

Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствовавших затмению Солнца 11 августа 1999 г.

Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 5 января 2001 г.

При помощи радара доплеровского зондирования (3.3 и 3.5 МГц) выполнены наблюдения за состоянием средней ионосферы в дневное время 10 и 12 августа, а также 11 августа 1999 г. (день 83 %-го затмения Солнца). Зарегистрированы и объяснены изменения параметров доплеровских спектров, сопутствовавших затмению. Наблюдаемые процессы длились более двух часов и вызваны в основном охлаждением атмосферного газа, уменьшением скорости ионизации и последующим уменьшением на 40 % концентрации электронов N в средней ионосфере, а также генерацией и распространением квазипериодических процессов с переменным периодом и амплитудой $\Delta N/N \approx 1\%$ (в E-области ионосферы). Зафиксированная “регуляризация” доплеровских спектров обусловлена, по-видимому, подавлением неоднородной структуры ионосферы.

За допомогою радара доплерівського зондування (3.3 та 3.5 МГц) виконано спостереження за станом середньої іоносфери в денний час 10 і 12 серпня, а також 11 серпня 1999 р. (день 83 %-го затемнення Сонця). Зареєстровані та знайшли пояснення зміни параметрів доплерівських спектрів, що супроводжували затемнення. Спостережувані процеси тривали більше двох годин і обумовлені в основному охолодженням атмосферного газу, зменшенням швидкості іонізації і наступним зменшенням на 40 % концентрації електронів N в середній іоносфері, а також генерацією та розповсюдженням квазіперіодичних процесів зі змінним періодом і амплітудою $\Delta N/N \approx 1\%$ (в E-області іоносфери). Зафіксована “регуляризація” доплерівських спектрів обумовлена, мабуть, пригніченням неоднорідної структури іоносфери.

Введение

Исследованию эффектов, сопутствующих затмению Солнца (ЗС), посвящены многие работы (см., например, ссылки в статье [1]). Обычно внимание уделяется изучению эффектов в F-области ионосферы, где они сложны из-за ионосферно-плазмосферного взаимодействия (см., например, [2-6]). Процессы в нижней и средней ионосфере, вызванные ЗС, исследованы меньше. Результаты наблюдения возмущений в нижней ионосфере, обусловленных затмением Солнца 11 ав-

густа 1999 г., описаны в работе [1]. Там же приведены общие сведения о ЗС. Здесь отметим лишь следующее. Полоса полного затмения проходила вдоль направления Великобритания – Турция. Наши наблюдения выполнены в Радиофизической обсерватории ХНУ (вблизи г. Харькова) [7]. Минимальное расстояние от обсерватории до полосы полного затмения составляло около 900 км. В месте наблюдения ЗС продолжалось с 12:57 до 15:29 (здесь и далее используется киевское время). Фаза максимального покрытия (83 %) имела место в 14:13.

Настоящая статья, являясь продолжением [1], посвящена изложению результатов наблюдения процессов в ионосфере на высотах 100 ÷ 150 км, сопутствовавших ЗС 11 августа 1999 г.

Средства радиозондирования

Для зондирования средней ионосферы (высоты $z \approx 90 \div 300$ км) использовался двух-частотный доплеровский радар вертикального зондирования [7]. Его основные параметры: частота $f = 1 \div 24$ МГц (измерения выполнены на частотах 3.3 и 3.5 МГц), мощность передатчика $P = 1$ кВт, длительность импульса $\tau = 500$ мкс, частота повторения $F = 100$ Гц, коэффициент усиления антенны $G \approx 1 \div 10$. Отраженный сигнал принимается в полосе частот 10 Гц, что обеспечивает высокое (более чем $10^2 \div 10^3$) отношение сигнал/помеха. Экспериментальные данные сохранялись на магнитной ленте в цифровом виде. Инструментальная погрешность измерений доплеровского смещения частоты составляла 0.01 Гц.

Общий контроль за состоянием ионосферы осуществлялся при помощи стандартного ионозонда (1 ионограмма за 5 мин, погрешность измерения критических частот $f_{o,x}F2$ около 0.05 МГц) и специализированного магнитометра, которые более подробно описаны в работе [7]. Другие данные взяты из сети Internet. Оказалось, что 10, 11 и 12 августа 1999 г. поток солнечного радиолучения $F_{10.7}$ составлял соответственно 127, 128 и 123 (в единицах 10^{-22} Вт·м²·Гц⁻¹), суммарный планетарный индекс ΣK_p – 15, 18 и 21, а геомагнитный индекс A_p – 7, 8 и 10. Таким образом, первые два дня были умеренно спокойными, а третий день – умеренно возмущенным.

Методика измерений и обработки данных

Измерения огибающей биений между колебаниями опорного генератора и принятым сигналом выполнены 10, 11 и 12 августа 1999 г. Данные для первого и третьего дней использовались как контрольные. Геофизическая об-

становка в течение всего периода была относительно спокойной. Частота f_oF2 на ионограммах с 9:00 до 18:00 ч изменялась в пределах 6 ÷ 8 МГц.

По результатам измерений доплеровским радаром оценивались доплеровские спектры (ДС) по 512 отсчетам на интервале времени 51.2 с. При этом разрешающая способность по частоте составляла 0.02 Гц. Информация о доплеровских спектрах фиксировалась каждую минуту. Для оценки периодов достаточно медленных вариаций доплеровского смещения частоты $f_d(t)$, соответствующей центру ДС, применялось быстрое преобразование Фурье на интервалах времени 64 и 128 мин.

Вариации ДС на двух близких частотах, как и следовало ожидать, были подобными. Поэтому далее описываются результаты наблюдений на частоте 3.5 МГц.

Результаты наблюдений

Днем 10 августа 1999 г. ионосфера была достаточно спокойной (рис. 1). Доплеровское смещение частоты $f_d \approx 0$. Эпизодически наблюдалось уширение ДС и их “рассыпание”, ширина спектра достигала 0.5 Гц.

С 13:10 до 14:15 ионосфера оставалась практически невозмущенной. В интервале времени 14:15 ÷ 15:35 ДС были чаще “рассыпанными”, чем одномодовыми. В течение следующего часа ионосфера была скорее невозмущенной. После 16:30 в ней возникли заметные возмущения, квазипериодические колебания с переменным периодом.

Днем 12 августа 1999 г. ионосфера была умеренно возмущенной (рис. 2). Большую часть времени имело место уширение ДС до 0.7 ÷ 0.8 Гц и их “рассыпание”. Эпизодически появлялись слабые квазипериодические процессы с периодом $T \approx 6$ мин и амплитудой $f_{da} \approx 0.1$ Гц. В интервале времени 13:10 ÷ 14:10 характер сигнала практически не изменялся. С 14:10 до 15:40 “рассыпанный” ДС перемежался с одномодовым. В интервале времени 15:40 ÷ 15:50 сигнал был преимущественно двухмодовым, причем разность доплеровских частот достигала 1 Гц. После 15:50 ионосфера была практически невозмущенной.

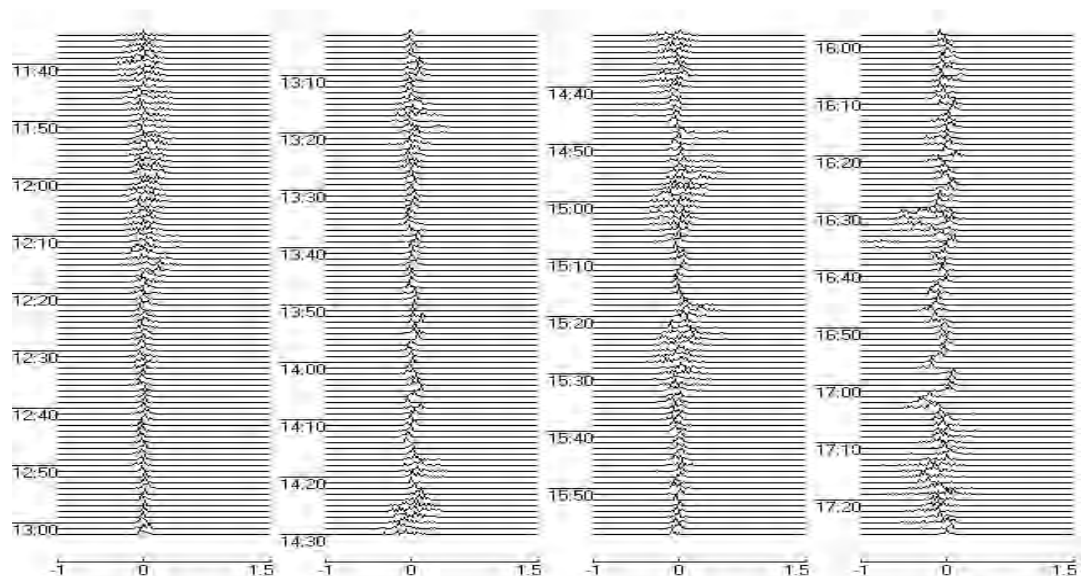


Рис. 1. Вариации доплеровских спектров за день до ЗС, 10 августа 1999 г. ($f \approx 3.5$ МГц). День относился к невозмущенным. По горизонтальной оси отложено доплеровское смещение частоты в Гц, а по вертикальной оси – киевское время

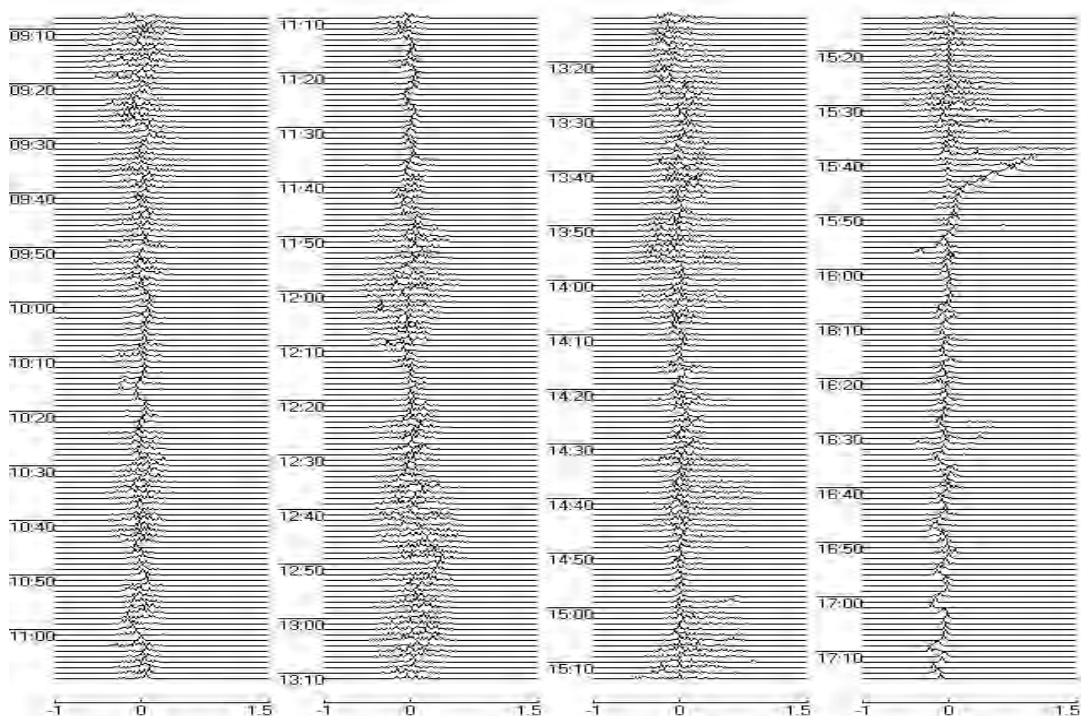


Рис. 2. Вариации доплеровских спектров спустя день после ЗС, 12 августа 1999 г. ($f \approx 3.5$ МГц). День относился к умеренно-возмущенным. Оси те же, что на рис. 1

В день ЗС состояние ионосферы было иным (рис. 3). Примерно с 9:00 и до 13:15 спектр был “рассыпанным”, его ширина изменялась от 0.5 до 1 Гц. Лишь за 10 мин до начала ЗС ширина спектра уменьшилась до 0.2 Гц, а с 13:15 до 14:35 он оставался одно-модовым. Важно, что в интервале времени 13:42÷14:07 наблюдался квазипериодический процесс с переменным периодом. Преобладали периоды (4 ± 1) и (11 ± 1) мин. В это же время постоянная составляющая $f_d \approx -0.1$ Гц (минимальное значение -0.14 Гц). Примерно с 14:08 до 14:18 смещение $f_d(t) \approx 0$. В интервале времени 14:18÷15:00 величина $f_d \approx 0.1$ Гц (максимальное значение не превышало 0,12 Гц). На положительное смещение доплеровской частоты накладывается “рассыпание” ДС, а затем кратковременный квазипериодический процесс с переменным периодом. С 15:10 в течение часа сигнал был практически одно-модовым. С 16:10 до 16:30 имело место уширение

ДС до $0.3 \div 0.6$ Гц. В интервале времени 16:18÷16:28 появилась вторая мода со сдвигом по частоте на величину не превышающую 1.1 Гц. Интересно, что на частоте 3.3 МГц эта мода практически не наблюдалась. В остальном ДС на частотах 3.3 и 3.5 МГц в течение трех дней были похожими.

После 16:50 в ионосфере имел место квазипериодический процесс с $T \approx (7 \pm 1)$ мин и $f_{da} \approx 0.1$ Гц.

Добавим, что на ионограммах, снятых с периодом 5 мин, вскоре после начала затмения наблюдалось постепенное уменьшение $f_o F2$, достигшее в момент максимальной фазы 0.4 МГц. Затем этот параметр в течение 1 ч увеличился практически до исходной величины (7 МГц). Зависимости $f_o F2(t)$ 10 и 11 августа были достаточно близкими, в то время как 12 августа частота $f_o F2$ была меньше в среднем на $1 \div 2$ МГц. Это означает, что 12 августа ионосфера была слабо возмущенной (напомним, что индексы $A_p \approx 10$, $\Sigma K_p \approx 21$).

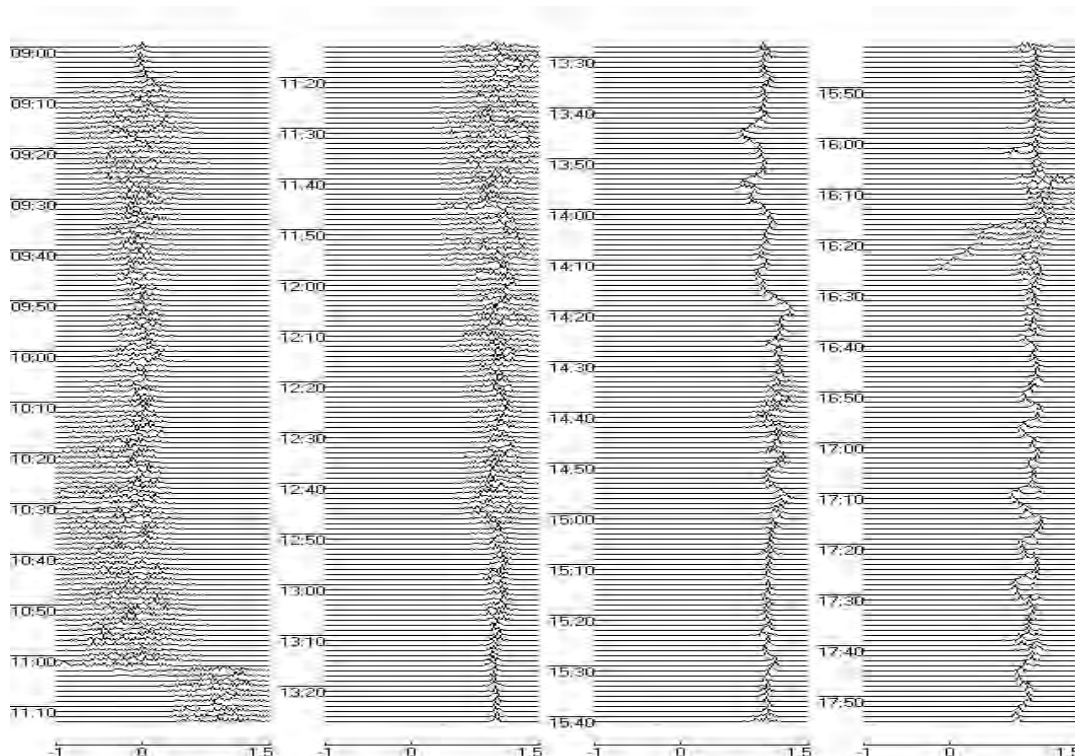


Рис. 3. Вариации доплеровских спектров в день ЗС, 11 августа 1999 г. ($f \approx 3.5$ МГц). День относился к невозмущенным. Оси те же, что на рис. 1. В 11:13 введено смещение +1 Гц

В момент максимального покрытия Солнца относительное изменение

$$|\Delta N/N| \approx 2|\Delta f_o F2|/f_o F2 \approx 11\%.$$

Наряду с уменьшением N наблюдался также квазипериодический процесс длительностью около 1.5 ч с амплитудой $\Delta f_o F2 \approx 0.1$ МГц. При этом $\Delta N/N \approx 3\%$.

Результаты расчетов

Радиоволна с частотой порядка 3 МГц в дневное время отражается на высоте около 120÷130 км, где электронная концентрация $N \approx 10^{11}$ м⁻³. На этих высотах можно пренебречь процессом переноса заряженных частиц, так что уравнение баланса концентрации электронов принимает вид:

$$\frac{dN}{dt} = q - \alpha N^2, \quad (1)$$

где q – скорость образования электронов, α – эффективный коэффициент рекомбинации. Время изменения концентрации электронов $t_N = (2\alpha N)^{-1}$. Полагая для E-области ионосферы $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-13}$ м⁻³·с⁻¹ и $N \approx 10^{11}$ м⁻³ [8], получим $t_N \approx 16$ с. Это время намного меньше времени покрытия (раскрытия) диска Солнца Луной, которое составляло порядка 76 мин. В этом случае (1) сводится к уравнению:

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

отсюда

$$N = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}. \quad (2)$$

В контрольный день (в невозмущенных условиях) уравнение для N_0 имеет подобный вид:

$$N_0 = \sqrt{\frac{q_0}{\alpha_0}}. \quad (3)$$

В окрестности высоты отражения радиоволны с частотой $f \approx 3$ МГц скорость ионизации $q_0 \approx 3 \cdot 10^9$ м⁻³·с⁻¹. Основной вклад в q_0 вносит солнечное излучение. Другие источники ионизации E-области ионосферы (рассеянное солнечное излучение, потоки энергичных частиц и метеоры) обеспечивают скорость ионизации около $3 \cdot 10^6$ м⁻³·с⁻¹ [8]. Очевидно, что этими источниками можно пренебречь не только в контрольные дни, но и в день ЗС, когда q уменьшается на величину, достигающую 83%, т. е. $q_{\min} \approx 0.17q_0$. Действительно, при ЗС

$$q(t) = q_0(1 - A(t)), \quad (4)$$

где $A(t)$ – функция покрытия (рис. 4, а), q_0 – скорость ионизации в отсутствие затмения. (Здесь не учитывается ионизация излучением короны Солнца). Строго говоря, q_0 также зависит от времени, поскольку $q_0 \propto \cos \chi(t)$, где $\chi(t)$ – зенитный угол. Так как ЗС имело место примерно в полдень, модуль производной от функции $\cos \chi(t)$ не превышал $3 \cdot 10^{-2}$ ч⁻¹. В то же время $|dA/dt| \approx 0.8$ ч⁻¹. Таким образом, можно полагать, что $q_0(t) \approx \text{const}$. Допускаемая при этом погрешность менее 4%.

Из (2), (3) и (4) следует:

$$N(t) = N_0 \sqrt{1 - A(t)}. \quad (5)$$

Зависимость $N(t)/N_0$ приведена на рис. 4, б. Видно, что $(N/N_0)_{\min} \approx 0.4$, а относительное уменьшение N достигает 60%. Из (5) получаем:

$$\frac{1}{N_0} \frac{dN}{dt} = -\frac{1}{2\sqrt{1-A}} \frac{dA}{dt}. \quad (6)$$

Для оценки доплеровского смещения частоты можно применить соотношение из работы [9] (см. также Приложение):

$$f_d \approx f \frac{L_g}{c} \left(\frac{1}{N_0} \frac{dN}{dt} \right) = -f \frac{L_g}{c} \frac{1}{2\sqrt{1-A}} \frac{dA}{dt}, \quad (7)$$

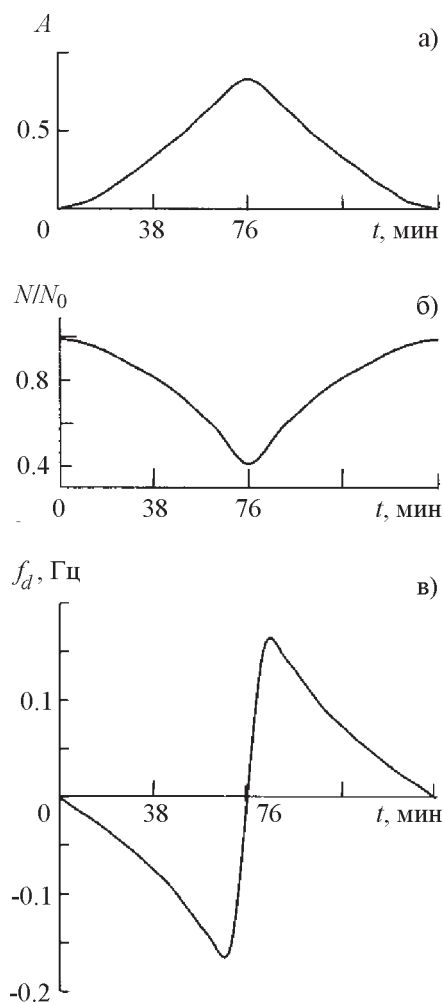


Рис. 4. Расчетные временные зависимости функции покрытия (а), концентрации электронов в окрестности области отражения радиоволны (б) и доплеровского смещения частоты для $f \approx 3.5$ МГц, $L_g = 50$ км (в)

где L_g – групповой путь радиосигнала в ионосфере, c – скорость света в вакууме. Используя рассчитанную функцию покрытия и выражение (7), можно построить зависимость $f_d(t)$ (рис. 4, в). Видно, что сначала в течение примерно 76 мин доплеровское смещение отрицательно, оно достигает значений около -0.15 Гц. В окрестности фазы максимального покрытия f_d резко уменьшается, переходит через нуль и быстро возрастает до 0.15 Гц. Далее происходит медленное убывание $f_d(t)$ до нуля.

Обсуждение

С ЗС, скорее всего, связаны такие эффекты.

1. Сдвиг доплеровской частоты, достигающий 0.14 Гц, в сторону отрицательных значений, который наступает примерно через 40 мин после начала затмения и длится около 20 мин (примем это значение за характерное время t_r , используемое ниже при теоретических оценках f_d). Неизменность значения f_d с $14:08$ до $14:18$ (фаза максимального покрытия $A_{\max} \approx 80 \div 83\%$). Сдвиг доплеровской частоты, не превышающий 0.12 Гц, в сторону положительных значений, который наблюдался в интервале времени $14:18 \div 15:10$ ($\Delta T \approx 52$ мин).

2. Генерация двух квазипериодических колебаний с переменным периодом как на стадии увеличения функции покрытия Солнца, так и на стадии ее уменьшения. На первой стадии длительность процесса генерации $\Delta T \approx 28$ мин ($13:42 \div 14:10$), на второй – $\Delta T \approx 30$ мин ($14:35 \div 15:05$). В интервале времени $14:15 \div 14:45$, скорее всего, имеет место третье колебание, которое примерно в $14:30$ накладывается на второе колебание и возникает “рассыпание” ДС. Продолжительность третьего колебания – около 30 мин.

3. Подавление процесса “рассыпания” ДС (т. е. их “регуляризация”), которое наступило практически в момент начала ЗС и длилось в течение всего затмения (за исключением интервала времени $14:33 \div 14:45$, когда проявлялась другая причина “рассыпания”).

Рассмотрим эти эффекты подробнее.

Изменение f_d примерно на ± 0.1 Гц длится десятки минут. Сдвиг доплеровской частоты может быть вызван изменением концентрации электронов в средней ионосфере, в том числе в окрестности области отражения радиоволны, а также смещением этой области. На первой стадии покрытия Солнца уменьшение f_d свидетельствует об уменьшении N и движении области отражения вверх, на второй стадии – об увеличении N и движении области отражения в противоположном направлении. Описанное поведение $f_d(t)$ в целом соответствует результатам расчетов (см. рис. 4). В наблюдаемой и расчетной за-

висимостях $f_d(t)$ есть некоторые количественные различия. В частности, отрицательное смещение наступает не сразу после начала ЗС, и его абсолютная величина меньше расчетного значения. Не исключено, что ЗС стимулирует также увеличение N , например, в результате высыпания заряженных частиц из магнитосферы. Однако более важной причиной ионизации средней ионосферы представляется излучение непокрытой короны Солнца. Оценки показывают, что оно дает вклад в скорость ионизации около $0.2q_0$. При этом $(N/N_0)_{\min} \approx 0.6$, $|f_{d\min}| \approx f_{d\max} \approx 0,12$ Гц. Эти значения лучше согласуются с наблюдаемыми.

Оценим величины изменения концентрации электронов и скорости движения области отражения. При ряде упрощающих предположений справедлива формула:

$$\frac{\Delta N}{N_0} \approx \frac{c}{L_g} \int_0^{t_r} \frac{f_d(t)}{f} dt \approx \frac{f_{d\max}}{2f} \frac{ct_r}{L_g}.$$

Полагая, что в дневных условиях на частоте $f \approx 3.5$ МГц групповой путь радиосигнала в ионосфере $L_g \approx 50$ км, $t_r \approx 50$ мин, для $f_{d\max} \approx -0.14$ Гц получим: $\Delta N/N_0 \approx 0.42$, а $\Delta N \approx -4.2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Добавим, что L_g определено по ионограммам, а t_r – по данным доплеровского зондирования (см. рис. 3).

Если доплеровский эффект вызван движением области отражения, то его скорость равна (см., например, [9])

$$v = \frac{1}{2} \frac{f_d}{f} c.$$

Оценки дают $v \approx 5$ м/с. Так как уменьшение f_d длится около 20 мин, то за это время область отражения поднимется вверх на несколько километров.

На стадии уменьшения покрытия Солнца имели место рост N на величину, не превышающую 36 % от N_0 , и движение области отражения радиоволны со скоростью не более 5 м/с примерно на 5 ÷ 6 км вниз.

Второй эффект заключается в наблюдении трех квазипериодических колебаний. Первое и второе колебания возникают на стадиях увеличения и уменьшения покрытия Солнца. Они имеют близкую продолжительность (около 30 мин). Первое возникает через 40 мин после начала ЗС, второе – через 22 ÷ 23 мин после наступления фазы максимального покрытия. Такие запаздывания обусловлены, по-видимому, инерционностью в изменении температуры газа и составляют несколько десятков минут [1].

Третье колебание, возможно, связано с акусто-гравитационной волной (АГВ), которая приходит по кратчайшему пути от полосы полного затмения (примерно вдоль меридиана от южной части Черного моря до г. Харькова). Длина этого пути $R_{\min} \approx 900$ км. Запаздывание колебания Δt_1 по отношению к моменту начала ЗС в месте полного затмения (южная часть Черного моря) составляет около 70 мин. Если учесть, что колебание в указанном месте затмения возникает за 30 мин до фазы максимального покрытия, то скорректированное время запаздывания $\Delta t_2 \approx 40$ мин. При этом горизонтальная скорость АГВ оценивается как $v = R_{\min} / \Delta t_2 \approx 375$ м/с. Такую скорость имеют внутренние гравитационные волны на высотах порядка 120 км, где температура газа равна 330 К. Заметим, что в работе [11] значение этой скорости для F-области ионосферы во время затмения 7 марта 1970 г. равно 620 ± 120 м/с. Реальность полученной нами оценки скорости $v \approx 375$ м/с косвенно свидетельствует в пользу того, что АГВ действительно могла приходить от полосы полного затмения.

Оценим далее величину изменений концентрации электронов, сопутствующих квазипериодическим колебаниям. Для этого воспользуемся оценочной формулой из работы [9]:

$$\frac{\Delta N}{N} \approx \frac{f_{da}}{f} \frac{cT}{4\pi H} n,$$

где T – период колебаний с амплитудой f_{da} , H – приведенная высота нейтральной атмос-

феры, $\bar{n} \approx 0.5$ – среднее по высоте значение показателя преломления радиоволны. Используя экспериментальные значения $f_{da} \approx 0.1$ Гц, $T \approx 10$ мин и полагая $H \approx 20$ км [12], получим, что амплитуда $\Delta N/N \approx 0.012$, или 1.2 %. В работе [11] значение этой величины составило 1.5 %. Следует иметь в виду, что в [11] описаны результаты исследования АГВ на значительно больших удалениях от полосы полного затмения, что должно привести к уменьшению отношения $\Delta N/N$. С другой стороны, в указанной работе $\Delta N/N$ измерялось в F-области ионосферы, где эта величина имеет большие значения (см. ниже).

Теоретическую оценку $\Delta N/N$ произведем исходя из следующих соотношений. Относительное изменение температуры воздуха у поверхности Земли $\Delta T/T_0 \approx 10/300 \approx 0.03$ [1]. Такого же порядка и относительное изменение давления $\Delta p/p$. Нетрудно показать, что лишь малая часть ($\eta = 10^{-7}$) всей энергии возмущающего источника (охлажденной области атмосферы) переходит в энергию АГВ. Более строгие расчеты [13] дают $\eta \approx 10^{-7} \div 10^{-5}$ для различных удалений от полосы полного затмения. Поэтому в волне на уровне Земли $(\Delta p/p)_{w0} \approx \sqrt{\eta} (\Delta p/p) \approx 10^{-5}$. По мере распространения АГВ вверх ее амплитуда растет по закону [12]:

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_w = \left(\frac{\Delta p}{p}\right)_{w0} \exp\left(\int_0^z \frac{dz}{2H(z)}\right).$$

При $z \approx 120$ км значение $(\Delta p/p)_w$ увеличивается примерно в $3 \cdot 10^3$ раз и достигает $3 \cdot 10^{-2}$. Электронная концентрация на высотах $z \leq 300$ км, являясь малой примесью, модулируется нейтральной компонентой. Легко показать, что

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{H}{L_N} \left(\frac{\Delta p}{p}\right)_w,$$

где $L_N = N|\partial z/\partial N|$ – характерный масштаб изменения N . При $H \approx 20$ км, $L_N \approx 50$ км имеем $\Delta N/N \approx 1.2 \cdot 10^{-2} = 1.2$ %. Эта оценка

соответствует значению $\Delta N/N$, которое наблюдалось в нашем эксперименте.

Третий эффект заключается в “регуляризации” ДС, т. е. в исчезновении мелкомасштабных случайных неоднородностей в окрестности области отражения радиоволны и ниже. Основная причина генерации неоднородностей с масштабом $l \approx 10 \div 10^3$ м в E- и F-областях – неустойчивости в магнитоактивной ионосферной плазме [12, 14]. Для их возникновения требуется соблюдение определенных условий: превышение порога возникновения неустойчивости, достаточно большие значения инкремента и др. Нарушение этих условий приводит к подавлению неустойчивостей, а значит и к исчезновению неоднородной структуры на высотах $100 \div 150$ км. Толчком к подавлению неустойчивостей при наступлении ЗС явилось, скорее всего, охлаждение атмосферного газа. Об этом свидетельствует большая инерционность наблюдаемого эффекта подавления. Как видно из рис. 3, уменьшение ширины спектра начинается до оптического контакта дисков небесных тел над пунктом наблюдения и заканчивается примерно через 10 мин после него.

Выводы

1. Зарегистрированы и объяснены вариации доплеровского смещения частоты на всех стадиях ЗС. Они обусловлены сначала уменьшением на 40 %, а затем возрастанием на 36 % концентрации электронов на высотах $100 \div 150$ км.

2. Зафиксировано появление в течение ЗС квазипериодических вариаций доплеровских спектров, связанных с генерацией и распространением АГВ в атмосфере.

3. Обнаружен эффект “регуляризации” доплеровских спектров, сопутствовавший затмению. По-видимому, он объясняется подавлением плазменной турбулентности в ионосфере на высотах $100 \div 150$ км.

Авторы выражают глубокую благодарность С. Г. Чулакову и С. Н. Шапталю за помощь в проведении экспериментов.

Приложение

Без учета рефракции доплеровское смещение частоты при вертикальном зондировании изотропного слоя ионосферы описывается хорошо известным выражением (см., например, [9, 10]):

$$f_d = -2 \frac{f}{c} \int_0^{z_r} \frac{\partial n}{\partial t} dz, \quad (\text{П.1})$$

где z_r – высота отражения волны; $n = \sqrt{1 - (f_p/f)^2} = \sqrt{1 - N/N_r}$, f_p – плазменная частота, $N_r = N(z_r)$. Так как без учета процессов переноса $\partial N/\partial t = dN/dt$ и

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{2n} \left(\frac{1}{N_r} \frac{dN}{dt} \right),$$

то

$$f_d = \frac{f}{c} \int_0^{z_r} \left(\frac{1}{N_r} \frac{dN}{dt} \right) \frac{dz}{n}.$$

С учетом формулы (6) получаем:

$$f_d = -\frac{f}{c} \frac{1}{2\sqrt{1-A}} \frac{dA}{dt} \int_0^{z_r} \frac{N_0}{N_r} \frac{dz}{n} \approx -f \frac{L_g}{c} \frac{1}{2\sqrt{1-A}} \frac{dA}{dt} \left(\overline{\frac{N_0}{N_r}} \right), \quad (\text{П.2})$$

где $\left(\overline{N_0/N_r} \right)$ – среднее по высоте значение отношения N_0/N_r . Для оценок при зондировании дневной ионосферы на частотах порядка 3 МГц обычно можно положить $\left(\overline{N_0/N_r} \right) \approx 1$, после чего получаем выражение (7).

Модельные расчеты показали, что для типичных высотных градиентов N_0 и частоты волны 3 МГц соотношение (7) завышает значения $|f_d|$ примерно на 50, (31 ± 5) и (14 ± 6) % для линейного, параболического и экспоненциального слоев соответственно. Вносить обсуждаемую поправку не имеет смысла, так как формула (П.1) сама является приближенной (не учитывается рефракция, магнитное поле и горизонтальные градиенты N).

Выражение (7) тем точнее, чем больший вклад в интеграл дает диапазон высот в окрестности области отражения. В ночное время радиоволна с частотой около 3 МГц отражается на высоте 200 ÷ 250 км. При этом профиль N можно считать линейным и для оценок рекомендовать следующую формулу:

$$|f_d| \approx f \frac{L_g}{2ct_r}.$$

Литература

1. А. М. Гоков, Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 2000, **5**, №4, с. 348-360.
2. В. Д. Соколов, И. П. Безродных, В. А. Кузьмин, Н. Г. Скрябин. Геомагнетизм и аэрономия. 1998, **39**, №2, с. 139-140.
3. Б. Б. Борисов, Д. А. Егоров, Н. Е. Егоров и др. Геомагнетизм и аэрономия. 2000, **40**, №3, с. 94-103.
4. О. Н. Бойтман, А. Д. Калихман, А. В. Ташилини. Геомагнетизм и аэрономия. 1999, **39**, №6, с. 45-51, с. 52-60.
5. В. И. Таран, Е. И. Григоренко. Вестник Харьковского государственного политехнического университета. 2000, вып. 103, с. 110-112.
6. В. П. Урядов, А. М. Леонов, А. А. Понятов, Г. Н. Бойко, С. П. Терентьев. Изв. вузов. Радиофизика. 2000, **43**, №8, с. 682-686.
7. К. П. Гармаш, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1999, №7, с. 3-15, №8, с. 3-19.
8. А. Д. Данилов. Популярная аэрономия. Ленинград, Гидрометеиздат, 1989, 230 с.
9. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор. Радиофизика и радиоастрономия. 1999, **4**, №3, с. 209-226.

10. К. П. Гармаш, Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. Геомагнетизм и аэрономия. 1999, **39**, №1, с. 72-78.
11. M. J. Davis, A. V. Da Rosa. Nature. 1970, **226**, pp. 1123-1124.
12. Б. Н. Гершман. Динамика ионосферной плазмы. Москва, Наука, 1974. 256 с.
13. G. Chimonas. J. Geophys. Res. 1970, **75**, No. 28, pp. 5545-5551.
14. М. Г. Гельберг. Неоднородности высокоширотной ионосферы. Новосибирск, Наука, 1986. 194 с.

Processes in Bottomside Ionosphere during August 11, 1999 Solar Eclipse

L. S. Kostrov, L. F. Chernogor

Daytime measurements acquired with the HF Doppler radar on 3.3 and 3.5 MHz were used to study the conditions in the bottomside ionosphere on August 10 and 12, 1999, as well as on August 11, 1999 when an 83 % solar eclipse occurred. The variations in Doppler radar signal parameters, which are associated with the solar eclipse, are recorded and their interpretation is given. The processes observed persisted for more than two hours and are mainly caused by atmospheric gas cooling, a decrease in ionization rate, and a subsequent decrease in the electron number density N by 40 % in the bottomside ionosphere. In the ionospheric E-region, quasi-periodic processes with a varying period and an amplitude of $\Delta N/N \approx 1\%$ are revealed. The Doppler spectrum "regularization" recorded is probably caused by the suppression of ionospheric irregular structure.