

УДК 551.510.535: 550.388.2

Л. Я. Емельянов¹, И. Б. Скляр¹, Л. Ф. Черногор²

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

² Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 1 АВГУСТА 2008 г.: РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Описано результати спостереження за динамікою іоносфери на висотах 100–200 км протягом часткового (покриття 0.42) сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. поблизу м. Харкова. Затемнення викликало перебудову іоносфери на всіх висотах від денних до нічних умов, а потім — до денних. Критична частота шару F1 зменшилася на 10 %, а шару F2 — на 17 %. Запізнення цих варіацій відносно фази покриття сонячного диску склало 0 і 15 хв відповідно. Діюча висота відбиття сигналу поблизу максимуму іонізації шару F2 значно зростає (на 100–200 км). Зафіксовано зменшення електронної концентрації та підсилення квазіперіодичних варіацій (з періодом близько 75 хв) протягом сонячного затемнення на всіх висотах, що спостерігалися.

ВВЕДЕНИЕ

Эффекты солнечного затмения (СЗ) в ионосфере изучаются давно. Для этой цели используются различные методы: оптические [1–4, 26], частичных отражений [7, 17, 25], вертикального зондирования (ВЗ) [5, 7–10, 15, 16, 20, 27], доплеровского зондирования [3, 10, 21, 39], некогерентного рассеяния (НР) [2–4, 12–14, 18–19, 29, 36, 37, 41, 43, 44], спутниковые методы [5, 6, 28, 35, 42] и др. [23, 30–34, 38, 40]. Наиболее полную информацию о процессах в ионосфере в широком диапазоне высот (100–1000 км) получают при помощи метода НР [2–4, 12–14, 18–19, 36, 37, 43]. К сожалению, радаров НР мало (не более 10), и расположены они в основном на американском континенте. К тому же эти радары включаются лишь в определенные периоды времени, что связано с большим энергопотреблением. Значительный объем информации об ионосфере получен при помощи ионозондов. Ионозонды отличаются простотой, низкой стоимостью и практически непрерывным режимом наблюдений. Существует мировая сеть ионозондов.

По указанным причинам метод ВЗ давно применяется для наблюдения эффектов затмений в ионосфере [9, 10, 15, 16, 20, 27]. Такие

исследования остаются актуальными и сегодня [5, 7, 8].

В цитируемых работах исследовались временные вариации ряда параметров ионограмм. При этом установлено, что СЗ приводит к их заметным возмущениям. Наибольшие возмущения имеют место в F-области ионосферы. При полном или близком к нему затмении критическая частота f_oF2 уменьшалась на 1–2.8 МГц, а концентрация N электронов — в 1.5–2.3 раза. Действующая высота отражения h' при этом увеличивалась на 10–40 км. Эффекты в слое F1 (если он был) выражены несколько меньше, чем в слое F2. Наименьшие изменения происходят в области E, однако и они в ряде случаев были регистрируемые. Время запаздывания Δt вариаций в слое F1 по отношению к моменту наступления главной фазы затмения составляло 10–25 мин, а в области E — 12 мин. Общая длительность возмущений составляла 2–2.5 ч. Иногда во временных вариациях f_oF2 регистрировались квазіперіодическіе варіації, но вони не обов'язательно были связаны с затмением [9].

Цель настоящей работы — изложение результатов наблюдения методом ВЗ за перестройкой ионосферы в период частного СЗ 1 августа 2008 г. вблизи г. Харькова. Это затмение существенно отличается от других затмений, наблюдававшихся в этой же местности последние 10 лет, тем, что оно происходило в условиях глубокого миниму-

ма солнечной активности. Естественно было ожидать, что и реакция ионосферы на СЗ будет иметь свои особенности.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Краткие сведения о затмении. СЗ началось в 08:04 1 августа 2008 г (здесь и далее мировое время) в северной части Канады, а закончилось в 12:38 в Китае. Центральная линия затененной области пересекла Гренландию, Арктику, Новую Землю, Центральную Россию (города Надым, Нижневартовск, Барнаул и др.), Монголию и Китай. Ширина этой области составляла 237 км, а скорость ее движения – около 900 м/с. В месте измерений (вблизи г. Харькова) покрытие диаметра диска Солнца достигало 0.42. При этом максимальная затененная площадь диска составляла около 31.1 %. СЗ началось в 09:11, а закончилось в 11:17, главная фаза наступила в 10:15.

Состояние космической погоды. Охарактеризуем кратко состояние космической погоды в период с 29 июля по 4 августа 2008 г., которую удобно описывать в терминах временных вариаций плотностей потоков протонов и электронов, межпланетного магнитного поля, H_p -компонента геомагнитного поля, а также индексов авроральной и магнитной активностей (AE , K_p и D_{st}).

Затмению предшествовало малосущественное магнитное возмущение (индекс K_p изменялся от 0 до 2). Незначительными были вариации плотности потока протонов. Плотность потока электронов изменялась по квазипериодическому закону с периодом около 1 сут в пределах $(2-5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$. Компонент B_z хаотически варьировал в пределах 2–3 нТл. Малосущественными были флуктуации уровня B_t (около ± 1 нТл). Достаточно упорядоченными с периодом в 1 сут были вариации H_p -компонента геомагнитного поля (в пределах 50 нТл). Значения индекса D_{st} также хаотически флуктуировали в пределах $\pm(3-5)$ нТл. Вариации индекса AE были незначительными, но иногда достигали 300 нТл.

Таким образом, день затмения был спокойным. Это обстоятельство существенно облегчило идентификацию возмущений, связанных с СЗ.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Наблюдения ионосферы осуществлялись с помощью модифицированного ионозонда «Базис». Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы ($49^{\circ}36'$ с.ш., $36^{\circ}18'$ в.д.) вблизи г. Харькова. Он позволяет проводить вертикальное, наклонное и трансionoсферное зондирование и получать высотно-частотные характеристики ионосферы в диапазоне частот при вертикальном зондировании от 0.3 до 20 МГц, дистанционно-частотные при наклонном зондировании от 0.3 до 40 МГц, трансionoграммы в диапазоне от 0.3 до 15.95 МГц. Частота зондирования изменяется линейно с дискретным шагом от 1 до 100 кГц и возможностью выбора начальной частоты зондирования. Количество рабочих частот в одном сеансе зондирования – 400. Количество импульсов, последовательно излучаемых на каждой из 400 частот, составляет 2^m ($m = 0, 1, \dots, 8$). Приемная и передающая антенны станции идентичны и расположены ортогонально. Каждая из антенн состоит из двух широкополосных вертикальных ромбов. Малый ромб работает в диапазоне частот 6–20 МГц, большой – 0.3–6 МГц. Переключение антенн производится антенным коммутатором. Передатчик ионозонда «Базис» работает в диапазоне частот 0.3–20 МГц. Выходная мощность составляет 10 кВт, длительность излучаемого импульса – 100 мкс. Частота следования импульсов может изменяться от 3.125 до 25 Гц. Передатчик представляет собой мощный импульсный усилитель с сеточной модуляцией. Приемное устройство ионозонда «Базис» создано на основе супергетеродина с многократным преобразованием частоты: в диапазоне частот от 0.3 до 2.3 МГц с двойным преобразованием, от 2.3 до 40 МГц – с тройным. Погрешность отсчета частоты на ионограммах не хуже 0.1 МГц, а критической частоты области F – 0.05 МГц.

В данном эксперименте последовательные зондирования ионосферы осуществлялись через $\Delta = 15$ мин. При равномерном законе распределения моментов наступления реакции среды на СЗ временные отсчеты определялись с дисперсией $\sigma^2 = \Delta^2/12$. При этом $\sigma \approx 4.3$ мин.

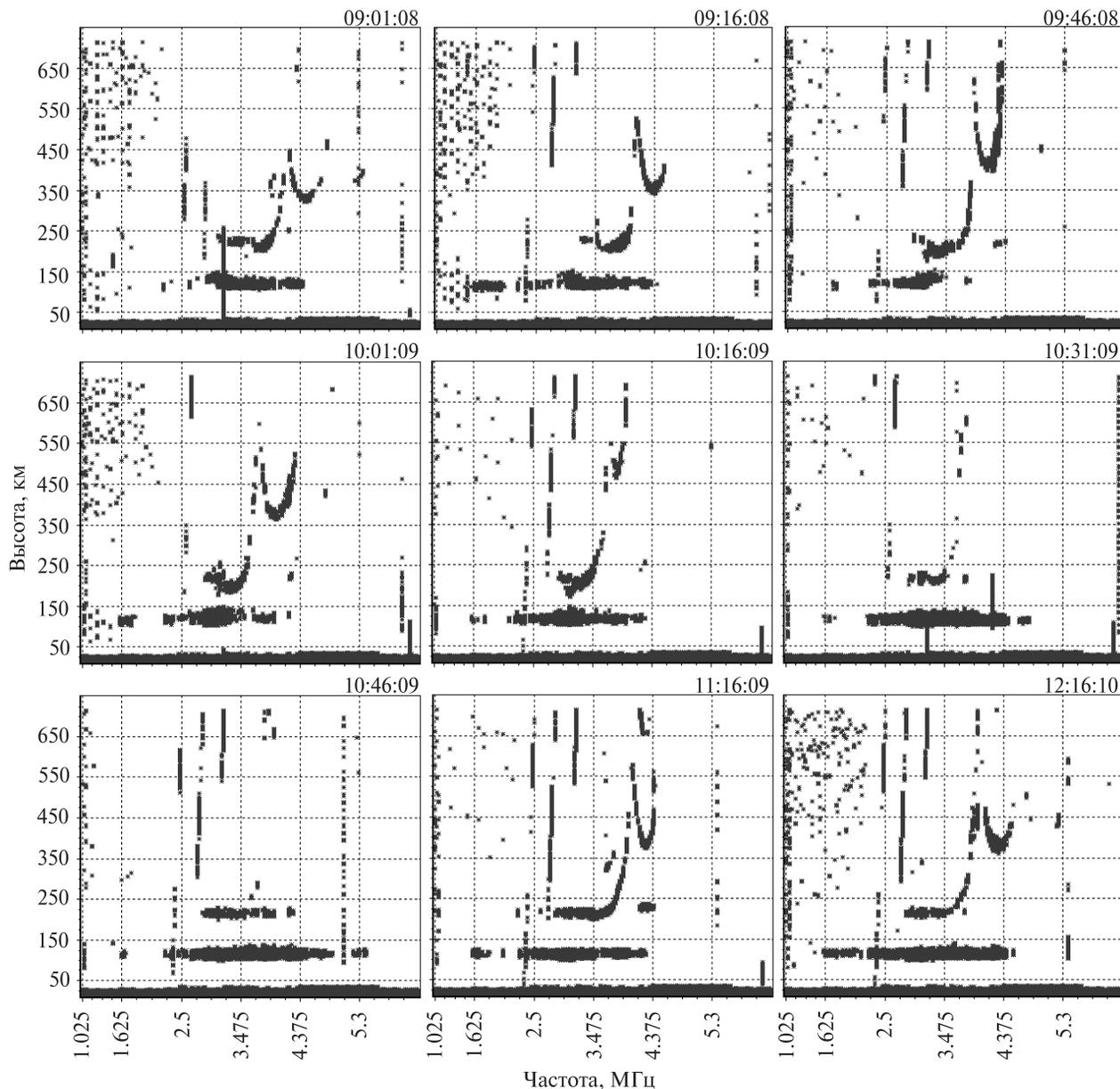


Рис. 1. Ионограммы до, в период (09:11–11:17) и после окончания солнечного затмения 1 августа 2008 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Описание ионограмм. На рис. 1 представлены некоторые наиболее характерные ионограммы, полученные перед, в период и после окончания СЗ 1 августа 2008 г., а на рис. 2 – ионограммы, полученные в те же моменты времени в контрольный день 2 августа 2008 г., когда не было значитель-

ных возмущений в ионосфере. По шкале вертикальной оси, как обычно, обозначены действующие высоты отражения зондирующего сигнала. Отметим, что и 1 августа, и 2 августа 2008 г. на протяжении практически всех измерений регистрировался слой E_s (см. рис. 1 и 2), который частично экранировал исследуемую область ионосферы, что, к сожалению, затрудняло получение

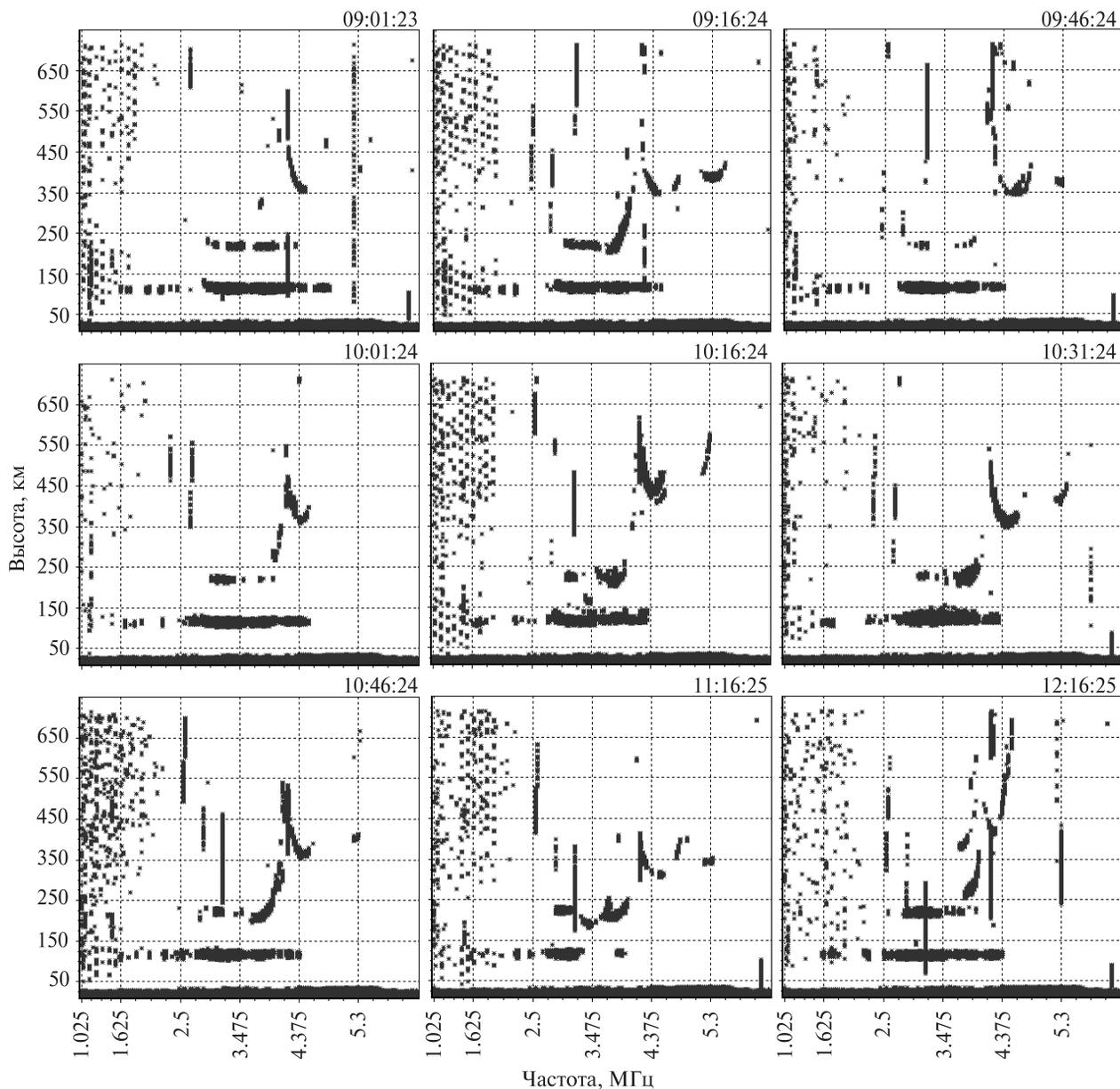


Рис. 2. Ионogramмы, полученные в контрольный день 2 августа 2008 г.

качественных высотно-частотных характеристик. Несмотря на это, имеющиеся ионogramмы позволили достаточно адекватно оценить результаты воздействия СЗ на исследуемые параметры.

Из рис. 1 видно, что до наступления СЗ ионосфера была спокойной. Ионogramмы, полученные в 9:01 (до СЗ) и 9:16 (т. е. через 4 мин после начала СЗ), отличаются еще незначитель-

но – наблюдается лишь слабое изменение следа отражения от слоя F2. На ионogramме в 9:46 заметно увеличилась действующая высота слоя F2, произошло уменьшение критических частот слоев F2 и F1 (f_0F2 и f_0F1 соответственно). Особенно заметные изменения ионogramм произошли вблизи главной фазы СЗ, которая наступила в 10:15 (см. ионogramмы, полученные в

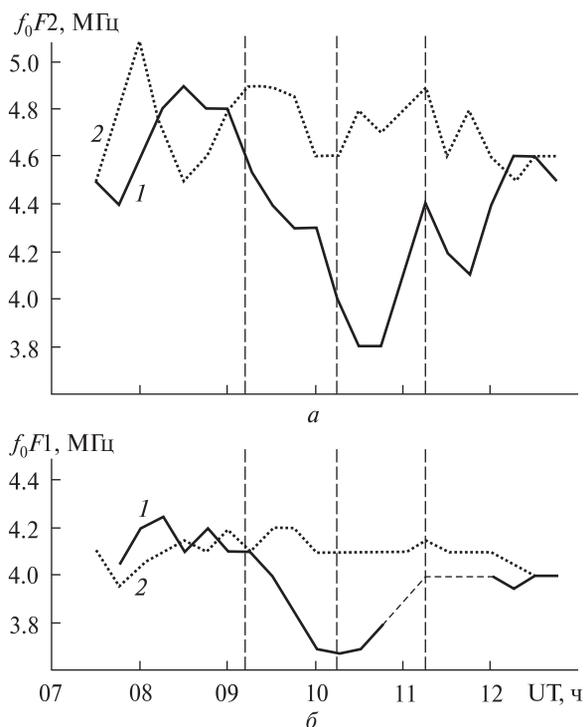


Рис. 3. Временные вариации критических частот f_0F2 (а) и f_0F1 (б): 1 – в день СЗ 1 августа 2008 г., 2 – в контрольный день 2 августа 2008 г.

10:16 и 10:31). Видно, что действующая высота увеличилась по сравнению с началом СЗ приблизительно на 200 км, значительно уменьшилась f_0F2 , частота f_0F1 также достигла своего минимума. В 10:31 значения критических частот слоев F2 и F1 наиболее близки, и оба слоя (F2 и F1) почти слились в один слой, что характерно для ночных условий. В 10:46 слой E_s в большой степени экранировал исследуемые области ионосферы, однако при скрупулезной обработке цифровых данных можно получить сведения о параметрах ионограммы. Приблизительно в момент окончания СЗ ионограмма (в 11:16) по своему характеру приблизилась к ионограммам до СЗ, однако увеличивающаяся по мере открывания солнечного диска частота f_0F2 еще не достигла своего невозмущенного затмением значения. В то же время действующая высота слоя F2 после ее уменьшения приблизилась к своему первоначальному значению (отличие составляло не более 20–30 км). Ионограмма, полученная

в 12:16, свидетельствует о том, что через час после окончания СЗ вид ионограммы и ее параметры вернулись к состоянию, предшествующему моменту начала затмения.

Результаты вертикального зондирования в контрольный день 2 августа 2008 г., представленные на рис. 2, показывают, что в тот же самый период измерений отличия ионограмм незначительны как между собой, так и по сравнению с ионограммами, полученными 1 августа до начала и после окончания влияния СЗ. Этого и следовало ожидать в околополуденное время при невозмущенной ионосфере. Отметим, что в качестве эталонов для качественного сравнения ионограммы мы выбрали характер следов F1 и F2.

Таким образом, в результате качественного анализа ионограмм можно сделать вывод о заметном влиянии СЗ на характер и параметры ионограмм.

Временные вариации критических частот. На рис. 3 представлены временные вариации критических частот области F ионосферы: f_0F2 и f_0F1 . Сплошной линией 1 обозначены вариации параметров ионосферы в день солнечного затмения 1 августа 2008 г., а пунктирной линией 2 – в контрольный день 2 августа 2008 г. Три вертикальными линиями обозначены моменты начала, главной фазы и окончания затмения. Из рис. 3, а видно, что до затмения f_0F2 изменялась в пределах от 4.4 до 4.85 МГц. По мере покрытия диска Солнца значения f_0F2 уменьшались от 4.6 до 3.8 МГц. Им соответствовало уменьшение концентрации электронов от $N \approx 2.6 \cdot 10^{11}$ до $N_{\min} \approx 1.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Максимальное значение $\delta f_0F2 \approx 0.8$ МГц. При этом уменьшение концентрации электронов составило $\Delta N = 0.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $N_{\min} / N \approx 0.68$ и $\delta_N = \Delta N / N \approx 32\%$. С учетом погрешности измерения f_0F2 имеем $\delta_N = 32 \pm 3\%$. Отметим, что минимальное значение f_0F2 , а значит и электронной концентрации в максимуме слоя F2, наблюдалось в 10:31, т. е. с задержкой 14 ± 4.3 мин по отношению к моменту главной фазы СЗ.

После главной фазы СЗ значения f_0F2 изменялись по квазипериодическому закону. Величина квазипериода $T \approx 75$ мин, а амплитуда $\delta f_0F2 = 0.2$ МГц. При этом $\delta_N = 10\%$. Продолжи-

тельность этого процесса была около 2 ч, и полное восстановление частоты f_0F2 произошло около 12:16, т. е. приблизительно через час после завершения СЗ.

В контрольный день подобного уменьшения значений f_0F2 (и электронной концентрации) не наблюдалось. Отметим, что данные измерений f_0F2 до начала СЗ и после окончания реакции критической частоты на СЗ близки к значениям f_0F2 , полученным в соответствующие моменты времени в контрольный день.

Критическая частота слоя F1 (f_0F1) претерпела меньшие вариации по сравнению с f_0F2 (рис. 3, б). Уменьшение f_0F1 началось с момента начала покрытия диска Солнца. Частота f_0F1 снизилась приблизительно на $\delta f_0F1 \approx 0.4$ МГц (с 4.1 до 3.7 МГц). Это соответствует уменьшению электронной концентрации на $\Delta N = 4.2 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Минимального значения $N \approx 1.6 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$ достигла в момент главной фазы СЗ. При этом в слое F1 отмечалось $N_{\min} / N \approx 0.81$, $\delta_N = \Delta N / N \approx 18.6 \pm 2.5$ %. В некоторые моменты времени данные измерений f_0F1 определить не удалось из-за мощного слоя E_s , однако значение f_0F1 в 11:16, равное 4.0 МГц, свидетельствует о том, что критическая частота f_0F1 к моменту завершения СЗ достигла своего значения, близкого к невозмущенному затмением.

В контрольный день частота f_0F1 в рассматриваемый период времени практически не изменялась и составляла 4.1 ± 0.1 МГц.

Временные вариации действующих высот. Временные вариации действующих высот вблизи максимума ионизации слоя F2 в день СЗ 1 августа 2008 г. и в контрольный день 2 августа 2008 г. показаны на рис. 4. Видно, что покрытие солнечного диска сопровождалось увеличением действующей высоты $h'(f_0F2)$ от первоначального значения, равного приблизительно 400 км, до 530 км и более в момент главной фазы СЗ (10:16). Особенно интенсивное возрастание $h'(f_0F2)$ произошло с 10:01 до 10:31 (на рисунке показано штриховой линией). В момент времени 10:46 высоту $h'(f_0F2)$ определить не удалось, а с 11:01 до 11:31 (т. е. до окончания СЗ) произошло снижение значений $h'(f_0F2)$ до невозмущенного затмением уровня. Следует отметить, что в

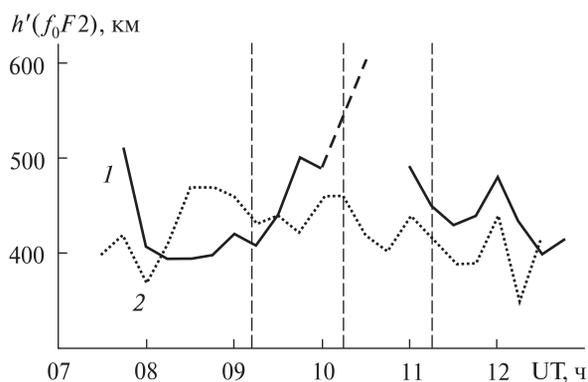


Рис. 4. Временные вариации действующей высоты $h'(f_0F2)$ отражения вблизи максимума ионизации слоя F2: 1 — в день СЗ 1 августа 2008 г., 2 — в контрольный день 2 августа 2008 г.

контрольный день 02.08.08 высоты $h'(f_0F2)$ изменялись незначительно ($h'(f_0F2) \approx 420 \pm 50$ км).

Временные вариации концентрации электронов на различных действующих высотах. На рис. 5 показаны временные зависимости электронной концентрации N на нескольких действующих высотах в день затмения 1 августа 2008 г. (точки) и в контрольный день 2 августа 2008 г. (кружки). Значения N получены из значений измеренных с помощью ионозонда плазменных частот. Видно, что во время СЗ на всех действующих высотах наблюдаются близкие по своему характеру временные вариации $N(t)$. Сразу после начала СЗ происходит уменьшение электронной концентрации от $2.5 \cdot 10^{11}$ до $1.7 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Минимум N наблюдается около 10:30, т. е. через 15.0 ± 4.3 мин после наступления главной фазы СЗ. Максимальное уменьшение N равно приблизительно $0.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, что составляет 32 %. По мере открывания солнечного диска электронная концентрация увеличивалась, достигнув значения $2.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ в 11:16, т. е. к концу СЗ. На действующих высотах 400 и 450 км отчетливо виден незначительный минимум N (около $2.0 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$), а к 12:31 произошло восстановление значений N , близких к тем, что наблюдались до СЗ ($2.5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$). После наступления главной фазы СЗ на всех действующих высотах проявлялись квазипериодические изменения электронной концентрации.

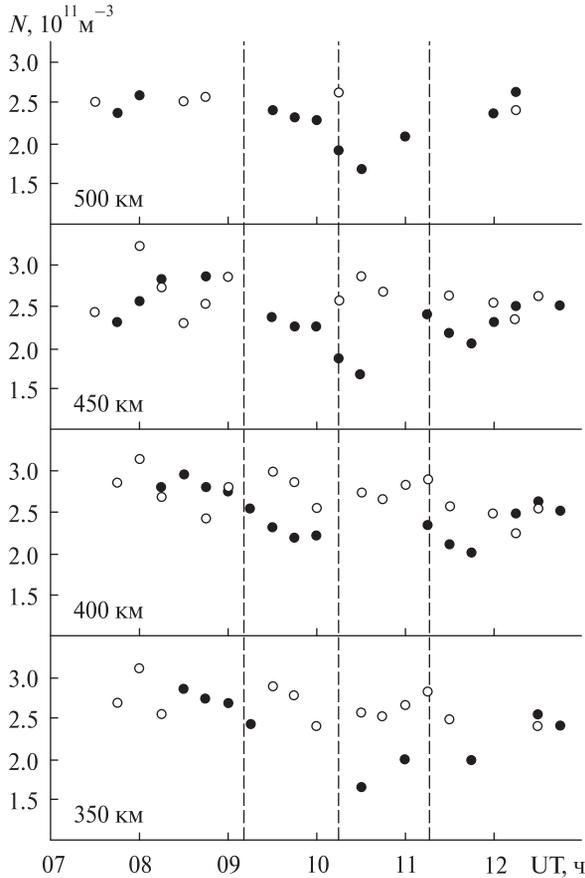


Рис. 5. Временные вариации электронной концентрации N на фиксированных действующих высотах h' : темные кружки – в день СЗ 1 августа 2008 г., светлые кружки – в контрольный день 2 августа 2008 г.

В контрольный день 2 августа 2008 г. на протяжении рассматриваемого периода значения N не претерпевали существенных изменений, подобных выше описанным, и были довольно близки к значениям N в соответствующие моменты до и после СЗ 1 августа 2008 г.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вариации параметров ионограмм. Анализ ионограмм, полученных перед, в течение и после СЗ показал, что имели место значительные вариации всех параметров ионограммы. Наличие слоя E_s затрудняло наблюдение эффектов, вызванных затмением. Тем не менее, уверенно наблюдалось уменьшение критических частот сло-

ев F1 и F2, достигавшее 0.4 и 0.8 МГц соответственно. После окончания затмения критические частоты практически вернулись к своим значениям, которые предшествовали СЗ. Минимальные значения f_0F1 и f_0F2 регистрировались с задержкой по отношению к моменту наступления главной фазы затмения, близкой с точностью до σ к 0 и 15 мин. Одновременно с вариациями f_0F1 и f_0F2 наблюдалось сначала увеличение на 130 и более километров действующей высоты $h'(f_0F2)$, а затем ее уменьшение на такое же значение. Примечательно, что вблизи моментов наступления главной фазы СЗ слои F1 и F2 слились в один слой, что свойственно ночной ионосфере.

Таким образом, даже относительно слабое затмение вызывает перестройку ионосферы сначала к «ночным» условиям, а затем в обратном направлении.

Кроме указанных вариаций, происходили квазипериодические изменения параметров ионограмм, свидетельствующие о том, что СЗ сопровождалось усилением волновой активности в ионосфере.

Такое поведение ионограмм является достаточно типичным для периодов СЗ и в целом соответствует результатам предыдущих наблюдений [7–10, 15, 16, 20, 27].

Вариации концентрации электронов. Рассмотрим подробнее высотное-временные вариации N , сопутствующие СЗ.

С учетом процессов образования электронов и ионов, их рекомбинации и движения плазмы в вертикальном направлении со скоростью V_z для среднеширотной ионосферы уравнение непрерывности для N имеет вид [11]

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(NV_z) = q(t) - L, \quad (1)$$

где q – скорость ионизации, L – скорость потерь электронов.

При низкой солнечной активности высота максимума слоя F2 не превосходит 200 км. На высотах $z \leq 200$ км движением плазмы можно пренебречь, на этих высотах роль процессов ионизации и рекомбинации становится главной [11]. Тогда (1) сводится к уравнению

$$\frac{dN}{dt} = q(t) - L. \quad (2)$$

Здесь $q(t) = q_0[1 - A(t)]$, $A(t) = S(t)/S_0$ – функция покрытия диска Солнца, S – площадь затененной части диска Солнца, S_0 – площадь последнего.

Поскольку характерное время солнечного затмения $t_e \approx 63$ мин намного превышает время рекомбинационных процессов на высотах $z \leq 200$ км, соотношение (2) можно заменить выражением

$$q \approx L. \quad (3)$$

В максимуме слоя F2 скорость потерь [11] равна

$$L = \beta N, \quad (4)$$

где β – коэффициент потерь. Полагая, что в течение СЗ коэффициент β изменяется несущественно, из (3), (4) получим

$$\frac{N}{N_0} = \frac{q}{q_0} = 1 - A \equiv B. \quad (5)$$

Здесь $B(t) = 1 - A(t)$, N_0 – значение N при отсутствии СЗ.

Вблизи главной фазы $A_{\max} \approx 0.311$, $B_{\min} \approx 0.689$. Тогда расчетное значение

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = 0.689.$$

При этом $\Delta N/N_0 = 1 - N_{\min}/N_0 = 0.311 \approx 31\%$. Это значение хорошо согласуется с экспериментально полученным значением $\delta_N = 32 \pm 3\%$.

Рассмотрим слой F1. В максимуме этого слоя [11]

$$L = \alpha N^2, \quad (6)$$

где α – коэффициент рекомбинации электронов с молекулярными ионами. Из (3) и (6) получим

$$\frac{N}{N_0} = \sqrt{\frac{q}{q_0}} = \sqrt{B}. \quad (7)$$

Соотношение (7) предполагает, что в течение затмения α изменяется несущественно. При $B_{\min} = 0.689$ имеем $N_{\min}/N_0 \approx 0.83$, $\Delta N/N_0 \approx 0.17 = 17\%$. Это значение близко к значению $\delta_N = 18.6 \pm 2.5\%$, полученному экспериментально.

Обсудим времена становления N . Исходя из высотной зависимости β [24], можно показать, что в слое F2 на высоте $z = 200$ км $\beta \approx 0.002 \text{ с}^{-1}$. Тогда время становления концентрации элект-

ронов $t_N = \beta^{-1} \approx 500 \text{ с} \approx 8.3$ мин. Значение t_N близко к тому, что наблюдалось экспериментально. Последнее из-за дискретности зондирования составляет 15 ± 4.3 мин.

В слое F1

$$t_N = \frac{1}{2\alpha N_0},$$

где $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ с}^{-1}$ [11]. Полагая $N_0 \approx 2.1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (это соответствует $f_0 F1 \approx 4.1$ МГц), получим, что $t_N \approx 10$ с. В эксперименте время запаздывания N_{\min} по отношению к наступлению главной фазы было близко к нулю (с точностью до σ).

Таким образом, высотно-временные вариации N в течение СЗ полностью соответствуют представлениям о физико-химических процессах в средней ионосфере (высоты 100–300 км).

Волновые возмущения. Затмение сопровождалось увеличением амплитуды квазипериодических колебаний $f_0 F2$ приблизительно до 0.2–0.3 МГц. При этом $\delta_N \approx 10$ –15 %. Период колебаний составлял около 75 мин. Квазипериодические вариации усилились примерно через 30–35 мин после начала СЗ и продолжались около 3 ч.

В контрольный день средняя амплитуда колебаний $f_0 F2$ составляла 0.14 ± 0.02 МГц, т. е. была меньше приблизительно в 1.5–2.2 раза. При этом $\delta_N \approx 5.1$ –6.8 %. Период преобладающих колебаний изменялся в пределах 30–60 мин. Различие периодов колебаний позволяет предположить, что именно СЗ вызвало усиление колебаний параметров ионосферы. Природа возникновения колебаний в ионосфере, скорее всего, связана с генерацией волн в нейтральной атмосфере в результате охлаждения атмосферного газа и сверхзвукового движения области тени. Волны в нейтральной атмосфере модулируют концентрацию электронов в ионосфере, что и наблюдается радиофизическими методами.

ВЫВОДЫ

1. СЗ вызвало существенные вариации параметров ионограмм, что свидетельствует о перестройке ионосферы в течение затмения. В частности, критические частоты слоев F1 и F2

уменьшились на 0.4 и 0.8 МГц, или на 10 и 17 % соответственно.

2. СЗ сопровождалось заметным уменьшением концентрации электронов на всех высотах средней ионосферы. Так, в максимумах слоев F1 и F2 относительное уменьшение концентрации электронов равнялось 19 и 32 % соответственно. Время запаздывания этих вариаций составляло (с точностью до σ) около 0 и 15 мин соответственно.

3. СЗ привело к увеличению действующей высоты отражения $h'(f_0F2)$ примерно на 100–200 км.

4. Подтверждено, что в слоях F1 и F2 справедливы соответственно квадратичный и линейный законы рекомбинации. Физико-химические процессы в этих слоях полностью соответствовали существующим представлениям.

5. СЗ сопровождалось усилением (по сравнению с фоновым днем) относительной амплитуды δ_N квазипериодических вариаций концентрации электронов примерно в 2 раза. Различались и периоды колебаний.

1. Акимов А. Л., Акимов Л. А., Черногор Л. Ф. Параметры турбулентных процессов в атмосфере, сопровождавших затмения Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – 12, № 2. – С. 117–134.
2. Акимов Л. А., Боговский В. К., Григоренко Е. И. и др. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – 45, № 4. – С. 526–551.
3. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И. и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи соврем. радиоэлектроники. – 2002. – № 2. – С. 25–63.
4. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове // Успехи соврем. радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 55–70.
5. Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Перевалова Н. П. и др. Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. над Казахстаном // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – 47, № 4. – С. 491–500.
6. Афраймович Э. Л., Косоогов Е. А., Лесюта О. С. Ионосферный отклик полного солнечного затмения 11 августа 1999 г. по данным глобальной сети GPS // Геомагнетизм и аэрономия. – 2001. – 41, № 4. – С. 495–502.
7. Беликович В. В., Вяхирев В. Д., Калинина Е. Е. и др. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Нижнем Новгороде и Мурманске // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – 48, № 1. – С. 103–108.
8. Белинская А. Ю., Хомутов С. Ю., Григорьева С. А. Ионосферный отклик на солнечное затмение 29.03. 2006 г. // Изв. вузов. Физика – 2006. – № 9. – С. 68–72.
9. Бойтман О. Н., Калихман А. Д., Тащилин А. В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 2. Результаты наблюдений и сравнение с результатами моделирования // Геомагнетизм и аэрономия. – 1999. – 39, № 6. – С. 52–60.
10. Борисов Б. Б., Егоров Д. А., Егоров Н. Е. и др. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2000. – 40, № 3. – С. 94–103.
11. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 527 с.
12. Бурмака В. П., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я. и др. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Успехи соврем. радиоэлектроники. – 2007. – № 3. – С. 38–53.
13. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. – 2007. – 13, № 6. – С. 74–86.
14. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере в период весеннего равноденствия 2006 г. // Космічна наука і технологія. – 2008. – 14, № 4. – С. 82–91.
15. Васильев К. Н., Зелешин А. С., Косенков А. Р. Ионосферный эффект солнечного затмения 15 февраля 1961 г. по наблюдениям в Москве // Геомагнетизм и аэрономия. – 1961. – 1, № 2. – С. 277–278.
16. Васин В. А., Гришкевич Л. В. Об эффектах в ионосфере, наблюдавшихся в период солнечных затмений 2.XII.1956 г. и 15.II.1961 г. в Горьком // Геомагнетизм и аэрономия. – 1961. – 1, № 6. – С. 949–954.
17. Гокон А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдений процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – 5, № 4. – С. 348–360.
18. Григоренко Е. И., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – 48, № 3. – С. 350–364.
19. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года // Космічна наука і технологія. – 2004. – 10, № 1. – С. 12–25.

20. Данилкин Н. П., Коченова Н. А., Свечников А. М. и др. Состояние ионосферы над Ростовом-на-Дону в период солнечного затмения 15 февраля 1961 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 1961. — **1**, № 4. — С. 612–615.
21. Костров Л. С., Черногор Л.Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. — 2000. — **5**, № 4. — С. 361–370.
22. Ляшенко М. В., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Результаты расчетов и обсуждение // Космична наука і технологія. — 2008. — **14**, № 1. — С. 57–64.
23. Мусатенко С. И., Максименко О. И., Мусатенко Ю.С. и др. Возмущения в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 11 августа 1999 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2006. — **46**, № 1. — С. 78–87.
24. Физика верхней атмосферы / Под ред. Дж. А. Ратклиффа. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. — 504 с.
25. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. — 2000. — **5**, № 4. — С. 371–375.
26. Черногор Л. Ф. Эффекты солнечных затмений в приземной атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2008. — **44**, № 4. — С. 467–482.
27. Шашунькина В. М., Турбин П. И. Предварительные результаты наблюдений ионосферного эффекта солнечного затмения 15.II.1961 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 1961. — **1**, № 5. — С. 835–838.
28. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., Chernukhov V. V. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data // Geophys. Res. Lett. — 1998. — **25**, N 4. — P. 465–468.
29. Baron M. J. Incoherent scatter radar observations of the auroral zone ionosphere during the total eclipse of July 10, 1972 // J. Geophys. Res. — 1973. — **78**, N 31. — P. 7451–7460.
30. Bertin F., Hughes K. A., Kersley L. Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973 // J. Atmos. Terr. Phys. — 1977. — **39**, N 4. — P. 457–461.
31. Broche P., Crochet M., de Maitre J. G. Gravity waves generated by the June 1973 solar eclipse in Africa // J. Atmos. Terr. Phys. — 1976. — **38**, N 12. — P. 1361–1364.
32. Buther E. C., Downing A. M., Kole K. D. Wavelike variations in the F-region in the path of totality of the eclipse of 23 October 1976 // J. Atmos. Terr. Phys. — 1979. — **41**, N 5. — P. 439–444.
33. Chandra H., Sethia G., Vyas G. D., et al. Ionospheric effects of the total solar eclipse of 16 Feb. 1980 // Proc. Indian Nat. Acad. Sci. — 1980. — **A47**, N 1. — P. 57–60.
34. Davis M. J., da Rosa A. V. Possible detection of atmospheric gravity waves generated by the solar eclipse // Nature. — 1970. — **226**, N 5221. — P. 1123–1128.
35. Deshpande M. R., Chandra H., Sethia G., et al. Effects of the total solar eclipse of 16 February 1980 on TEC at low latitudes // Proc. Indian. Nat. Acad. Sci. — 1982. — **A48**, Suppl. N 3. — P. 427–433.
36. Evans J. V. An F region eclipse // J. Geophys. Res. 1965. — **70**, N 1. — P. 131–142.
37. Evans J. V. On the behavior of f_oF_2 during solar eclipses // J. Geophys. Res. — 1965. — **70**, N 3. — P. 733–738.
38. Farges T., Le Pichon A., Blanc E., et al. Response of the lower atmosphere and the ionosphere to the eclipse of August 11, 1999 // J. Atmos. Solar.-Terr. Phys. — 2003. — **65**, N 6. — P. 717–726.
39. Ishinose T., Ogawa T. Internal gravity waves deduced from HF Doppler data during the April 19, 1958, solar eclipse // J. Geophys. Res. — 1976. — **8**, N 13. — P. 2401–2404.
40. Jones T. B., Wright D. M., Milner J., et al. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse 11 August 1999 // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. — 2004. — **66**, N 5. — P. 363–374.
41. MacPherson B., Gonzalez S. A., Silzer M. P., et al. Measurements of the topside ionosphere over Arecibo during the total solar eclipse of February 26, 1998 // J. Geophys. Res. — 1998. — **105A**, N 10. — P. 23.055–23.068.
42. Rama Rao P. V. S., Rao B. V. P. S., Nru D., Niranjana K. TEC observations at Waltair during the total solar eclipse of 16 February 1980 // Proc. Indian Nat. Acad. Sci. — 1982. — **48**, N 3. — P. 434–438.
43. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., et al. Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill // J. Geophys. Res. — 1986. — **91A**, N 2. — P. 1651–1660.
44. Sterling D. L., Hanson W. B., Woodman R. F. Synthesis of data obtained at Jicamarca, Peru, during the September 11, 1969, eclipse // Radio sci. — 1972. — **7**, N 2. — P. 279–289.

Надійшла до редакції 27.04.09

L. Ya. Emelyanov, I. B. Sklyarov, L. F. Chernogor

IONOSPHERE RESPONSE TO THE SOLAR ECLIPSE ON 1 AUGUST 2008: SOME RESULTS OF VERTICAL SOUNDING

The results of the ionosphere dynamics observation at heights of 100 to 200 km during the partial (the phase 0.42) solar eclipse on 1 August 2008 near Kharkiv are described. The solar eclipse caused some alteration of the ionosphere at all heights from at first the daily to nightly conditions and then to daily ones. Critical frequency decreased by 10 % for the F1-layer and by 17 % for the F2-layer. The delay of these variations in relation to the phase of the solar disk obscuration was 0 and 15 min, respectively. The virtual height of signal reflection near the maximum of the F2-layer ionization increased considerably (by 100–200 km). Some decrease of electron density and amplification of quasi-periodic variations (with a period of about 75 min) during the solar eclipse at all the observable heights are fixed.