восстановления геомагнитной бури ( $A_p=17$ ). В отличие от С3 20 марта 2015 г., временные вариации скорости  $V_z$  во время С3 4 января 2011 г. имели слабую асимметрию по отношению к моменту главной фазы С3. Это объясняется тем, что С3 происходило на фоне утреннего восхода Солнца [28].

**Результаты моделирования.** Моделирование процессов в ионосфере в день С3 и контрольный день осуществлялось с помощью известных выражений, приведенных в [23].

*Вариации параметров динамических процессов в ионосфере.* Изменения вертикальной составляющей скорости плазмы, вызванной диффузией,  $V_d$  были незначительными (рис. 5, а) и качественно подобными изменениям  $V_z$ . Вариации меридиональной составляющей скорости нейтрального (термосферного) ветра  $V_{nx}$  и эквивалентного нейтрального ветра  $w$  в течение С3 и после него достигали 10–30 м/с (рис. 5, б). Эффекты С3 в вариациях меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра и эквивалентного нейтрального ветра на высотах

$z < 350$  км практично не наблюдались. В діапазоні висот 400–600 км имело место незначительное

усиление нейтрального ветра, направленного от экватора к полюсу.

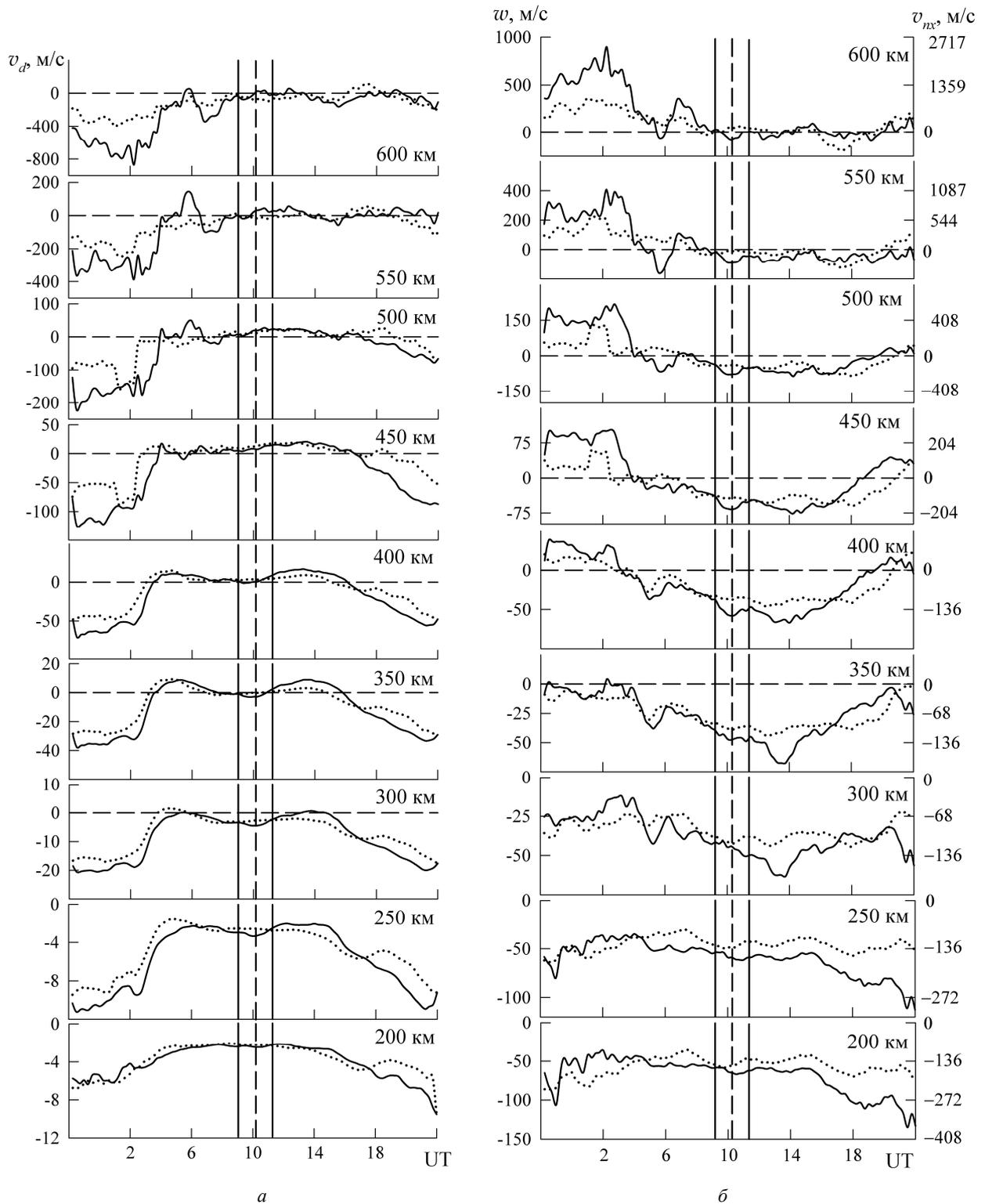


Рис. 5 – Вариации параметров динамических процессов в ионосфере: *а* – скорости переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии, *б* – скорости эквивалентного нейтрального ветра и меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра в день СЗ 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и контрольные сутки 20 марта 2013 г. (точки)

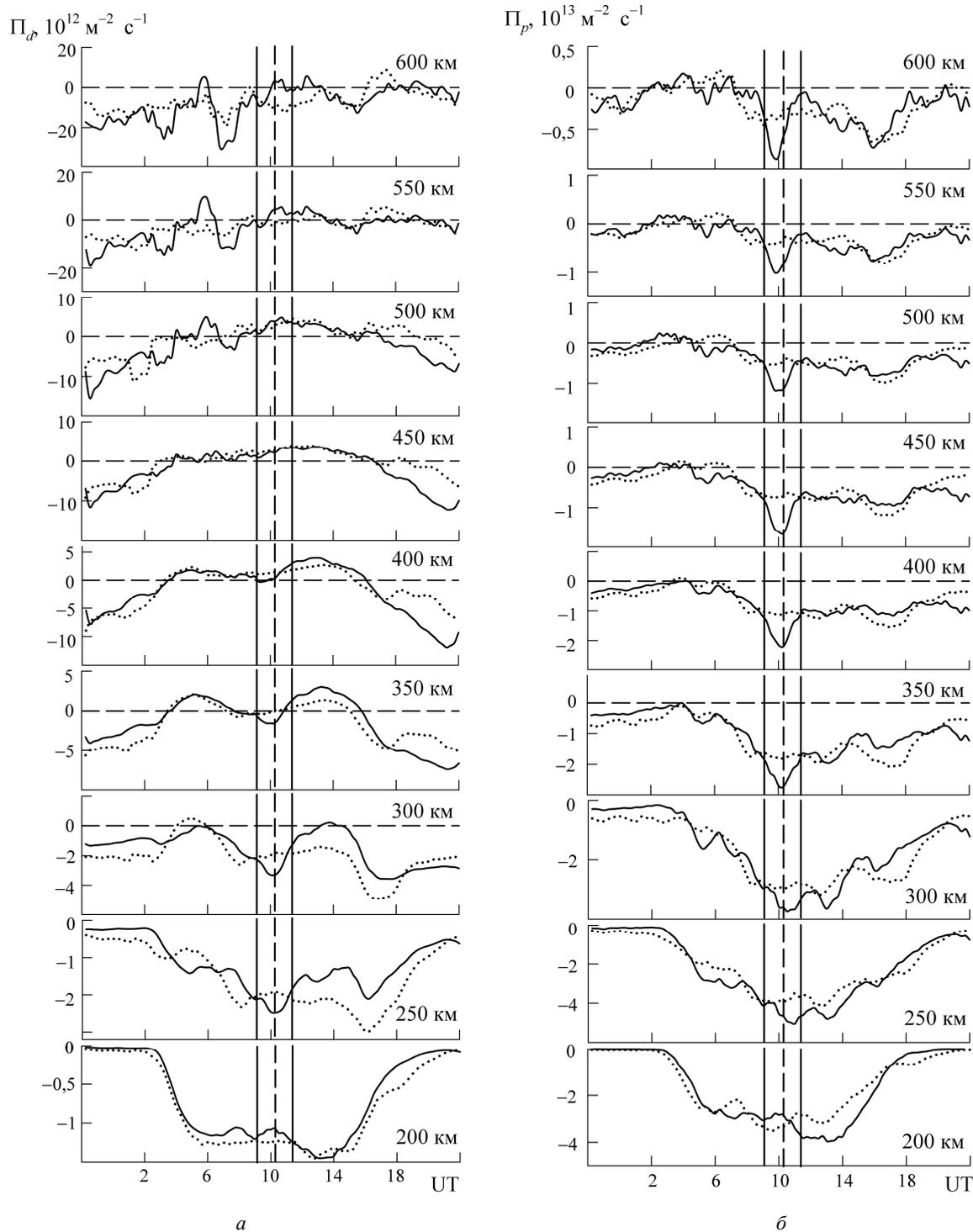


Рис. 6 – Временные вариации: *a* – плотности потока плазмы, вызванного диффузией, *б* – плотности общего потока плазмы в день С3 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и контрольные сутки 20 марта 2013 г. (точки).

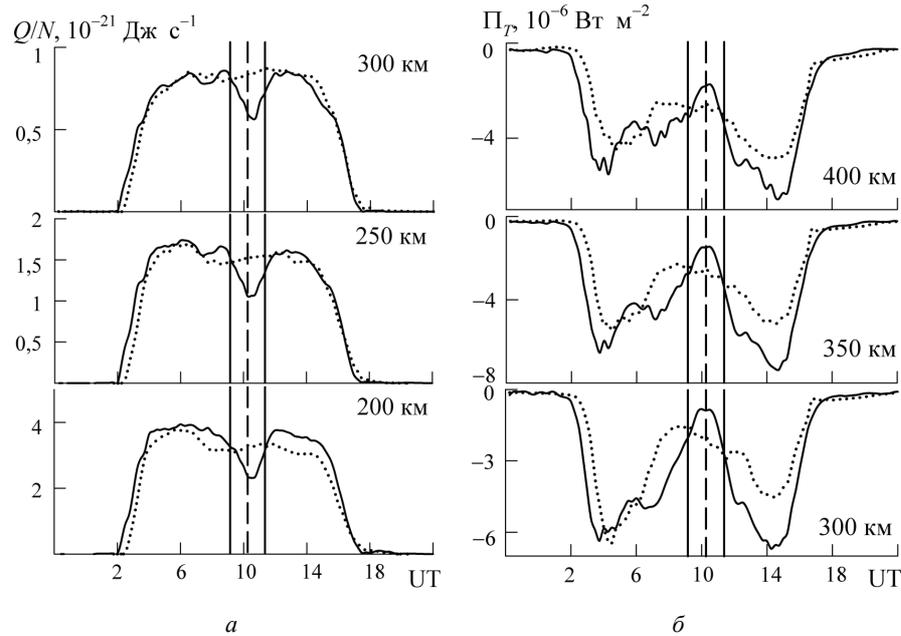


Рис. 7 – Временные вариации: *а* – величины энергии, подводимой к электронам, *б* – плотности потока тепла, переносимого электронами, в день СЗ 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и контрольные сутки 20 марта 2013 г. (точки)

Изменение плотности диффузионного потока плазмы  $P_d$  (рис. 6, *а*) составило примерно  $0.4 \cdot 10^{12}$ ,  $1.2 \cdot 10^{12}$ ,  $1.1 \cdot 10^{12}$  и  $0.8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  на высотах 250, 300, 350 и 400 км соответственно. Плотность полного потока плазмы  $P_p$  изменилась на  $0.85 \cdot 10^{13}$ ,  $0.77 \cdot 10^{13}$ ,  $1.16 \cdot 10^{13}$ ,  $1.17 \cdot 10^{13}$ ,  $0.94 \cdot 10^{13}$ ,  $0.77 \cdot 10^{13}$ ,  $0.91 \cdot 10^{13}$  и  $0.82 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  на высотах 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 и 600 км соответственно (рис. 6, *б*).

*Вариации параметров тепловых процессов в ионосфере.* Уменьшение величины энергии, подводимой к электронам, в момент максимального покрытия диска Солнца составило 32–34 % на высотах 200–300 км (рис. 7, *а*).

Уменьшение плотности потока тепла, переносимого электронами, при этом достигло 63, 50 и 42 % на высотах 300, 350 и 400 км соответственно (рис. 7, *б*).

#### Выводы.

1. Особенностью СЗ 20 марта 2015 г. было то, что оно наблюдалось на фоне релаксирующей геокосмической бури. Тем не менее, эффекты СЗ были заметны в вариациях параметров ионосферы.

2. Обнаружено, что в момент максимального покрытия Солнца высота максимума слоя F2 ионосферы увеличилась примерно на 40 км.

3. В вариациях критической частоты и концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы эффекты СЗ заметно маскировались ионосферной бурей. Изменения критической частоты были малосущественными (не более 12 %).

4. Эффекты СЗ были наиболее заметны в диапазоне высот 190–210 км. На высотах 190 и 210 км уменьшение концентрации электронов в максимальную фазу затмения составило примерно 19 и 17 % соответственно.

5. Уменьшение температуры электронов во время максимального покрытия диска Солнца составило

12.1, 12, 17.7, 17, 19.5, 19, 15.5 и 13.4 % на высотах 190, 210, 240, 290, 340, 410, 490 и 580 км соответственно.

6. В вариациях температуры ионов эффекты СЗ проявились слабо.

7. Как показали результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов, СЗ привело к существенному изменению динамического и теплового режимов в ионосфере.

8. Во время СЗ на высотах, больших 308 км, наблюдалось увеличение абсолютных значений скорости нисходящего движения ионосферной плазмы с максимумом вблизи момента максимальной фазы СЗ и последующим их восстановлением. Величина изменения скорости увеличивалась с ростом высоты, а наибольшее значение изменения (относительно данных контрольных суток и среднего значения  $V_z$  накануне и после СЗ) составило 19–55 м/с в диапазоне высот 363–583 км.

9. Характер высотного профиля  $V_z(h)$  во время максимальной фазы СЗ близок к характеру ночного профиля.

10. Изменение величины плотности потока, обусловленного диффузией плазмы, составило  $0.4 \cdot 10^{12}$ ,  $1.2 \cdot 10^{12}$ ,  $1.1 \cdot 10^{12}$  и  $0.8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  на высотах 250, 300, 350 и 400 км соответственно, тогда как плотность полного потока плазмы изменилась примерно на  $0.85 \cdot 10^{13}$ ,  $0.77 \cdot 10^{13}$ ,  $1.16 \cdot 10^{13}$ ,  $1.17 \cdot 10^{13}$ ,  $0.94 \cdot 10^{13}$ ,  $0.77 \cdot 10^{13}$ ,  $0.91 \cdot 10^{13}$  и  $0.82 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  на высотах 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 и 600 км соответственно.

11. Уменьшение величины энергии, подводимой к электронам, в момент максимального покрытия диска Солнца составило около 30 % на высотах 200–300 км. Уменьшение плотности потока тепла, переносимого электронами, при этом достигло 63, 50 и 42 % на высотах 300, 350 и 400 км соответственно.

## Список літератури

1. Черногор Л. Ф. Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография. / Л. Ф. Черногор, – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. – 480 с.
2. Борисов Б. Б. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. / Б. Б. Борисов, Д. А. Егоров, Н. Е. Егоров [и др.] // Геомагнетизм и аэронавтика. – 2000. – Т. 40, № 3. – С. 94–103.
3. Farges T. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network / T. Farges, J. C. Jodogne, R. Bamford [et al.] // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2001. – V. 63. – P. 915–924.
4. Le H. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling / H. Le, L. Liu, X. Yue, W. Wan // Annales Geophysicae. – 2008. – V. 18. P. 107–116.
5. Klobuchar J. A. Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse / J. A. Klobuchar, H. E. Whitney // J. Geophys. Res. – 1965. – V. 70, No. 5. – P. 1254–1257.
6. Cohen E. A. The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations / E. A. Cohen // Radio Sci. – 1984. – V. 19, No. 3. – P. 769–777.
7. Afraimovich E. L. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data / E. L. Afraimovich, K. S. Palamartchouk, N. P. Perevalova [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 1998. – V. 25, No. 4. – P. 465–468.
8. Huang C. R. A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse / C. R. Huang, C. H. Liu, K. C. Yeh [et al.] // J. Geophys. Res. – 1999. – V. 104(A1). – P. 79–94.
9. Hunter A. N. Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973 / A. N. Hunter, B. K. Holman, D. G. Fieldgate [et al.] // Nature. – 1974. – V. 250. – P. 205–206.
10. Evans J. V. An F Region Eclipse / J. V. Evans // J. Geophys. Res. – 1965. – V. 70. – P. 131–142.
11. Oliver W. L. The F1 region during a solar eclipse / W. L. Oliver, S. A. Bowhill // Radio. Sci. – 1974. – V. 9, No. 2. – P. 185–195.
12. Jakowski N. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005 / N. Jakowski, S. M. Stankov, V. Wilken [et al.] // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2008. – V. 70, No. 6. – P. 836–853.
13. Chen G. Enhancement and HF Doppler observations of sporadic E during the solar eclipse of 22 July 2009 / G. Chen, Z. Zhao, G. Yang [et al.] // J. Geophys. Res. – 2010. – V. 115. – P. A09325. DOI:10.1029/2010JA015530.
14. Chernogor L. F. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008 / L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – V. 50, No. 3. – P. 346–361.
15. Chernogor L. F. Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler Sounding Results / L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2012. – V. 52, No. 6. – P. 768–778, P. 779–792.
16. Chernogor L. F. Physical Processes in the Middle Ionosphere Accompanying the Solar Eclipse of January 4, 2011, in Kharkov / L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – V. 53, No. 1. – P. 19–31.
17. Farges T. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network / T. Farges, J. C. Jodogne, R. Bamford [et al.] // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2001. – V. 63. – P. 915–924.
18. Tomas A. T. Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP / A. T. Tomas, H. Luhr, M. Forster [et al.] // J. Geophys. Res. – 2007. – V. 112. – P. A06303. DOI:10.1029/2006JA012168.
19. Урядов В. П. О вариациях характеристик КВ сигнала на трассе наклонного зондирования во время солнечного затмения 11 августа 1999 г. / В. П. Урядов, А. М. Леонов, А. А. Понатов [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. – 2000. – Т. 43, № 8. С. 682–686.
20. Chernogor L. F. Variations in the Amplitude and Phase of VLF Radiowaves in the Ionosphere during the August 1, 2008, Solar Eclipse / L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – V. 50, No. 1. – P. 100–110.
21. Taran V. I. Investigation of circumterrestrial space by means of incoherent scatter radar / V. I. Taran, V. K. Bogovsky, V. N. Lysenko, Ye. I. Grigorenko, L. Ya. Emelyanov // Космічна наука і технологія, Space Plasma physics (додаток до журналу). – 2001. – Т. 7, № 2. – С. 36–41.
22. Yemelyanov L. Ya. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination / L. Ya. Yemelyanov, D. A. Dzyubanov // Telecommunications Radio Engineering. – 2007. – V. 66, No. 14. – P. 1313–1327.
23. Бурмака В. П. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. / В. П. Бурмака, Е. И. Григоренко, Л. Я. Емельянов, В. Н. Лысенко, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 3. – С. 38–53.
24. Grigorenko E. I. Effects of Solar Eclipse of March 29, 2006, in the Ionosphere and Atmosphere / E. I. Grigorenko, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2008. – V. 48, No. 3. – P. 337–351.
25. Дзюбанов Д. А. Динамика плазмы ионосферы над Харьковом в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. / Д. А. Дзюбанов, Л. Я. Емельянов, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 62–69.
26. Емельянов Л. Я. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений / Л. Я. Емельянов, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 70–81.
27. Chernogor L. F. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, M. V. Lyashenko // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32, No. 11. – P. 3219–3229.
28. Domin I. F. Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse / I. F. Domin, L. Ya. Emelyanov, L. F. Chernogor // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2012. – V. 3, No. 4. – P. 311–324.
29. Domin I. F. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of Incoherent Scatter Observations / I. F. Domin, L. Ya. Yemelyanov, D. V. Kotov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – V. 53, No. 1. – P. 113–123.
30. Lyashenko M. V. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation Results and discussion / M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – V. 53, No. 3. – P. 367–376.
31. Domin I. F. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkov: Observation and simulation results / I. F. Domin, L. Ya. Emelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – V. 54, No. 5. – P. 583–592.
32. Domin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Domin, Ya. M. Chepurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.] // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2014. – No. 47 (1089). – P. 28–42.

## References (transliterated)

1. Chernogor L. F. *Fizicheskie jeffekty solnechnyh zatmenij v atmosfere i geokosmose: Monografija*. [Physical effects of solar eclipses in the atmosphere and Geospace: Monograph.]. Kharkiv, KhNU im. V.N. Karazina, 2013. 480 p.
2. Borisov B. B., Egorov D. A., Egorov N. E. et al. *Kompleksnoe eksperimental'noe issledovanie reakcii ionosfery na solnechnoe zatmenie 9 marta 1997 g.* [Complex experimental study of ionospheric response to solar eclipse of March 9, 1997]. *Geomagnetizm i ajeronomija* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2000, vol. 40, no. 3, pp. 94–103.
3. Farges T., Jodogne J. C., Bamford R. et al. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2001, vol. 63, pp. 915–924.
4. Le H., Liu L., Yue X., Wan W. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling. *Annales Geophysicae*. 2008, vol. 18, pp. 107–116.
5. Klobuchar J. A., Whitney H. E. Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse. *J. Geophys. Res.* 1965, vol. 70, no. 5, pp. 1254–1257.
6. Cohen E. A. The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations. *Radio Sci.* 1984, vol. 19, no. 3, pp. 769–777.
7. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P. et al. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced

- from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 1998, vol. 25, no. 4, pp. 465–468.
8. Huang C. R., Liu C. H., Yeh K. C. et al. A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 1999, vol. 104(A1), pp. 79–94.
  9. Hunter A. N., Holman B. K., Fieldgate D. G. et al. Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973. *Nature.* 1974, vol. 250, pp. 205–206.
  10. Evans J. V. An F Region Eclipse / J. V. Evans // *J. Geophys. Res.* – 1965. – V. 70. – P. 131–142.
  11. Oliver W. L., Bowhill S. A. The F1 region during a solar eclipse. *Radio. Sci.* 1974, vol. 9, no. 2, pp. 185–195.
  12. Jakowski N., Stankov S. M., Wilken V. et al. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2008, vol. 70, no. 6, pp. 836–853.
  13. Chen, G. Zhao Z., Yang G. et al. Enhancement and HF Doppler observations of sporadic E during the solar eclipse of 22 July 2009. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, pp. A09325. DOI:10.1029/2010JA015530.
  14. Chernogor L. F. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2010, vol. 50, no. 3, pp. 346–361.
  15. Chernogor L. F. Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler Sounding Results. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2012, vol. 52, no. 6, pp. 768–778.
  16. Chernogor L. F. Physical Processes in the Middle Ionosphere Accompanying the Solar Eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, no. 1, pp. 19–31.
  17. Farges T., Jodogne J. C., Bamford R. et al. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2001, vol. 63, pp. 915–924.
  18. Tomas A. T., Luhr H., Forster M. et al. Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, p. A06303. DOI:10.1029/2006JA012168.
  19. Urjadov V. P., Leonov A. M., Ponjatov A. A. i dr. O variacijah karakteristik KV signala na trasse naklonnogo zondirovanija vo vremja solnechnogo zatmenija 11 avgusta 1999 g. [On variations of the characteristics of the HF signal on a line oblique sounding during a solar eclipse August 11, 1999]. *Izv. vuzov. Radiofizika.* [Proceedings of Higher Education. Radiophysics]. 2000, vol. 43, no. 8, pp. 682–686.
  20. Chernogor L. F. Variations in the Amplitude and Phase of VLF Radiowaves in the Ionosphere during the August 1, 2008, Solar Eclipse. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2010, vol. 50, no. 1, pp. 100–110.
  21. Taran V. I., Bogovsky V. K., Lysenko V. N., Grigorenko Ye. I., Emelyanov L. Ya. Investigation of circumterrestrial space by means of incoherent scatter radar. *Kosmichna nauka i tehnologija.* [Space Plasma physics]. 2001, vol. 7, no. 2, pp. 36–41.
  22. Yemelyanov L. Ya., Dzyubanov D. A. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination. *Telecommunications Radio Engineering.* 2007, vol. 66, no. 14, pp. 1313–1327.
  23. Burmaka V. P., Grigorenko E. I., Emel'janov L. Ja., Lysenko V. N., Ljashenko M. V., Chernogor L. F. Radarnye nabljudenija jeffektov v geokosmose, vyzvannyh chastnym solnechnym zatmeniem 29 marta 2006 g. [Radar observations Geospace effects caused by the partial solar eclipse of March 29, 2006]. *Uspehi sovremennoj radioelektroniki* [Advances of Modern Radioelectronics]. 2007, no. 3, pp. 38–53.
  24. Grigorenko E. I., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Effects of Solar Eclipse of March 29, 2006, in the Ionosphere and Atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2008, vol. 48, no. 3, pp. 337–351.
  25. Dzyubanov D. A., Emel'janov L. Ja., Chernogor L. F. Dinamika plazmy ionosfery nad Har'kovom v period solnechnogo zatmenija 1 avgusta 2008 g. [The dynamics of the ionospheric plasma over Kharkov during the solar eclipse on August 1, 2008]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space science and technology]. 2009, vol. 15, no. 3, pp. 62–69.
  26. Emel'janov L. Ja., Ljashenko M. V., Chernogor L. F. Jeffekty v geokosmicheskoj plazme vo vremja chastnogo zatmenija Solnca 1 avgusta 2008 g. nad Har'kovom. 1. Rezul'taty nabljudenij [Effects in geospatial plasma during a partial solar eclipse August 1 2008 on Kharkov. 1. Observation results]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space science and technology]. 2009, vol. 15, no. 3, pp. 70–81.
  27. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lyashenko M. V. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *International Journal of Remote Sensing.* 2011, vol. 32, no. 11, pp. 3219–3229.
  28. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse. *Radio Physics and Radio Astronomy.* 2012, vol. 3, no. 4, pp. 311–324.
  29. Domnin I. F., Yemelyanov L. Ya., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of Incoherent Scatter Observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, no. 1, pp. 113–123.
  30. Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation Results and discussion. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, no. 3, pp. 367–376.
  31. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and simulation results. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014, vol. 54, no. 5, pp. 583–592.
  32. Domnin I. F., Chepurny Ya. M., Emelyanov L. Ya. et al. Kharkiv Incoherent Scatter Facility. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Politechnic Institute". Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere.* Kharkiv, NTU "KhPI", 2014, no. 47 (1089), pp. 28–42.

Поступила (received) 14.09.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Реакція іоносфери на сонячне затемнення 20 березня 2015 р над Харковом / І. Ф. Домнін, Л. Я. Ємельянов, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор // – Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 63–72. – Бібліогр.: 32 назв. – ISSN 2078-9998.**

**Реакция ионосферы на солнечное затмение 20 марта 2015 г. над Харьковом / И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Харьков : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 63–72. – Библиогр.: 32 назв. – ISSN 2078-9998.**

**Reaction of the ionosphere on solar eclipse of March 20, 2015 over Kharkov / I. F. Domnin, L. Ya. Emelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 63–72. – Bibliogr.: 32. – ISSN 2078-9998.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Домнін Ігор Феліксович** – доктор технічних наук, професор, Інститут іоносфери, директор, м. Харків; тел. 057-706-22-87; e-mail: domninpro@ukr.net.

**Домнин Игорь Феликсович** – доктор технических, профессор, Институт ионосферы, директор, г. Харьков; тел. 057-706-22-87; e-mail: domninpro@ukr.net.

**Domnin Igor Feliksovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Institute of Ionosphere, Director, Kharkiv; tel. 057-706-22-87; e-mail: domninpro@ukr.net.

**Ємельянов Леонід Якович** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери, завідувач відділу, м. Харків, тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

**Емельянов Леонид Яковлевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ионосферы, заведующий отделом, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

**Emelyanov Leonid Yakovlevich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Ionosphere, Head of Department, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

**Ляшенко Михайло Володимирович** кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери, вчений секретар, м. Харків, тел.: 706-22-87; e-mail: mlyashenko@ya.ru.

**Ляшенко Михаил Владимирович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ионосферы, ученый секретарь, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: mlyashenko@ya.ru.

**Lyashenko Mykhaylo Volodymyrovych** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Ionosphere, Scientific Secretary, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: mlyashenko@ya.ru.

**Чорногор Леонід Феоктистович** – доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний університет імені В. Н. Карабіна, професор кафедри космічної радіофізики, м. Харків; тел. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

**Черногор Леонид Феоктистович** – доктор физико-математических наук, профессор, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, профессор кафедры космической радиофизики, г. Харьков; тел. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

**Chernogor Leonid Feoktistovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, V. N. Karazin Kharkiv National University, Professor at the Department of Space Radiophysics, Kharkiv; tel. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.