

УДК 551.510.535: 550.388.2

Л. Ф. Черногор^{1,2}, В. В. Барабаш²

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

²Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

ОТКЛИК СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 4 ЯНВАРЯ 2011 г. В ХАРЬКОВЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Описано результати спостережень динаміки іоносфери на висотах 100 — 250 км протягом часткового (фаза 0.78) сонячного затемнення 4 січня 2011 р. поблизу м. Харкова. Сонячне затемнення викликало перебудову іоносфери на всіх висотах спочатку до нічних умов, а потім — до денних. Критична частота шару F2 зменшилася у 2.1 рази. Запізнення цих варіацій відносно моменту головної фази покриття сонячного диску склало близько 16 хв. Діюча висота відбиття сигналу поблизу максимуму іонізації шару F2 зросла на 70 км, а висота модельного параболічного шару h_p — на 10 км. Виявлено зменшення електронної концентрації та підсилення квазіперіодичних варіацій (з періодами близько 30 і 60 хв) протягом сонячного затемнення.

ВВЕДЕНИЕ

Эффекты солнечного затмения (СЗ) в ионосфере изучались с 1920-х гг. разными методами [1, 2, 4–8, 13–15]. Наиболее полную информацию о процессах в ионосфере в широком диапазоне высот (100 – 1000 км) получают при помощи метода некогерентного рассеяния [1, 2, 4–6, 13–15]. В то же время значительный объем информации об ионосфере ниже максимума ионизации получен при помощи ионозондов. Мировая сеть ионозондов работает практически в непрерывном режиме. Метод вертикального зондирования (ВЗ), реализуемый в ионозондах, давно применяется для наблюдения эффектов СЗ в ионосфере [7].

Исследования эффектов СЗ остаются актуальными и сегодня по следующим причинам. Во-первых, каждое СЗ проходит при определенных гелиогеофизических условиях. Во-вторых, как показывают наблюдения, отклики ионосферы на затмения могут заметно различаться. Поэтому наибольший интерес представляет иссле-

дование особенностей отклика ионосферы при каждом конкретном СЗ.

Цель настоящей работы — изложение результатов наблюдения методом вертикального зондирования особенностей перестройки ионосферы в период частного СЗ 4 января 2011 г. вблизи г. Харькова. Это затмение существенно отличается от других тем, что оно имело место на стадии роста солнечной активности, в утреннее время, и продолжалось около трех часов (другие затмения длились около двух часов).

ОБСТОЯТЕЛЬСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

Краткие сведения о затмении. СЗ наблюдалось после восхода Солнца в Северной Африке. Главная фаза (0.37) в Марокко имела место около 07:38 (здесь и далее мировое время). Затененная область пересекла всю Европу и часть Азии. СЗ закончилось примерно в 10:25 над Пакистаном (фаза 0.09). Ширина области полного СЗ составляла около 200 км, а скорость ее движения — около 700 — 800 м/с.

В месте проведения измерений (вблизи г. Харькова) покрытие диаметра диска Солнца составляло около 0.78. При этом максимальная зате-

ненная относительная площадь диска $A_{\max} \approx 0.71$. Солнечное затмение началось в 07:30, а закончилось в 10:29, главная фаза имела место в 08:59.

Состояние космической погоды в период с 1 по 5 января 2011 г. удобно представлять в терминах временных вариаций концентрации, скорости, температуры и давления солнечного ветра, индукции межпланетного магнитного поля, энергетической функции Акасофу ϵ , а также индексов магнитной активности (K_p и D_{st}). С 1 по 5 января флуктуации плотности, скорости, температуры и давления солнечного ветра не превышали соответственно $1.5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$, 420 км/с, $1.3 \cdot 10^5 \text{ К}$ и 4 нПа. Всплески величины ϵ достигали 6 ГДж/с. Затмению предшествовало малосущественное магнитное возмущение (индекс K_p изменялся от 0 до 3). Составляющая B_z хаотически варьировала в пределах $\pm (5 - 6)$ нТл. Малосущественными были флуктуации уровня B_y (около $\pm (4 - 6)$ нТл). Значения индекса D_{st} также хаотически флуктуировали в пределах $\pm (10 - 15)$ нТл.

Можно утверждать, что день затмения, 4 января 2011 г., и контрольный день, 5 января 2011 г., были спокойными. Это обстоятельство существенно облегчало идентификацию возмущений, вызванных откликом средней ионосферы на СЗ.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения ионосферы осуществлялись с помощью модифицированного ионозонда «Базис», кратко описанного в работе [7]. Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36' с. ш., 36°18' в. д.) вблизи г. Харькова.

Передачик 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.

Приемное устройство ионозонда «Базис» создано на основе супергетеродина с преобразованием частоты: в диапазоне частот от 0.3 до 2.3 МГц с двойным преобразованием, от 2.3 до 40 МГц — с тройным.

Приемная и передающая антенны ионозонда 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.

Погрешность отсчета частоты на ионограммах не хуже 0.1 МГц, а критической частоты области $F - 0.05$ МГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Описание ионограмм. На рис. 1 представлены характерные ионограммы, полученные перед началом, в период и после окончания солнечного затмения 4 января 2011 г., а на рис. 2 — ионограммы, полученные в те же моменты времени в контрольный день 5 января 2011 г., когда отсутствовали значительные возмущения в ионосфере. На вертикальной оси, как обычно, обозначены действующие высоты отражения зондирующего сигнала, на горизонтальной — частота радиосигнала.

Отметим, что 4 и 5 января 2011 г. на протяжении практически всех измерений регистрировался слой E_s , который частично экранировал исследуемую область ионосферы. Это затрудняло получение качественных высотно-частотных характеристик. Тем не менее, имеющиеся ионограммы позволили с достаточной степенью выявить отклики средней ионосферы на СЗ.

До наступления СЗ ионосфера была спокойной. Об этом можно судить из рис. 1. Для Харькова основная часть СЗ припадает на околополуденные часы (по местному времени).

На ионограммах, полученных до начала СЗ, наблюдался незначительный рост критической частоты f_0F2 и несущественные колебания значений высоты слоя $F2$, что характерно для утреннего времени.

В течение затмения четко видны изменения ионограмм. С 08:30 до 09:15 высотно-частотным характеристикам были присущи диффузные отражения практически во всем диапазоне частот и высот.

В течение СЗ наблюдался мощный прерывистый отражающий слой в диапазоне высот 100 — 150 км, подобный слою E_s . Критическая частота этого слоя достигала 8.4 МГц. Наблюдался след, который можно назвать двукратным для слоя E_s . Его действующая высота изменялась от 210 до 240 км. Отражение от слоя E наблюдалось

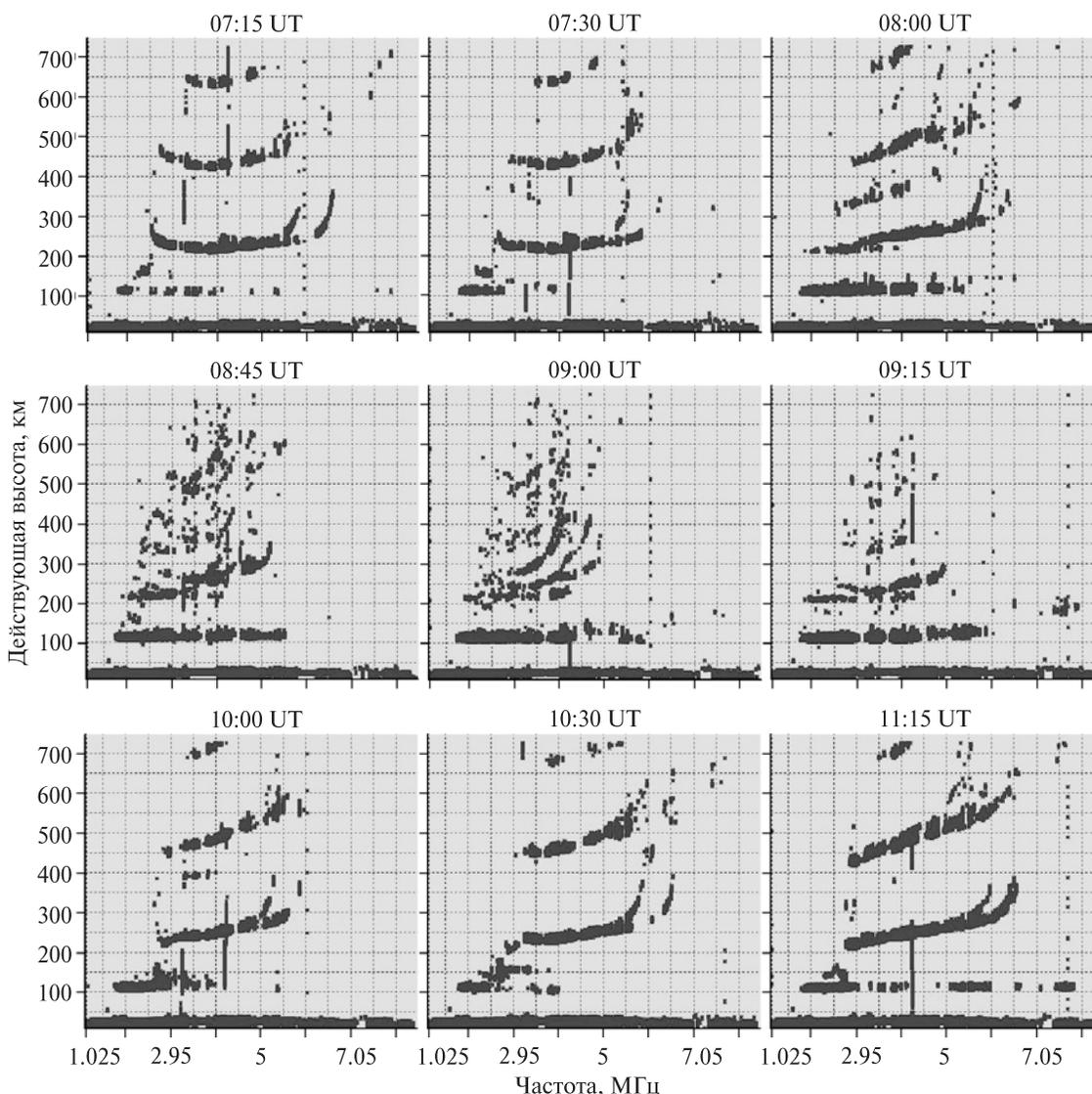


Рис. 1. Ионограммы до, в период 07:30 — 10:30 и после окончания солнечного затмения 4 января 2011 г.

нечетко. Минимальное значение критической частоты f_0E_{\min} оказалось близким к 2.2 МГц. Поскольку СЗ проходило в зимний период, то слой F1 на ионограммах не регистрировался.

На ионограммах, полученных в момент главной фазы СЗ, наблюдались наклонные отражения. Также отмечен рост действующей высоты, который в среднем составил около 70 км. Значение f_0F2 при этом уменьшилось приблизительно на 1.9 МГц.

Кроме основного следа от области F ионосферы, зафиксирован след, имеющий действующие

высоты 275 — 440 км с критической частотой, не превышающей 4 МГц. Такой след имел место в интервале времени с 07:35 до 10:00 UT.

По мере открывания солнечного диска отмечалось увеличение критической частоты F2. В момент окончания СЗ (10:29) значение f_0F2 почти достигло значения, наблюдавшегося до начала затмения. Действующая высота после увеличения в период затмения уменьшилась, и практически стала равна невозмущенному значению (в 11:00 отличие составляло не более 1 — 3 км). Ионограмма, полученная в 11:15, свиде-

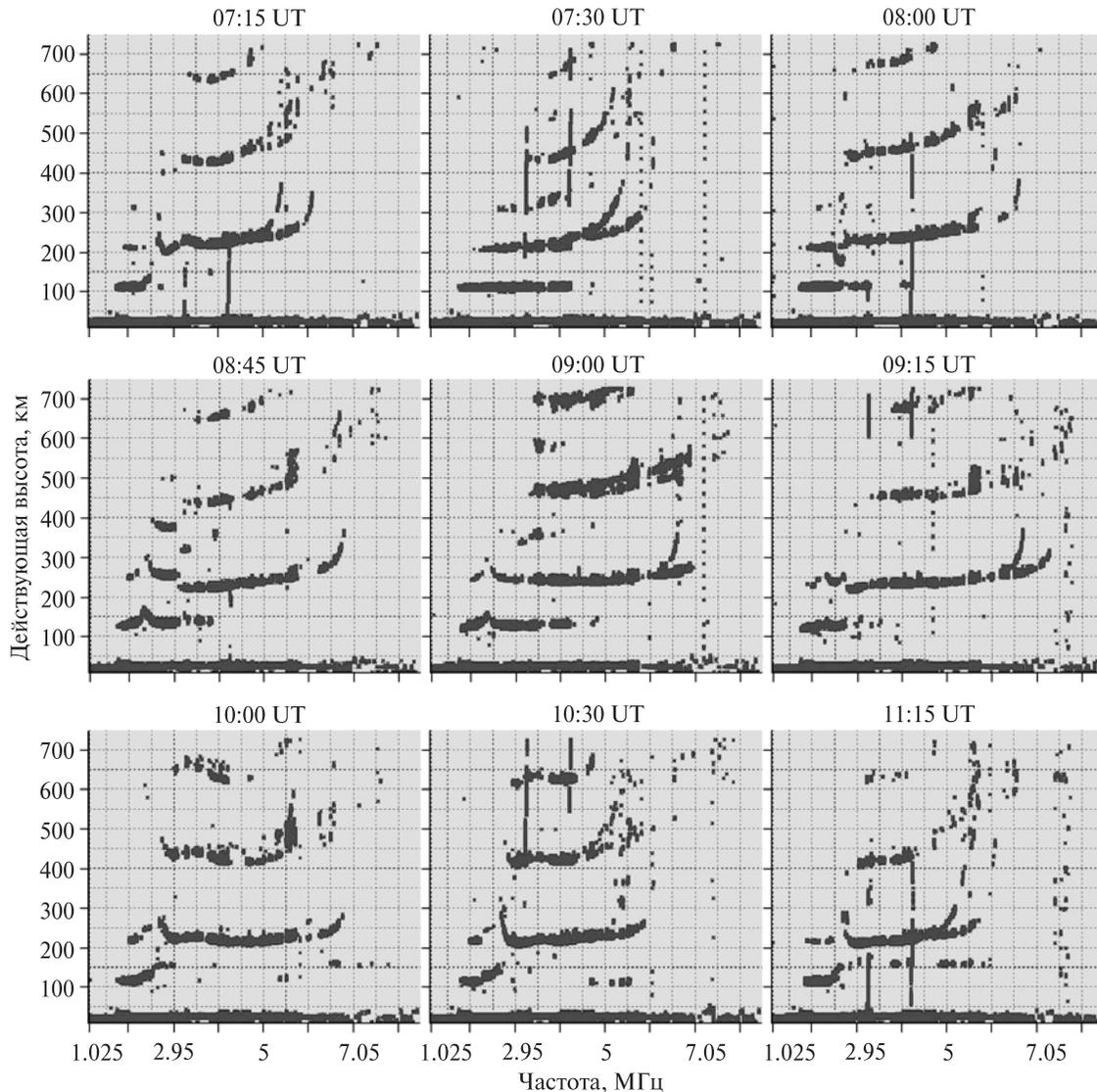


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для контрольного дня 5 января 2011 г.

тельствует о том, что через 45 мин после окончания СЗ вид ионограммы и ее параметры вернулись к состоянию, предшествующему моменту начала затмения.

На рис. 2 представлены ионограммы, полученные в контрольный день 5 января 2011 г. Их можно условно разделить на две группы. Ионограммы в первой группе имели характерный для околополуденного времени вид. Во второй группе на ионограммах наблюдался след с действующей высотой 300 — 400 км. Отметим, что по-

явление слоя не было таким регулярным, как в день СЗ. Достаточно уверенно он фиксировался лишь на отдельных ионограммах (07:15, 07:30, 09:30, 10:30, 10:45).

Слой *E_s*, как и 4 января 2011 г., был прерывистый, его критическая частота достигала 7.9 МГц. Высота слоя изменялась от 90 до 150 км. На некоторых ионограммах наблюдался двукратный и трехкратный след для слоя *E_s*. Для этих случаев действующие высоты изменялись от 195 до 220 км и от 300 до 320 км соответственно.

В отличие от дня СЗ, отражения от слоя *E* наблюдались более четко. Значение его критической частоты не превышало 2.7 МГц.

Видно, что в течение всего периода измерений ионограммы незначительно отличались как между собой, так и от ионограмм, полученных 4 января до начала и после окончания СЗ. Их поведение является типичным для невозмущенной ионосферы в околополуденное время.

Таким образом, качественный анализ ионограмм показал, что СЗ вызвало определенные изменения параметров ионограмм, а значит, и средней ионосферы.

Временные вариации критических частот. На рис. 3 представлены временные вариации критических частот области *F* ионосферы (f_0F2). Здесь и ниже сплошной линией с точками обозначены вариации параметров ионосферы в день солнечного затмения 4 января 2011 г. и в контрольный день 5 января 2011 г. Сплошной тонкой линией на рисунках обозначены вариации параметров, обработанные методом скользящего среднего. Три вертикальными линиями отмечены моменты начала, главной фазы и окончания затмения.

Затмение вблизи Харькова началось в утреннее время, когда имел место стремительный рост f_0F2 .

Из рис. 3 видно, что до затмения f_0F2 увеличивалась от 3.5 до 6.4 МГц. Незначительное уменьшение f_0F2 началось примерно за 20 мин до начала СЗ. По мере покрытия диска Солнца значения f_0F2 уменьшались примерно от 6.2 до 4.3 МГц. Им соответствовало уменьшение концентрации электронов от $N \approx 4.7 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до $N_{\min} \approx 2.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Максимальное значение уменьшения критической частоты слоя *F2* составило $\delta f_0F2 \approx 1.9 \text{ МГц}$. При этом уменьшение концентрации электронов равно $\Delta N = 2.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $N_{\min} / N \approx 0.48$, $\delta_N = \Delta N / N \approx 52 \%$. Отметим, что минимальное значение f_0F2 и электронной концентрации в максимуме слоя *F2* наблюдалось в 09:15, т. е. с задержкой около 16 мин по отношению к моменту главной фазы СЗ.

Почти сразу же после начала СЗ значения f_0F2 изменялись по квазипериодическому закону.

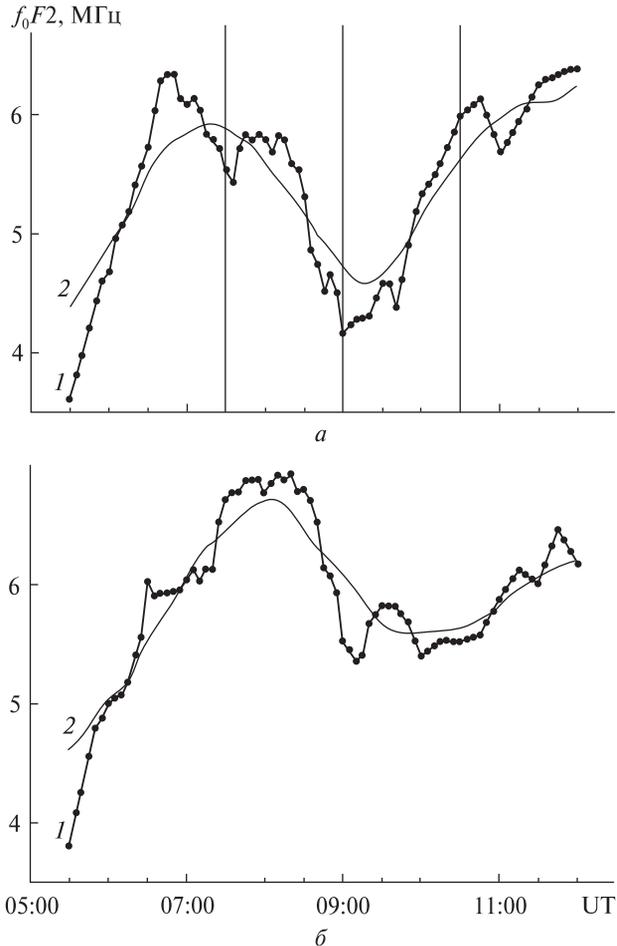


Рис. 3. Временные вариации критической частоты f_0F2 : *a* — в день затмения 4 января 2011 г. (1 — исходная зависимость, 2 — сглаженная методом скользящего среднего на интервале времени в 90 мин), *б* — то же для контрольного дня 5 января 2011 г. Вертикальные линии здесь и далее — моменты начала, главной фазы и окончания затмения

Величина квазипериодов $T = 30$ и 60 мин, а их амплитуда $\delta f_{0a}F2 = 0.2$ и 0.4 МГц . Относительную амплитуду квазипериодических возмущений можно оценить из формулы

$$\delta_{Na} = \frac{\Delta N}{N} \approx 2 \frac{\delta f_{0a}F2}{f_0F2}, \quad (1)$$

где f_0F2 — среднее за период значение f_0F2 . Полагая $f_0F2 = 5 \text{ МГц}$, из (1) получим, что для $T = 30$ и 60 мин, δ_{Na} составляла 8 и 12 % соответственно. Продолжительность этого процесса составила около 2 ч.

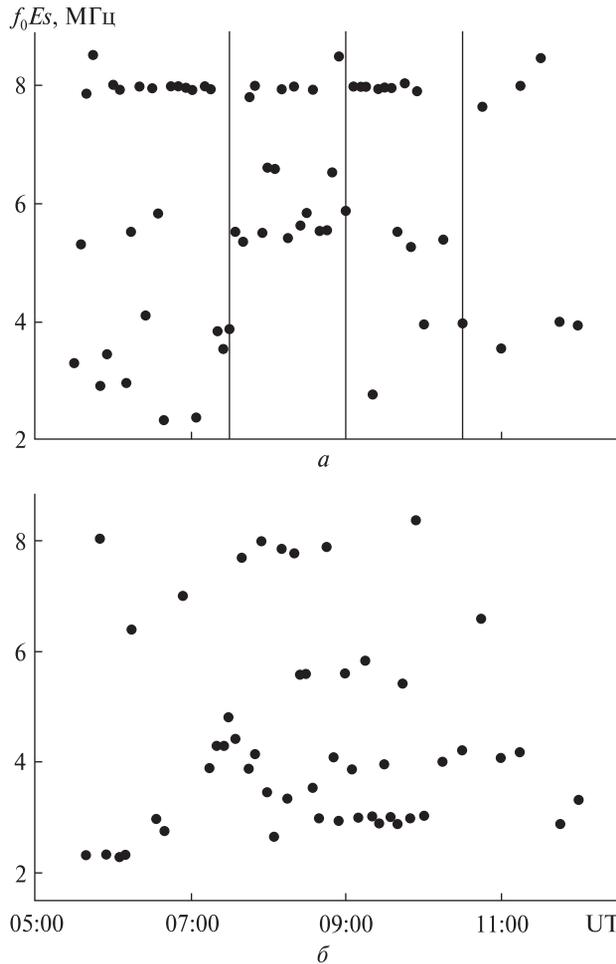


Рис. 4. Временные вариации критической частоты f_0Es в день солнечного затмения 4 января 2011 г. (а) и в контрольный день 5 января 2011 г. (б)

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.

Целесообразно сравнить уменьшение f_0F2 в день СЗ с контрольным днем. Вблизи 09:15 в контрольный день в среднем $f_0F2 \approx 6.2$ МГц. Тогда уменьшение f_0F2 в день СЗ составляло 1.9 МГц. Это значение совпало со значением $\delta f_{0a}F2$, приведенным выше.

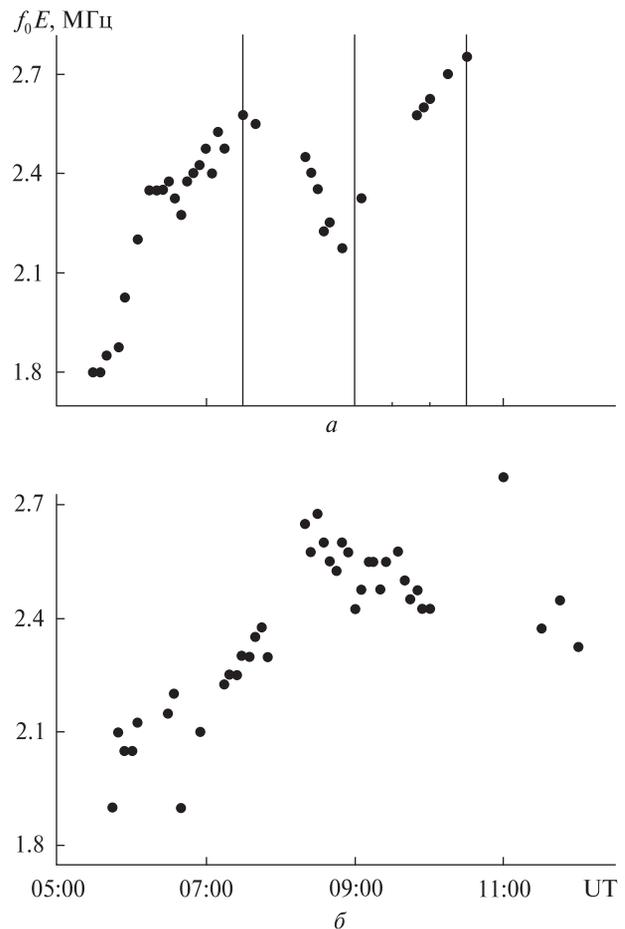


Рис. 5. Временные вариации критической частоты f_0E в день солнечного затмения 4 января 2011 г. (а) и в контрольный день 5 января 2011 г. (б)

Опишем кратко вариации критической частоты слоя Es в день СЗ и в контрольный день (рис. 4). Видно, что 4 и 5 января частота f_0Es сильно флуктуировала. Ее значение изменялось примерно от 2.5 до 8.5 МГц в день СЗ и от 2.3 до 8 МГц в контрольный день. В целом значения f_0Es были большими в день затмения. Слой Es при этом был мощнее и существенно экранировал область E .

Временные вариации критической частоты E приведены на рис. 5. В интервале времени 05:00 — 07:30 величина f_0E возрастала примерно от 1.8 до 2.3 — 2.6 МГц. В контрольный день она

продолжала увеличиваться примерно до 08:30, в течение ближайшего получаса она уменьшилась от 2.7 до 2.6 МГц. В течение следующего часа эта частота, флукутируя, оставалась в пределах 2.5 — 2.6 МГц.

В день затмения слой E наблюдался эпизодически. Вблизи главной фазы $S3 f_0 E$ примерно равнялась 2.2 МГц, т. е. ее значение уменьшилось примерно на 0.4 МГц (на 16 %) по сравнению с тем значением, которое было бы в отсутствие затмения. После момента наступления главной фазы частота $f_0 E$ постепенно увеличивалась от 2.2 до 2.8 МГц.

Временные вариации действующих высот. На рис. 6 показаны временные вариации действующих высот вблизи максимума ионизации слоя $F2$ в день затмения 4 января 2011 г. и в контрольный день 5 января 2011 г. Видно, что по мере покрытия солнечного диска действующая высота $h'(f_0 F2)$, значение которой до начала $S3$ было приблизительно равно 350 км, увеличилась почти до 420 км в момент главной фазы $S3$ (08:59). Стремительный рост $h'(f_0 F2)$ произошел с 07:35 до 07:50. В период с 07:50 до 08:05 значение минимальной действующей высоты несколько уменьшилось, и в период главной фазы $S3$ оно равнялось 382 — 387 км.

С 09:45 до 10:30 (т. е. до окончания $S3$) произошло снижение значений $h'(f_0 F2)$ до невозмущенного затмением уровня. Отметим, что в контрольный день 5 января 2011 г. минимальные действующие высоты претерпевали несущественные изменения (в среднем $h'(f_0 F2) \approx 365 \pm 15$ км).

Временные вариации высоты h_p . Временные вариации высоты $h_p(F2)$ представлены на рис. 7, а. Поскольку слой $F1$ не регистрировался, слой $F2$ можно аппроксимировать параболическим слоем. При этом значения высоты $h_p(F2)$ приблизительно равны истинной высоте максимума электронной концентрации слоя. Напомним, что высота $h_p(F2)$ находится из условия $h_p = h'(f_p)$, где $f_p = 0.834 f_0 F2$.

Рассмотрим вначале контрольный день 5 января 2011 г. Высота h_p с 05:30 до 06:30 уменьшалась, а в интервале времени 06:30 — 07:45 она увеличивалась. С 07:45 до 09:25 наблюдалось

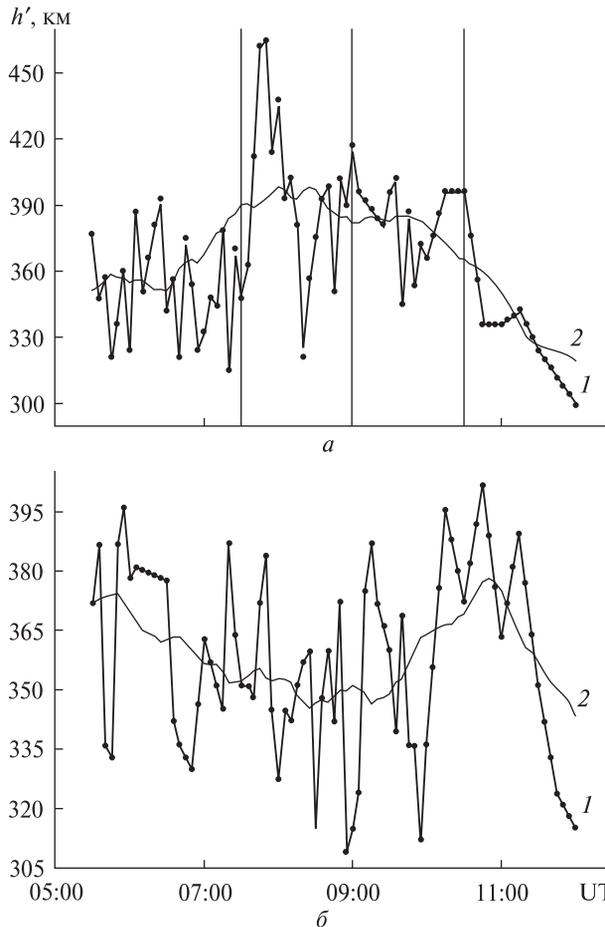


Рис. 6. Временные вариации действующей высоты h' отражения вблизи максимума ионизации слоя $F2$: а — в день затмения 4 января 2011 г. (1 — исходная зависимость, 2 — сглаженная методом скользящего среднего на интервале времени в 90 мин), б — то же в контрольный день 5 января 2011 г.

постепенное уменьшение $h_p(F2)$. Далее до 11:45 имело место увеличение h_p . Кроме таких регулярных изменений $h_p(t)$, имели место неупорядоченные изменения. Их относительная величина достигала 4 %.

4 января 2011 г. до начала $S3$ наблюдалось снижение $h_p(F2)$, и его значение к началу затмения (07:30) равнялось 230 км. В период с 07:30 до 08:30 отмечена тенденция к увеличению высоты h_p , что характерно для ночного времени. Начиная с 08:30 и до окончания $S3$ (10:30) среднее значение $h_p(F2)$ составляло около 237 км, т. е.

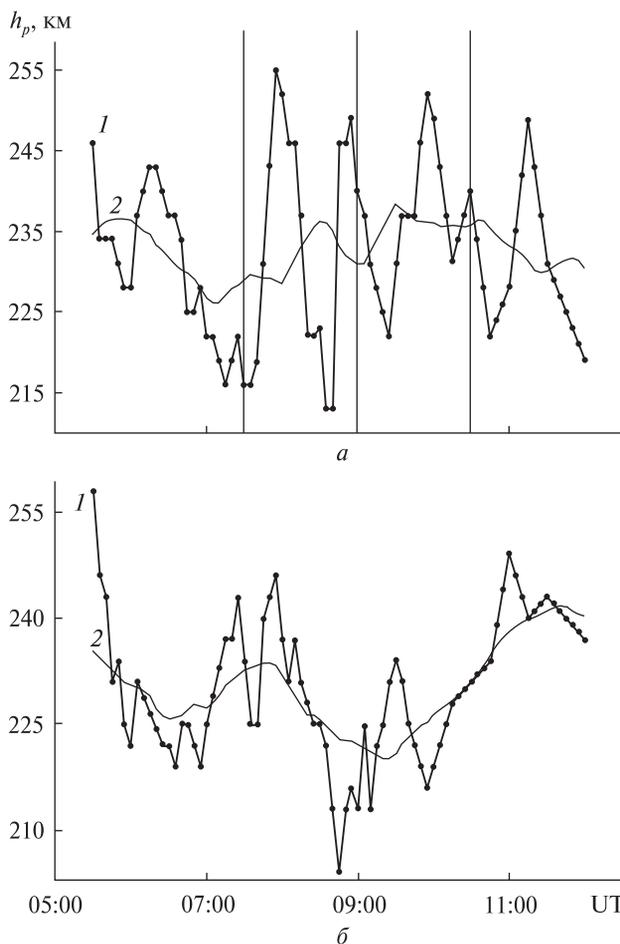


Рис. 7. Временные вариации высоты отражения h_p вблизи максимума ионизации слоя F2: *a* — в день затмения 4 января 2011 г. (*1* — исходная зависимость, *2* — сглаженная методом скользящего среднего на интервале времени в 90 мин), *б* — то же в контрольный день 5 января 2011 г.

значение высоты увеличилось почти на 10 км. После 11:20 значение h_p были ближе к значениям этого параметра, предшествующим затмению. Такое поведение h_p было лишь в среднем. Главным отличием временных вариаций 4 и 5 января было то, что в день СЗ имели место сильные колебания h_p . Их амплитуда достигала 21 км, или 9%. Период колебаний был близок к 60 мин. В 13:15 высота h_p (F2) была приблизительно равна 230 км, что соответствует невозмущенному затмением состоянию ионосферы. Таким образом, увеличение h_p на 10 км свиде-

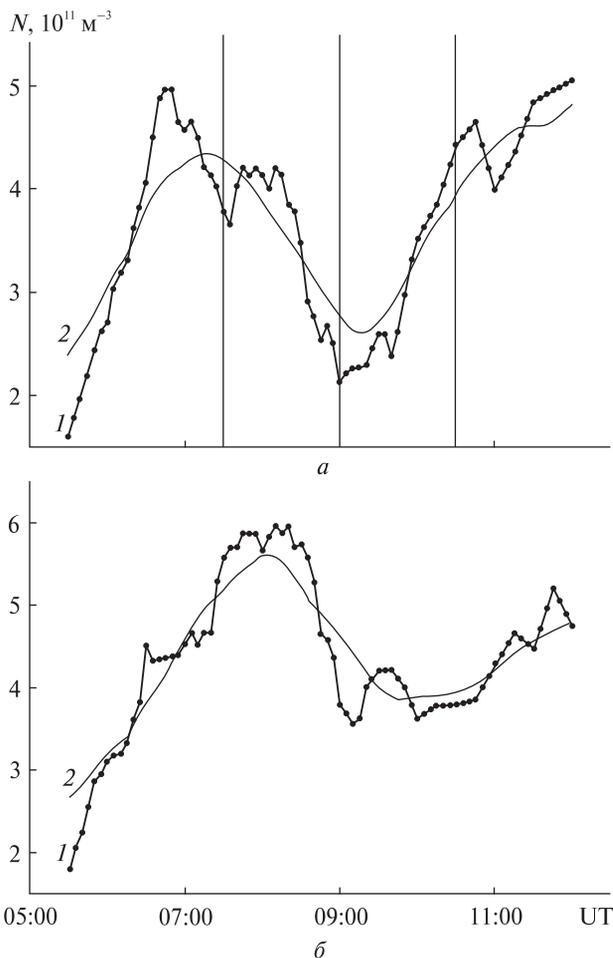


Рис. 8. Временные вариации электронной концентрации в максимуме ионизации слоя F2: *a* — в день СЗ 4 января 2011 г. (*1* — исходная зависимость, *2* — сглаженная методом скользящего среднего на интервале времени в 90 мин), *б* — то же в контрольный день 5 января 2011 г.

тельствует о влиянии СЗ на параметры средней ионосферы.

Временные вариации концентрации электронов в максимуме ионизации. Зависимость электронной концентрации в максимуме ионизации слоя $N(t)$ в день солнечного затмения 4 января 2011 г. и в контрольный день 5 января 2011 г. показаны на рис. 8. Значения N получены из значений критических частот, измеренных с помощью ионозонда.

Сразу после начала СЗ происходило уменьшение электронной концентрации от $4.0 \cdot 10^{11}$ до $2.1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Минимальное значение N_{\min} на-

блюдалось около 09:15, т. е. через 16 мин после момента наступления главной фазы СЗ. Максимальное уменьшение N приблизительно равно $1.9 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. После главной фазы затмения электронная концентрация увеличивалась, и к его концу достигла значений $4 \cdot 10^{11} - 5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. В контрольный день, 5 января 2011 г., с 05:30 до 08:10 концентрация электронов увеличивалась. В интервале времени 08:10 — 09:45 она уменьшалась. С 09:45 наблюдалось постепенное увеличение N . Таким образом, временные вариации N в день СЗ и в контрольный день существенно отличались.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вариации параметров ионограмм. Анализ ионограмм, полученных перед началом, в течение и после окончания СЗ, показал, что имели место значительные вариации всех их параметров. Конечно, наличие слоя E_s затрудняло наблюдение эффектов, вызванных затмением. Тем не менее, уверенно наблюдалось уменьшение критических частот слоя F_2 , достигавшее 1.9 МГц. После окончания затмения критические частоты практически вернулись к своим значениям, которые предшествовали СЗ. Минимальные значения f_0F_2 регистрировались с задержкой по отношению к моменту наступления главной фазы затмения, близкой с точностью до σ к 16 мин (σ — ошибка в отсчете времени при значении дискретности Δt). Известно, что $\sigma = \Delta t / \sqrt{12}$. При $\Delta t = 5$ мин имеем $\sigma \approx 1.4$ мин. Тогда задержка составила 16.0 ± 1.4 мин. Одновременно с вариациями f_0F_2 наблюдалось сначала увеличение приблизительно на 70 км действующей высоты $h'(f_0F_2)$, а затем ее уменьшение на такое же значение. Как и следовало ожидать, близкое к полному СЗ вызвало перестройку ионосферы сначала от дневных к ночным условиям, а затем в обратном направлении.

Кроме указанных вариаций, имели место 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 предшествующих наблюдений [7].

Диффузные отражения. В течение затмения с 7:30 до 11:30 высотно-частотные характеристики носили диффузный характер. Во всем диапазоне частот и высот имели место сильные нарушения слоистой структуры ионосферы. Скорее всего, все пространство между максимумами слоев E и F_2 было заполнено интенсивными ионосферными неоднородностями. Причиной их усиления, по-видимому, послужили гидродинамические неустойчивости в термосфере [12].

Вариации концентрации электронов. Рассмотрим подробнее высотно-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 [3]

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(NV_z) = q(t) - L, \quad (2)$$

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

При достаточно низкой солнечной активности высота максимума слоя F_2 в спокойных условиях не превосходит 230 — 250 км. Если высотными вариациями NV_z в слое ионосферы можно пренебречь, соотношение (2) сводится к уравнению

$$\frac{dN}{dt} = q(t) - L, \quad (3)$$

где $q(t) = q_0[1 - A(t)]$, $A(t) = S(t)/S_0$ — функция покрытия диска Солнца, S — площадь затененной части диска Солнца, S_0 — площадь последнего. Поскольку характерное время данного затмения $t_e \approx 90$ мин намного превышает время рекомбинационных процессов на высотах $z \leq 250$ км, соотношение (3) можно приближенно записать в виде

$$q \approx L. \quad (4)$$

В максимуме слоя F_2 скорость потерь [3]

$$L = \beta N, \quad (5)$$

где β — коэффициент потерь. Полагая, что в течение СЗ коэффициент β изменяется несущественно, из (4), (5) получим, что на заданной высоте

$$\frac{N}{N_0} = \frac{q}{q_0} = 1 - A \equiv B. \quad (6)$$

Здесь $B(t) = 1 - A(t)$, N_0 — значение N в отсутствие СЗ. Вблизи главной фазы $A_{\max} \approx 0.71$, $B_{\min} \approx 0.29$. Тогда, исходя из (6), расчетное значение будет равно

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = 0.29.$$

При этом $\Delta N/N_0 = 1 - N_{\min}/N_0 = 0.71$. Значение $N_{\min}/N_0 = 0.29$ заметно отличается от экспериментально полученного значения 0.48. Причин расхождения три. Во-первых, на высотах 230 — 250 км уже нельзя считать, что $V_z = 0$. Во-вторых, при длительности СЗ около 3 ч заметно изменялись параметры нейтральной атмосферы, что повлекло за собой изменение коэффициента β . В-третьих, сдвиг высоты слоя $F2$ вверх в течение СЗ привел к уменьшению β .

Рассмотрим эти причины подробнее. Как показали синхронные наблюдения на харьковском радаре некогерентного рассеяния, в период главной фазы затмения в диапазоне высот 200 — 250 км $V_z(z) \approx -50$ м/с. Вблизи максимума слоя $F2$ $N(t) = \text{const}$. По этой причине в уравнении (2) $\partial(N V_z)/\partial z \approx 0$, т. е. процесс переноса не мог существенно повлиять на вариации $N(t)$, связанные с затмением.

Можно показать, что вариации концентрации нейтральных частиц и β в переходное время суток на высотах 200 — 300 км приближенно описываются линейной зависимостью. При этом

$$\beta(\Delta t) \approx \beta_0 \left(1 - \frac{\Delta t}{2\tau} \right),$$

где $\tau \approx 4.5$ ч — характерное время переходных процессов, Δt — интервал времени после захода (начала затмения) Солнца. В период главной фазы СЗ $\Delta t \approx 1.5$ ч. Тогда $\beta(1.5) = 0.83 \beta_0$. За счет уменьшения N область отражения радиоволны сдвигается вверх на $\Delta z \approx 10$ км. В результате этого β уменьшается по закону

$$\beta(z) = \beta_0 e^{-\Delta z/H},$$

где H — приведенная высота нейтральной атмосферы. Согласно известным международным моделям нейтральной атмосферы вблизи 230 —

240 км (т. е. вблизи высоты максимума слоя $F2$ 4 января 2011 г.) $H \approx 45$ км. Тогда суммарное уменьшение β за счет последних двух причин в момент времени $\Delta t \approx 1.5$ ч с учетом того, что $\Delta z \ll H$, описывается соотношением

$$\beta \approx \beta_0 \left(1 - \frac{\Delta t}{2\tau} - \frac{\Delta z}{H} \right) \approx 0.61 \beta_0.$$

При этом, согласно (5) и (6) расчетное значение

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \frac{q}{q_0} \frac{\beta_0}{\beta} = B_{\min} \frac{\beta_0}{\beta} \approx 0.49,$$

что очень близко к полученному экспериментально значению 0.48.

Таким образом, СЗ привело не только к уменьшению N , но и к уменьшению примерно на $\Delta t/2\tau \approx 17\%$ концентрации нейтральных частиц на высотах вблизи слоя $F2$.

Обсудим времена становления N . Исходя из высотной зависимости β , приведенной, например, в работах [9, 11], можно показать, что в слое $F2$ на высоте $z = 230$ км $\beta \approx 10^{-3} \text{c}^{-1}$. Тогда время становления концентрации электронов $t_N = \beta^{-1} \approx 1000 \text{c} \approx 16.7$ мин. Значение t_N близко к тому, что наблюдалось экспериментально (16.0 ± 1.4 мин).

В E -области справедлив квадратичный закон рекомбинации. Вместо (4), (5) имеем соотношение

$$q = \alpha N^2,$$

где α — коэффициент рекомбинации. В отсутствие затмения $q_0 = \alpha_0 N_0^2$. Тогда

$$\frac{N}{N_0} = \sqrt{\frac{\alpha_0}{\alpha} \frac{q}{q_0}} = \sqrt{\frac{\alpha_0}{\alpha} B(t)}.$$

При $B_{\min} = 0.29$ и $\alpha \approx \alpha_0$ имеем $N_{\min}/N_0 \approx 0.54$, а $fE_{\min}/fE \approx 0.73$. При этом относительное изменение $f_0 E$ должно быть равно 27%. Из ионограмм получено, что оно близко к 16%, а $N_{\min}/N_0 \approx 0.70$. Таким образом, оцененное из эксперимента значение N_{\min}/N_0 превышало расчетное на 16%. Это различие может быть обусловлено среднеширотным высыпанием электронов из магнитосферы, описанным в работе [10].

Таким образом, высотно-временные вариации N в течение СЗ соответствуют представле-

ниям о физико-химических процессах в средней ионосфере (высоты 100 — 250 км).

Волновые возмущения. Как показал спектральный анализ, затмение сопровождалось увеличением амплитуды квазипериодических колебаний f_0F2 приблизительно на 0.2 и 0.4 МГц с периодом 30 и 60 мин соответственно. При этом относительная амплитуда колебаний концентрации электронов δ_{Na} составляла 8 и 16 %. Квазипериодические вариации усилились примерно за 1 ч до начала СЗ. Продолжительность вариаций с $T \approx 60$ мин составляла 5 — 6 ч, с $T \approx 30$ мин — около 3 ч.

В контрольный день колебания f_0F2 были выражены слабо, по крайней мере в интервале времени с 07:30 до 08:50. Средняя амплитуда составляла 0.1 — 0.2 МГц, т. е. была меньше приблизительно в два раза. При этом $\delta_{Na} \approx 3.5 \dots 7$ %. Период преобладающих колебаний изменялся в пределах 50 — 90 мин.

Различие периодов и амплитуд колебаний в день СЗ и контрольный день позволяет предположить, что именно СЗ вызвало усиление колебаний параметров ионосферы. Об усилении волновой активности в период СЗ также свидетельствуют квазипериодические вариации высоты h_p с периодом около 60 мин. Относительная амплитуда этих вариаций достигала 9 %.

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 модулировали концентрацию электронов в ионосфере, что и наблюдалось методом ВЗ.

Значения периодов и амплитуд квазипериодических колебаний свидетельствуют о том, что СЗ сопровождалось генерацией внутренних гравитационных волн.

ВЫВОДЫ

1. Солнечное затмение вызвало значительную перестройку ионосферы в течение затмения. В частности, критические частоты слоев $F2$ и E вблизи главной фазы уменьшились на 1.9 МГц и 0.4 МГц, или на 31 % и 16 % соответственно.

2. Солнечное затмение сопровождалось заметным уменьшением концентрации электронов на высотах средней ионосферы. Так, в максимуме слоя $F2$ относительное уменьшение концентрации электронов равнялось примерно 52 %. Время запаздывания вариаций N составляло около 16.0 ± 1.4 мин. В E -области N уменьшилось примерно на 30 %.

3. Солнечное затмение привело к увеличению действующей высоты отражения в максимуме слоя $F2$ до 70 км.

4. Затмение вызвало увеличение высоты h_p до 10 км.

5. В течение затмения ионограммы были диффузными, что отражало факт сильной турбулентности ионосферы.

6. Подтверждено, что в максимуме слоя $F2$ справедлив линейный закон рекомбинации, в E -области — квадратичный закон. Физико-химические процессы в этих слоях соответствовали существующим представлениям.

7. Солнечное затмение сопровождалось увеличением (по сравнению с фоновым днем) относительной амплитуды квазипериодических вариаций концентрации электронов примерно в два раза (до 8 и 16 % для периодов 30 и 60 мин). Различались и периоды колебаний. Параметры квазипериодических возмущений соответствовали параметрам внутренних гравитационных волн.

Авторы благодарны И. Б. Склярову за проведение наблюдений на ионозонде.

1. Акимов Л. А., Боговский В. К., Григоренко Е. И. и др. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэрономия. — 2005. — 45, № 4. — С. 526—551.
2. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И. и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 2002. — № 2. — С. 25—63.
3. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 527 с.
4. Бурмака В. П., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я. и др. Радарные наблюдения эффектов в геосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта

- 2006 г. // Успехи современной радиоэлектроники. — 2007. — № 3. — С. 38—53.
5. 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.
 6. 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.
 7. Емельянов Л. Я., Склярков И. Б., Черногор Л. Ф. Отклик ионосферы на солнечное затмение 1 августа 2008 г.: результаты вертикального зондирования // Космічна наука і технологія. — 2009. — **15**, № 4. — С. 12—21.
 8. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Результаты расчетов и обсуждение // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 1. — С. 57—64.
 9. Физика верхней атмосферы / Под ред. Дж. А. Ратклифа. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. — 1963. — 504 с.
 10. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. — 2000. — **5**, № 4. — С. 371—375.
 11. Черногор Л. Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2010. — **50**, № 3. — С. 361—376.
 12. Шакина Н. П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 310 с.
 13. Evans J. V. An F region eclipse // J. Geophys. Res. — 1965. — **70**, N 1. — P. 131—142.
 14. Evans J. V. On the behavior of foF2 during solar eclipses // J. Geophys. Res. — 1965. — **70**, N 3. — P. 733—738.
 15. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., Holt J. M. Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill // J. Geophys. Res. — 1986. — **91**, N A2. — P. 1651—1660.

Надійшла до редакції 12.03.11

L. F. Chernogor, V.V. Barabash

THE RESPONSE OF THE MIDDLE IONOSPHERE
TO THE SOLAR ECLIPSE OF 4 JANUARY 2011
IN KHARKIV: SOME RESULTS OF VERTICAL
SOUNDING

We describe our results of observations for the ionosphere dynamics at heights from 100 to 250 km during the partial (about 0.78) solar eclipse on 4 January 2011 near Kharkiv. The solar eclipse caused some modification of the ionosphere at all heights at first to the nightly conditions, and then to daily ones. The critical frequency of the F2-layer decreased by a factor of 2.1. The delay of these variations with respect to the main magnitude of the solar disk obscuration was equal to about 16 min. The virtual height of signal reflection near the maximum of the F2-layer ionization increased by 70 km, and the height of the model parabolic layer, h_p , increased by 10 km. During the solar eclipse, some decrease in electron density and growth of quasi-periodic variations with periods of about 30 and 60 min are detected at all observable heights.