

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

А. М. Гоков, 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 частичных отражений (2.2 МГц) выполнены наблюдения за состоянием нижней ионосферы в дневное время 10 и 12 августа, а также 11 августа 1999 г. (день 83 %-го затмения Солнца). Обнаружены и объяснены сопутствующие затмению изменения параметров частично-отраженных сигналов. Наблюдаемые процессы длились более двух часов и вызваны в основном охлаждением атмосферного газа, уменьшением скорости ионизации и последующим уменьшением концентрации электронов в нижней ионосфере на 30÷50 %.

За допомогою радара часткових відбиттів (2.2 МГц) виконані спостереження за станом нижньої іоносфери в денний час 10 і 12 серпня, а також 11 серпня 1999 р. (день 83 %-го затемнення Сонця). Виявлені та знайшли пояснення зміни, що супроводжують затемнення, параметрів частково-відбитих сигналів. Процеси, що спостерігалися, тривали більше двох годин і обумовлені в основному охолодженням атмосферного газу, зменшенням швидкості іонізації і подальшим зменшенням концентрації електронів у нижній іоносфері на 30÷50 %.

### Введение

Затмение Солнца (ЗС) дает исследователям уникальную возможность проследить за динамикой околоземной среды. В целом, полное ЗС подобно наступлению кратковременной ночи, поэтому и сопутствующие эффекты в обоих случаях подобны. Однако динамические процессы при конкретном затмении существенно зависят от геофизической обстановки, от степени возмущенности Солнца и околоземной среды. Наблюдения при каждом ЗС позволяют уточнить сопутствующие физические процессы и динамику среды.

Еще с 50-60-х годов XX века предпринимались попытки проследить за вариацией параметров ионосферы во время полных или частичных затмений Солнца (см., например, [1]).

В 70-е годы и позднее изучение процессов, сопутствующих затмениям, существен-

но активизировалось. Для этого использовался, кроме астрономических, весь арсенал существовавших радиофизических, а также ракетных и спутниковых методов. Для исследования нижней ионосферы применялись методы частичных отражений [2], импульсной кроссмодуляции [3, 4], риометрический метод [5], а также СДВ-радиосигналы [6-9]. Изучение процессов в средней и внешней ионосфере производилось при помощи ионозондов (только до главного максимума ионизации [10, 11] или выше этого максимума [12]) с использованием радиосигналов искусственных спутников Земли [12, 14-20], методом некогерентного рассеяния (120 ÷ 750 км) [13], ракетными [21-23] и другими методами [24].

В ходе исследований было установлено, что ЗС вызывает довольно сложный комплекс физических процессов в атмосфере, ионосфере-

ре и геомагнитном поле. К ним относятся охлаждение атмосферного газа, генерация ударной волны плотности и, как результат, акустогравитационных волн (АГВ) в атмосфере, уменьшение концентрации электронов во всех областях ионосферы, уменьшение температур электронов и ионов во внешней ионосфере и др. Заметим, что АГВ наблюдались не всегда и вопрос об их существовании остается открытым (см. [25]). Очень мало сведений имеется о вариациях геомагнитного поля во время ЗС. В работе [7] приводятся данные, из которых следует, что затмение вызвало квазипериодические вариации индукции поля с переменным периодом порядка  $20 \div 40$  мин, амплитудой  $10 \div 20$  нТл и продолжительностью около 2 ч.

Таким образом, эффектам, сопутствующим ЗС, посвящено много работ (включая спецвыпуски [2, 24] и обзор [25]). К новым работам следует отнести статьи [26-30]. Однако из-за сложности процессов и их многообразия восстановление полной картины происходящих явлений далеко от завершения. К этому следует добавить, что полные солнечные затмения в средних широтах бывают относительно редко, а реакция среднеширотной ионосферы на ЗС маскируется воздействием аврорального овала [28]. Поэтому задача исследования эффектов в ионосфере, связанных с ЗС, остается актуальной.

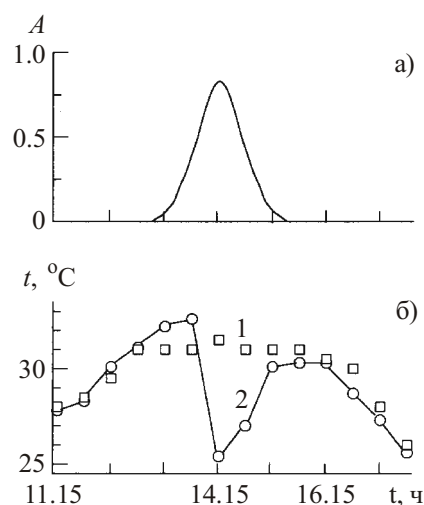
Представляет интерес дальнейшее изучение уже обнаруженных эффектов и поиск других проявлений ЗС в атмосфере, особенно на высотах нижней ионосферы. Этим вопросам и посвящена настоящая работа.

### Общие сведения о затмении Солнца

Для земного наблюдателя угловые размеры Солнца и Луны, как известно, близки между собой. Это обстоятельство приводит к возможности полных ЗС. Они случаются редко, чаще наблюдаются частичные ЗС.

Затмение 11 августа 1999 г. было частичным. Максимальное значение функции покрытия Солнца  $A(t)$  в районе Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (РФО), где

выполнены описываемые ниже измерения, составляло около 83 % (рис. 1). Затмение происходило с 12:57 до 15:29 киевского времени, максимальное покрытие имело место в 14:13. Полоса полного ЗС шириной  $d \approx 110$  км прошла через Великобританию, Францию, Германию, Румынию, Турцию и т. д. Минимальное удаление обсерватории от этой полосы  $R_{\min} \approx 900$  км.



**Рис. 1.** Временная зависимость функции покрытия Солнца (а) и температуры воздуха у поверхности Земли (б):

1 – 10 августа 1999 г., 2 – 11 августа 1999 г. (Здесь и далее время киевское)

Лунная тень скользила по поверхности Земли с запада на восток со скоростью  $v \approx 1000$  м/с. Земля, как известно, вращается в том же направлении. Скорость вращения земной поверхности изменяется с географической широтой от 460 м/с на экваторе до 0 м/с на полюсах. По этой причине в приэкваториальной области лунная тень скользила со скоростью  $v_1 \approx 540$  м/с, т. е. вдвое медленнее, чем в области полюсов. В окрестности РФО эта скорость составляла порядка 750 м/с.

Интересно, что возможна ситуация, когда  $v_1$  превышает скорость звука в атмосфере  $v_s$ , которая в зависимости от высоты изменяется

от 300 до 800 м/с. При этом в газе генерируется ударная волна плотности [31].

Полное ЗС на земном шаре длится около 3.5 ч, частичное – до 5.5 ч. Разумеется, для неподвижного наблюдателя продолжительность полного затмения не превышает 2 ÷ 2.5 мин (в зависимости от места наблюдения), частичного затмения – около 2 ÷ 2.5 ч. Максимальная ширина полосы полного затмения составляет 270 км, а частичного – многие тысячи км.

При покрытии солнечного диска диском Луны поверхность Земли и нижняя часть ее атмосферы (по крайней мере, до озоносферы) охлаждается. Зависимости температуры воздуха  $T$  от времени, полученные в РФО 10 и 11 августа 1999 г., приведены на рис. 1. Видно, что 11 августа в течение первых 30 мин после начала ЗС температура  $T$  уменьшилась на 7 К, далее в течение 60 мин увеличилась примерно на 5 К.

Наступление ЗС сопровождается рядом физических процессов в атмосфере. Их энергетика велика. Оценим, например, изменение внутренней энергии атмосферного газа объемом  $V$  и массой  $m$ :

$$\Delta E = Cm\Delta T = CrV\Delta T = \frac{\pi}{4}Crd^2\Delta z\Delta T,$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $\Delta z$  – толщина охлажденного слоя воздуха,  $C$  – удельная теплоемкость воздуха. Полагая, что у поверхности Земли  $\rho \approx 1.3$  кг/м<sup>3</sup>,  $d \approx 110$  км,  $C \approx 10^3$  Дж/(кг·К),  $\Delta z \approx H \approx 8$  км ( $H$  – приведенная высота атмосферы),  $\Delta T \approx 10$  К, получим  $\Delta E \approx 9.4 \cdot 10^{17}$  Дж. Понижение температуры имело место в течение времени  $\Delta t \approx 90$  мин. При этом средняя мощность  $P = \Delta E/\Delta t$  составила величину около  $1.7 \cdot 10^{14}$  Вт. Полученная оценка  $\Delta E$  соответствует энергии 200-мегатонной термоядерной бомбы, а оценка мощности  $P$  на порядок превышает мощность, потребленную человечеством в 2000 г. Как видно из этих сравнений, энергия и мощность теплового процесса, вызванного ЗС, весьма значительны.

Оценим также удельные характеристики этого процесса. Изменение удельной внутрен-

ней энергии  $\Delta \epsilon$  и удельная мощность  $p$  равны:

$$\Delta \epsilon = Cr\Delta T, \quad p = \Delta \epsilon/\Delta t.$$

Оценки дают  $\Delta \epsilon \approx 1.3 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> и  $p \approx 2.4$  Вт/м<sup>3</sup>. Примерно такие удельные характеристики имеют мощные шквалы и ураганы (тайфуны), хотя их энерговыделение связано с движением масс воздуха, а не с его охлаждением.

Приведенные оценки относятся к области полного затмения. Размер области частичного затмения значительно больше. Учитывая, что продолжительность  $\Delta t$  понижения температуры воздуха составляет около 1.5 ч, продольный размер возмущенной области атмосферы равен  $L \approx v_1\Delta t$ . Полагая, что в средних широтах  $v_1 = 750$  м/с, получим  $L \approx 4000$  км. Пусть поперечный размер этой области того же порядка (это соответствует  $A(t) \sim 0.6$ ). Тогда изменение внутренней энергии в области атмосферы радиусом  $L/2 \approx 2000$  км при среднем значении  $\Delta T \approx 5$  К составляет  $1.6 \cdot 10^{20}$  Дж. Ему соответствует средняя мощность  $3 \cdot 10^{16}$  Вт. Такую энергию имеет крупнейший циклон, а его мощность составляет около  $3 \cdot 10^{14}$  Вт, что на два порядка меньше оцененной выше мощности.

С увеличением высоты  $z$  энергетические характеристики уменьшаются пропорционально  $\rho \propto \exp(-z/H)$ . Так, например, в озоносфере (средняя высота 45 км)  $\rho$  уменьшается на три порядка. При тех же  $\Delta T$  и  $H$  энергетические характеристики процесса, связанного с ЗС, уменьшатся тоже на три порядка.

Таким образом, для атмосферных процессов, вызванных ЗС, энергия, мощность и их удельные значения имеют внушительную величину. Поэтому есть основания считать, что ЗС может вызывать возмущения в атмосфере не только в области тени или полутени, но и далеко за их пределами.

### Средства радиозондирования

Для зондирования нижней ионосферы использовался радар частичных отражений (ЧО) [32]. Его основные параметры: частота  $f = 1.5 \div 4.5$  МГц, импульсная мощность передатчика  $P = 150$  кВт, длительность импульса  $\tau = 25$  мкс, частота повторения  $F = 1 \div 100$  Гц,

коэффициент усиления антенны  $G \approx 40 \div 150$ . Амплитуды частично отраженного сигнала и шумов после оцифровки с частотой 1 Гц записывались на магнитный носитель. Измерения выполнены в диапазоне высот  $45 \div 105$  км с шагом по высоте 3 км.

### Методика измерений и обработки данных

Измерения методом частичных отражений выполнены 10, 11 и 12 августа 1999 г. Данные для первого и третьего дней использовались как контрольные. Геофизическая обстановка в течение 10 и 11 августа была спокойной, день 12 августа был умеренно-возмущенным. Критическая частота  $f_o F_2$  на ионограммах с 9:00 до 18:00 ч (здесь и далее время киевское) изменялась в пределах  $6 \div 8$  МГц.

Измерения амплитуд смеси сигнала и шума обыкновенной и необыкновенной (индексы  $o, x$ ) поляризации и амплитуд шумов  $A_{no}$ ,  $A_{nx}$  выполнены на частоте 2.2 МГц. Для выделения сигнала на фоне шумов перед излучением каждого зондирующего импульса осуществлялось 6 выборок шума в полосе частот 50 кГц. Оценки средних величин интенсивностей ЧО-сигнала  $\bar{A}_{x,o}^2$  и шумов  $\bar{A}_{nx,no}^2$  осуществлялись по 60 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10 %.

По найденным  $\bar{A}_{x,o}^2$  вычислялось их отношение  $R_{xo}$ , используемое далее для получения профилей электронной концентрации  $N(z)$  по методике дифференциального поглощения на основе алгоритма регуляризации [33, 34].

Для оценки периодов достаточно медленных вариаций  $\bar{A}_{x,o}^2(t)$  или концентрации электронов  $N(t)$  использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье на интервале времени 64 или 128 мин.

### Результаты обработки данных наблюдений

Рассмотрим временные вариации средних интенсивностей (далее для краткости – интенсивностей) шумов и сигналов.

Днем 10 августа 1999 г. с 12:00 до 16:00 величина  $\bar{A}_{nx}^2$  в среднем составляла  $10 \div 20$  (здесь и далее в относительных единицах) (рис. 2). После 16:00 имело место значительное вечернее увеличение как  $\bar{A}_{nx}^2$ , так и  $\bar{A}_{no}^2$ . Интенсивность  $\bar{A}_{no}^2$  до 13:00 составляла  $20 \div 30$ , с 13:00 до 14:00 – около 10, затем в течение 1.5 ч – 20.

В день ЗС с 13:10 до 16:00 интенсивности  $\bar{A}_{nx,no}^2$  увеличились в среднем в  $2 \div 3$  раза (рис. 3). Далее наблюдалось непродолжительное (около 0.5 ч) уменьшение интенсивностей, а затем – их вечернее увеличение.

Днем 12 августа 1999 г., очевидно, ионосфера была умеренно-возмущенной. С 12:00 до 16:00  $\bar{A}_{nx,no}^2$  в среднем составляли около  $30 \div 50$  (рис. 4). В интервале времени  $\sim 16:00 \div 17:00$  интенсивности уменьшились в  $4 \div 6$  раз. После 17:00 происходил предвечерний рост интенсивностей.

Таким образом, увеличение  $\bar{A}_{nx,no}^2$  в несколько раз, имевшее место с 13:30 до 16:30, связано, по-видимому, с ЗС.

10 августа поведение интенсивностей сигнала и шума было похожим – в интервале времени  $13:10 \div 15:10$  интенсивности  $\bar{A}_{x,o}^2$  выросли в несколько раз (см. рис. 2).

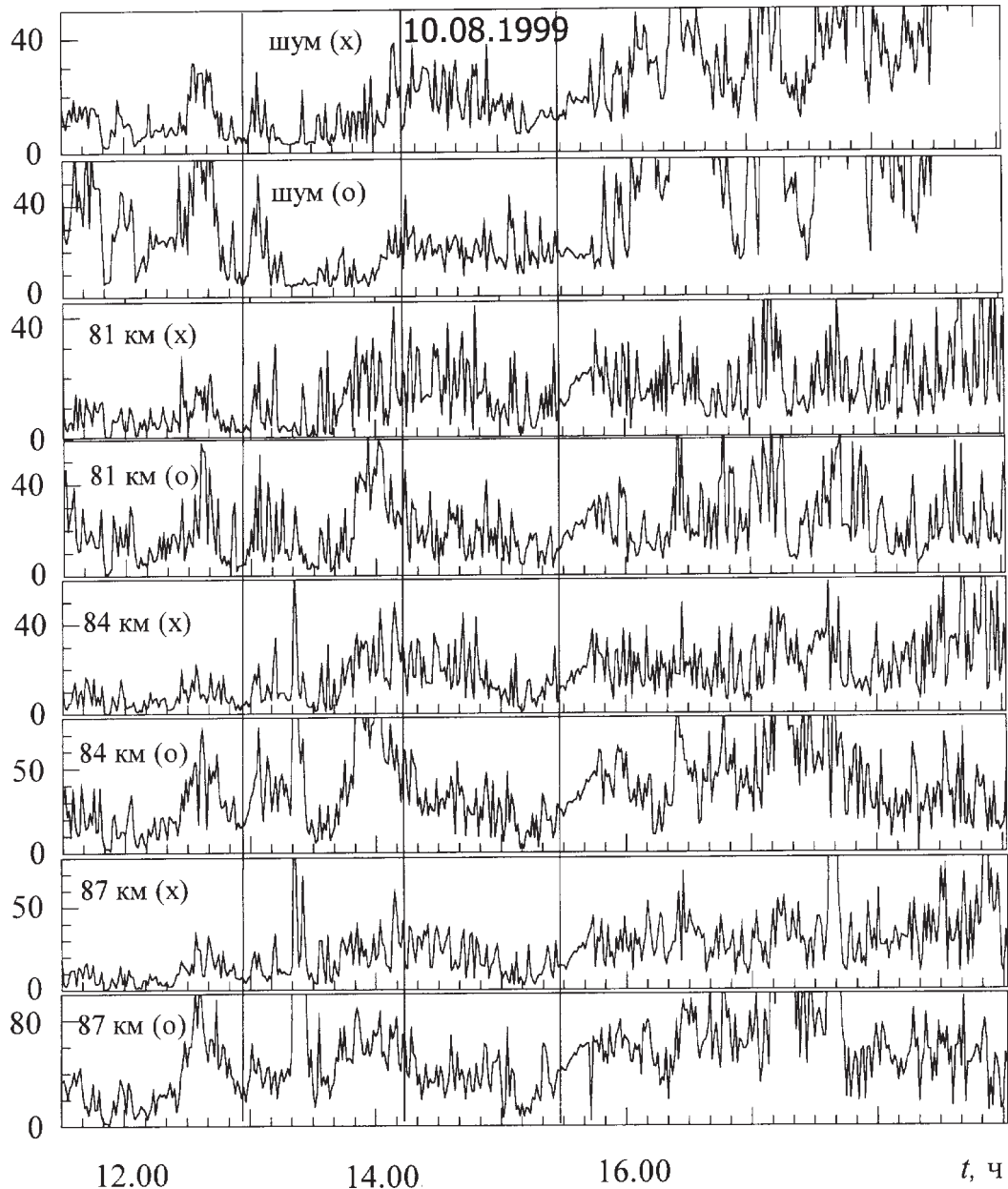
В день затмения после 13:40 наблюдался рост  $\bar{A}_{x,o}^2$ , который продолжался до  $16:00 \div 17:00$  и далее слился с предвечерним увеличением интенсивностей (см. рис. 3).

Поведение  $\bar{A}_{x,o}^2$  12 августа напоминало поведение интенсивностей шумов (см. рис. 4).

Увеличение в несколько раз  $\bar{A}_{x,o}^2$  с 13:10 до  $16:00 \div 17:00$ , по-видимому, связано с затмением.

Рассмотрим далее вариации отношения интенсивностей  $R_{xo}$  (рис. 5). За день до ЗС примерно до 13:00  $R_{xo} \approx 0.3$ . Затем это отношение увеличилось до 2 (для шума) и  $0.7 \div 0.8$  (для сигнала) и оставалось высоким в течение 1.5 ч. После 15:30  $R_{xo} \approx 0.4 \div 0.5$ .

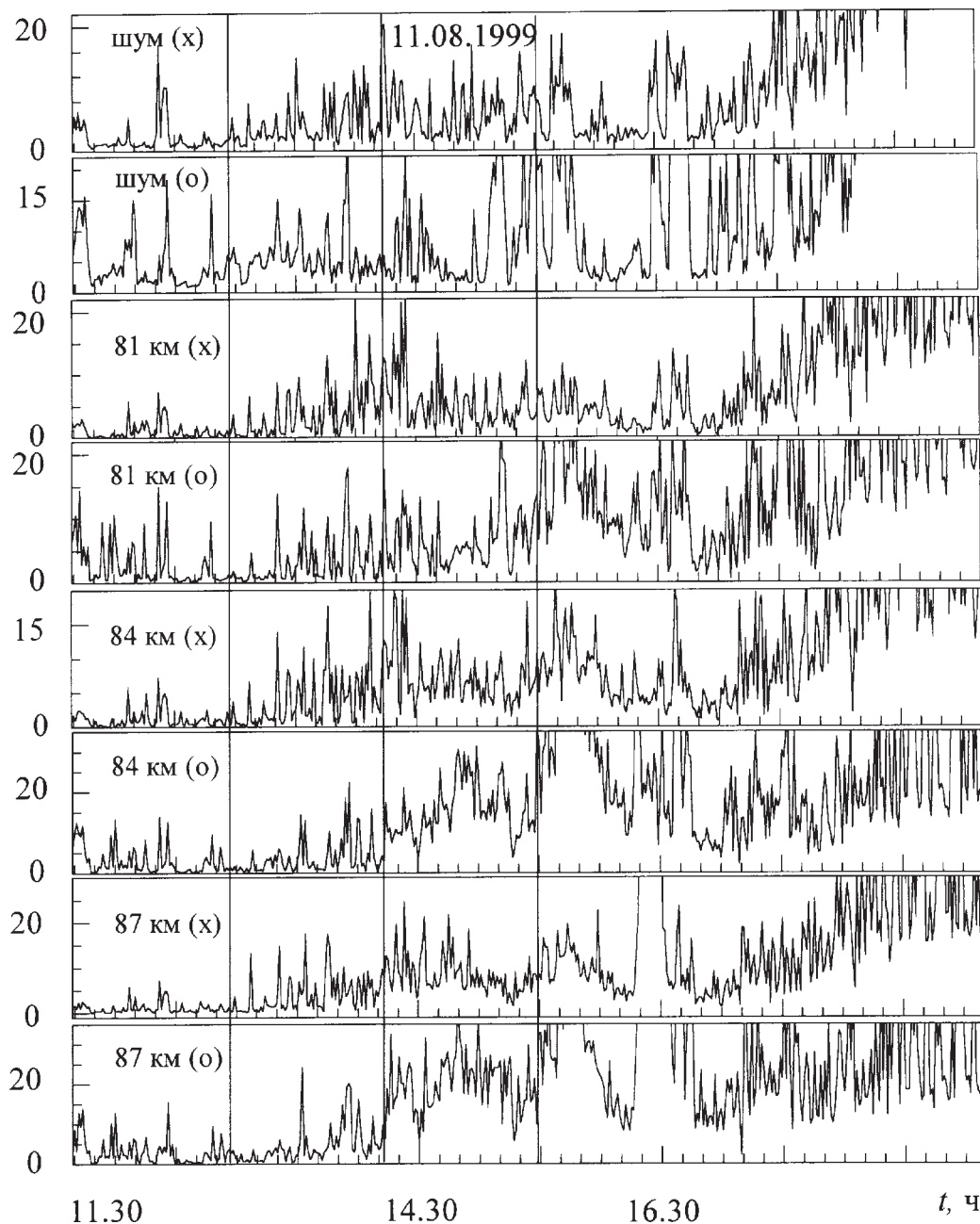
В день ЗС до 13:00 для шума и сигнала отношение  $R_{xo} \approx 0.5 \div 0.7$ . С 13:10 до 14:30  $R_{xo}$  увеличилось в  $1.5 \div 3$  раза. Чем больше высота, тем меньше это увеличение и его продолжительность. После 15:30 и до 17:30 проис-



**Рис. 2.** Временные вариации средних интенсивностей (в относительных единицах) шума (две верхние зависимости) и сигнала отраженного на высотах 81, 84 и 87 км 10 августа 1999 г. (x и o – необыкновенная и обыкновенная поляризации сигнала). Вертикальными линиями показаны условные моменты начала, максимального покрытия и окончания ЗС. Усреднение осуществлялось на интервале 1 мин

ходило существенное (в 3 ÷ 4 раза) уменьшение  $R_{xo}$  (как для шума, так и для сигнала). Такие вариации  $R_{xo}$  отсутствовали в контрольные дни. Они, по-видимому, связаны с затмением. После 17:30 наблюдался предвечерний рост  $R_{xo}$ .

Днем 12 августа до 15:00 отношение интенсивностей оставалось практически неизменным и равным 0.4 ÷ 0.5. В интервале времени 15:30 ÷ 17:30 для шума и сигнала, отраженного на высоте 81 км, происходило увеличение  $R_{xo}$  в 2 ÷ 3 раза. Для высот 84 ÷ 87 км это отношение в течение дня изменялось достаточно слабо.

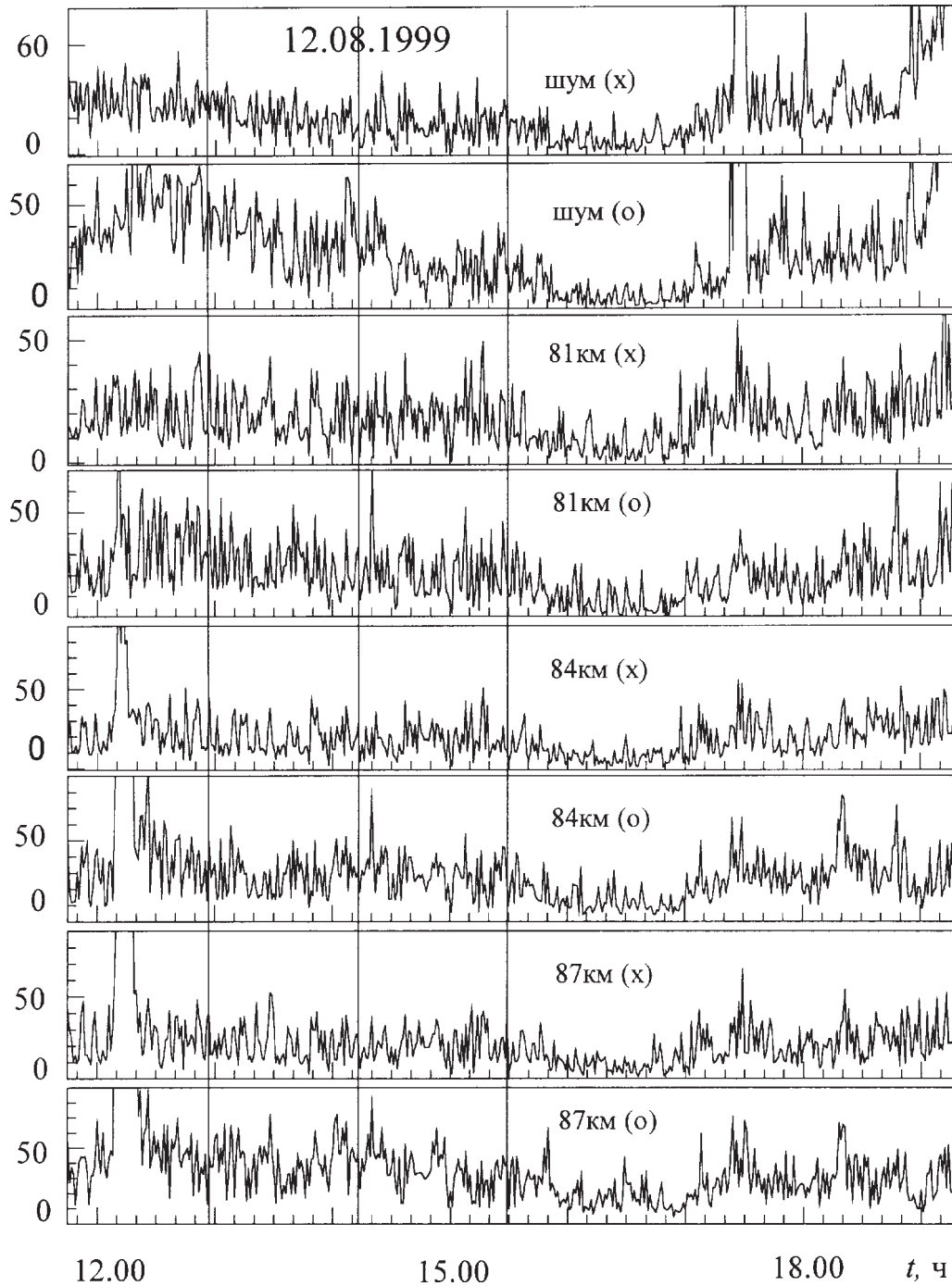


**Рис. 3.** Временные вариации средних интенсивностей шума и сигнала 11 августа 1999 г. Обозначения те же, что и на рис. 2

Опишем временные вариации концентрации электронов  $N$  на фиксированных высотах (рис. 6).

Днем 10 августа примерно до 12:30 на высотах 81 и 84 км  $N(t) \approx \text{const}$ . С 12:30 до 16:00

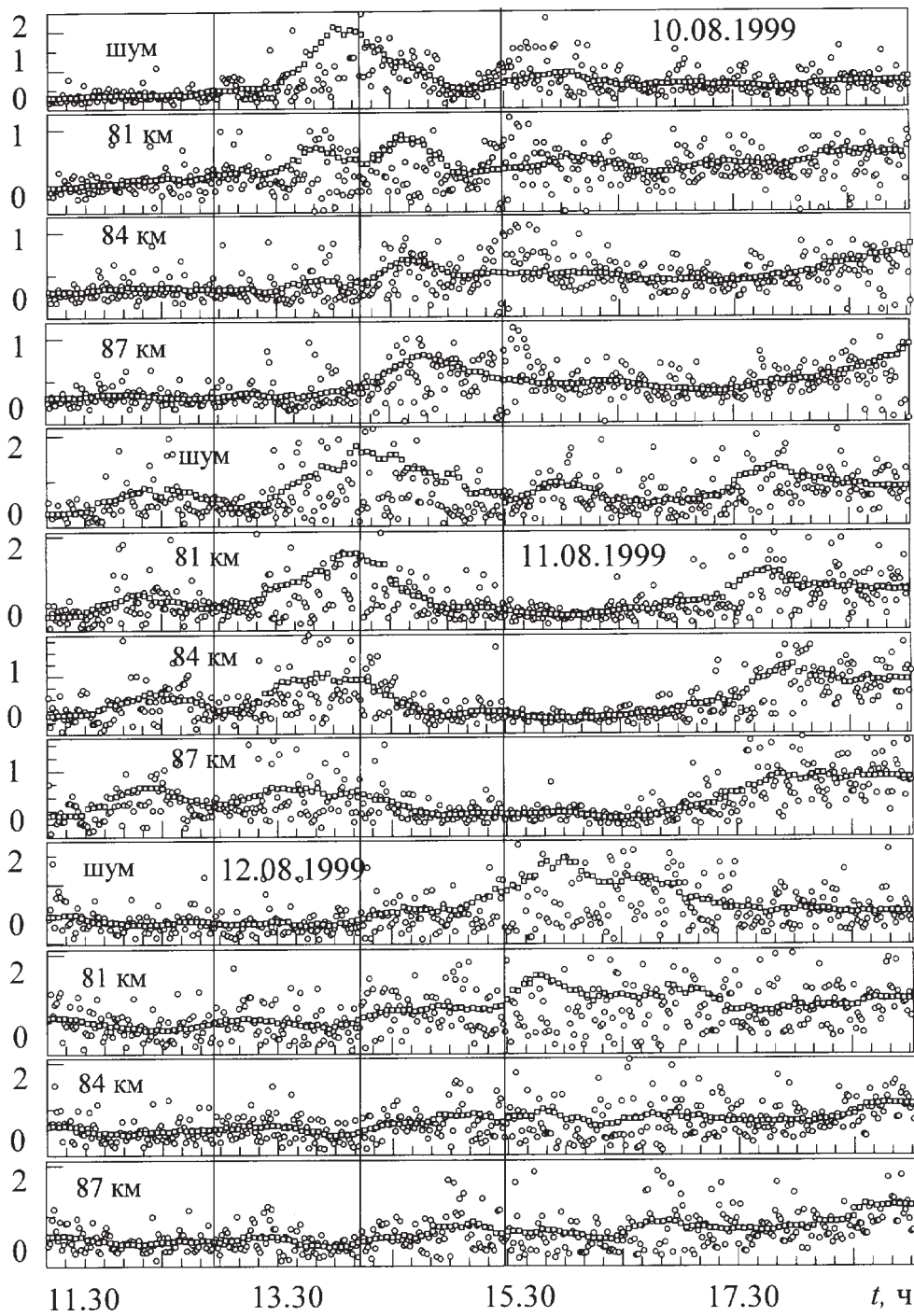
происходило увеличение  $N$  почти в 2 раза. Значения  $N(t)$  на высоте 87 км определены надежно лишь в тех интервалах времени, для которых в нижележащих слоях  $N \leq 10^9 \text{ м}^{-3}$  (при больших  $N$  методика получения электронной концен-



**Рис. 4.** Временные вариации средних интенсивностей шума и сигнала 12 августа 1999 г. Обозначения те же, что и на рис. 2

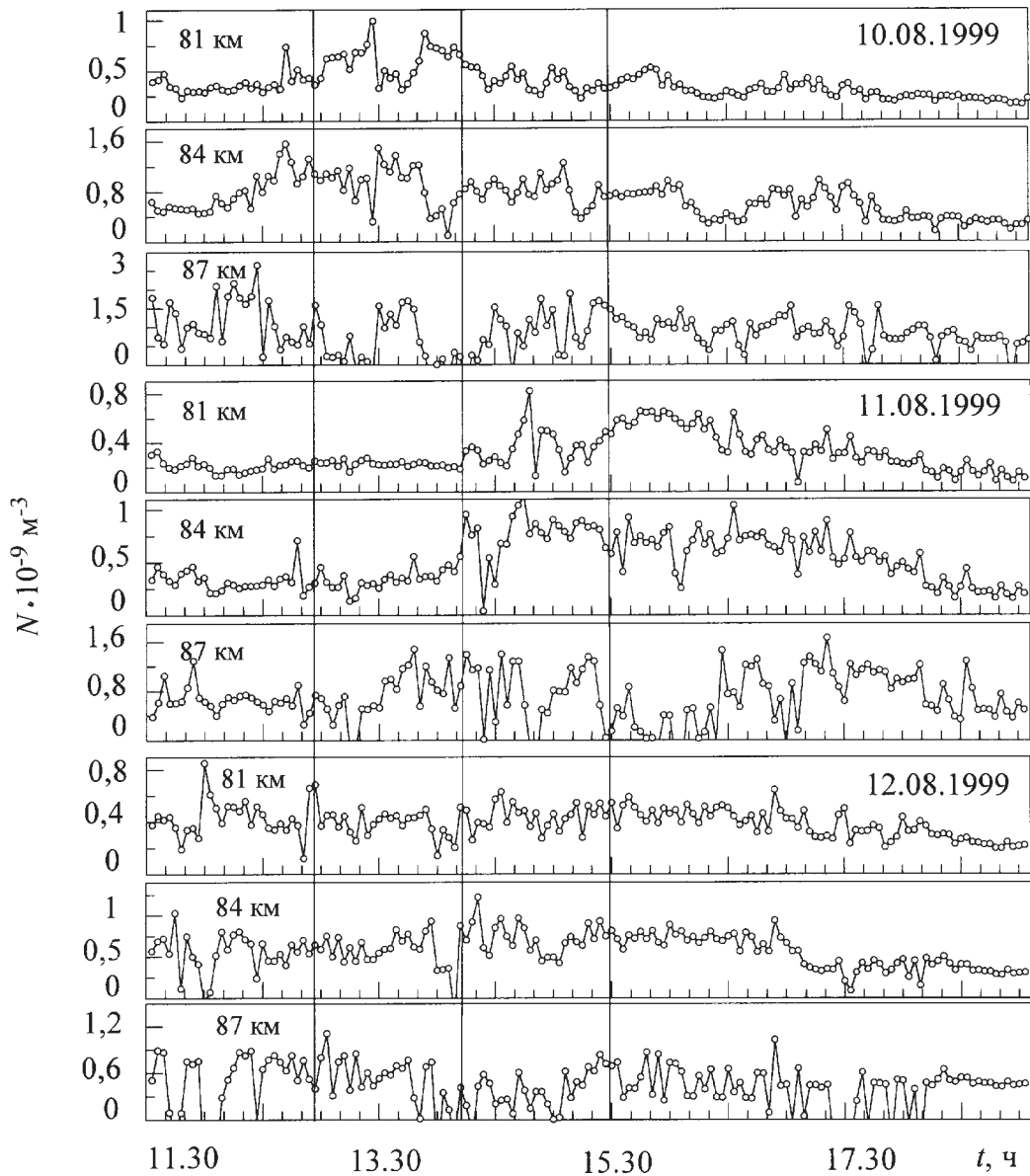
трации на высоте 87 км перестает работать удовлетворительно). После 16:00 на всех высотах  $N$  изменялась слабо. Таким образом, околополу-

денное увеличение концентрации электронов имело место лишь в интервале времени 12:30 ÷ 16:00 с максимумом в 13:00 ÷ 14:00.



**Рис. 5.** Временные вариации отношения средних интенсивностей компонент необыкновенной и обыкновенной поляризаций сигнала:  $\circ$  – усреднение на интервале 1 мин,  $\square$  – дополнительное усреднение указанного отношения методом скользящего среднего на интервале 10 мин с шагом 1 мин. Вертикальными линиями показаны условные моменты начала, максимального покрытия и окончания ЗС





**Рис. 6.** Временные вариации концентрации электронов, полученные с использованием алгоритма регуляризации [33-34]. Интервал усреднения равен 3 мин

В день ЗС на высотах 87÷81 км  $N(t) \approx \text{const}$  до 13:30÷14:10 соответственно. После 13:30÷14:10 концентрация электронов на высотах 81÷87 км увеличивалась соответственно в 2÷3 раза. Продолжительность этого эффекта зависела от высоты – от 3 ч на нижней до 4.5 ч на верхней границе. Можно полагать, что этот эффект стимулирован ЗС.

Днем 12 августа концентрация электронов слабо изменялась в интервале времени 11:30÷17:00. На высотах 81, 84 и 87 км она составляла в среднем  $4 \cdot 10^8$ ,  $(7 \div 8) \cdot 10^8$  и  $7 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$  соответственно. После 17:30 происходило предвечернее уменьшение  $N$ . Отсутствие околополуденного максимума связано с тем, что день 12 августа был умерен-

но-возмущенным и изменение  $N$  контролировалось не только Солнцем, а и потоками энергичных частиц из магнитосферы [39].

### Обсуждение

Обсудим процессы в нижней ионосфере, сопутствовавшие ЗС. Собственно с затмением, по-видимому, связаны такие эффекты.

1. Увеличение в несколько раз интенсивности шума и ее дисперсии. Этот процесс начинается вскоре после наступления момента затмения и завершается через 20 мин после окончания ЗС.

2. Увеличение в несколько раз средних интенсивностей ЧО-сигнала и его дисперсии на высотах 81÷87 км, которое начинается вскоре после первого оптического контакта дисков небесных тел и продолжается в течение десятков минут после их последнего контакта.

3. Увеличение почти в 3 раза отношения интенсивностей  $R_{x_o}$  вскоре после наступления момента затмения на высоте 81 км, сопровождаемое ростом дисперсии  $\sigma_R^2$  оценки  $R_{x_o}$ . После наступления фазы максимального затмения эти параметры уменьшаются до своих невозмущенных значений, а затем остаются неизменными в течение примерно 2 ч. На высотах 84 и 87 км эффект качественно подобен, но выражен слабее.

4. Отсутствие околополуденного максимума электронной концентрации, наблюдавшегося с 12:00 до 15:00 за день до затмения (высоты 81÷87 км).

5. Увеличение  $N$  в 2÷3 раза через 100÷40 мин после начала ЗС на высотах 81÷87 км соответственно. Этот процесс продолжался 3÷4 ч.

Рассмотрим перечисленные эффекты подробнее.

Рост интенсивности шума и ее дисперсии после начала затмения можно объяснить следующим образом. Шум в диапазоне частот 2÷3 МГц представляет собой наложение сигналов от радиосредств, работающих в этом диапазоне. ЗС сопровождается уменьшением концентрации электронов, вследствие чего уменьшается поглощение радио-

сигналов в ионосфере на площадях с характерным размером  $L$  в несколько тыс. км (см. выше). Уменьшение поглощения приводит к росту помех, принимаемых как основным, так и боковыми лепестками диаграммы направленности антенной системы радара ЧО, которая состоит из ортогональных вертикальных ромбов. Такой же эффект более сильно проявляется в предвечернее время (см. рис. 2-4).

Попытаемся объяснить второй эффект – увеличение в несколько раз интенсивности ЧО-сигнала и ее дисперсии. Учтем (см., например, [35]), что

$$\overline{A_{x,o}^2} \propto \frac{\overline{\Delta N^2}}{\Omega_{\pm}^2 + \nu^2} \exp\{-4K_{x,o}\},$$

где  $\overline{\Delta N^2}$  – интенсивность флуктуаций  $N$ ;  $\Omega_{\pm} = \omega \pm \omega_L$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\omega_L = 2\pi f_L$ ,  $f_L = f_B \cos \alpha \approx 1.3$  МГц,  $f_B$  – гирочастота электронов,  $\alpha$  – угол между вертикалью и вектором индукции геомагнитного поля;  $\nu$  – частота соударений электронов с нейтралами;  $K_{x,o}$  – интегральный коэффициент поглощения ЧО-сигнала  $x$ - и  $o$ -поляризации.

ЗС приводит к следующим процессам: 1) уменьшению  $N$ , а значит и  $K_{x,o}$ ; 2) уменьшению температуры газа, а значит и  $\nu$ ; 3) к изменению, а при определенных условиях к увеличению  $\overline{\Delta N^2}$  (см. [35]). Эти три фактора могут объяснить увеличение  $\overline{A_{x,o}^2}$ . Рост же дисперсии интенсивностей свидетельствует о нестационарности процессов, а также о неполном “вычитании” шумов. Как уже отмечалось, дисперсия шумов также увеличивалась в те же интервалы времени, что и  $\overline{A_{x,o}^2}$ .

Третий эффект состоит в увеличении отношения интенсивностей  $R_{x_o}$  и  $\sigma_R$  вскоре после начала ЗС. Поскольку

$$R_{x_o} = \frac{\overline{A_x^2}}{\overline{A_o^2}} = \frac{\Omega_+^2 + \nu^2}{\Omega_-^2 + \nu^2} \exp\{-4(K_x - K_o)\}$$

и в значительной части D-области ионосферы ( $z \approx 75 \div 90$  км)  $\Omega_+^2 \gg \nu^2$ ,  $\Omega_-^2 \gg \nu^2$ , можно записать:

$$R_{xo} \approx \frac{\Omega_+^2}{\Omega_-^2} \exp\{-4(K_x - K_0)\}.$$

При ЗС уменьшается  $N$ , а значит и  $K_{x,o}$ . Это приводит к росту  $R_{xo}$ . Добавим, что увеличение  $R_{xo}$  в 3 раза во время ЗС свидетельствует об уменьшении  $N$  в среднем на 30 % на высотах 70 ÷ 80 км.

Рост  $\sigma_R$ , как и в других случаях, связан с увеличением уровня флуктуаций параметров среды при ЗС.

Четвертый эффект заключается в отсутствии околополуденного максимума  $N$ , который в предыдущий день проявлялся с 12:00 до 13:00. Его отсутствие можно объяснить уменьшением почти в два раза  $N$  в результате ЗС.

Приведем теоретическую оценку этого эффекта. Из уравнения баланса концентрации электронов в квазистационарном случае ( $|dN/dt| \ll \alpha N^2$ ) имеем

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

где  $q$  – скорость ионизации,  $\alpha$  – эффективный коэффициент рекомбинации. Процессы переноса (ветер, амбиполярная и турбулентная диффузии) здесь не учитываются потому, что их характерные времена намного больше, чем  $(\alpha N)^{-1}$ . До затмения Солнца

$$q_0 = \alpha_0 N_0^2.$$

Тогда при  $\alpha \approx \alpha_0$  имеем:

$$\frac{N}{N_0} = \sqrt{\frac{q}{q_0}} = \sqrt{1 - A(t)},$$

где  $A(t)$  – функция покрытия Солнца. Так как  $A_{\max} \approx 0.83$ , то  $(N/N_0)_{\min} \approx 0.4$ . Видно, что

наблюдаемое и расчетное значения  $(N/N_0)_{\min}$  близки. Здесь для простоты не принимался во внимание вклад не закрытой Луной короны Солнца в ионизацию электронов. С его учетом  $(N/N_0)_{\min} \approx 0.5$ . Это значение практически совпадает с наблюдаемым.

Пятый эффект состоит в увеличении  $N$  в 2 ÷ 3 раза на высотах 81 ÷ 87 км примерно через 100 ÷ 40 мин после начала ЗС. Время запаздывания эффекта растет с уменьшением высоты.

Важно, что ниже 81 км надежное значение  $N$  не удается получить из-за малого отношения сигнал/шум, а выше 90 км перестает “работать” используемая методика расчета дифференциального поглощения (см. [33]). На высотах 81 ÷ 87 км относительная погрешность получения  $N$  не превышает 25 ÷ 35 %. Если на высоте 84 км  $N$  достигает  $10^9 \text{ м}^{-3}$  то, как уже отмечалось, вычисляемые значения  $N$  на высоте 87 км являются заниженными.

Можно предположить, что столь значительное увеличение  $N$  вызвано высыпанием частиц из магнитосферы, т. е. является результатом проявления повторного взаимодействия системы ионосфера – магнитосфера – ионосфера в средних широтах (см. [36-38]). Подробнее это обсуждается в статье [39].

## Выводы

1. Обнаружено и объяснено увеличение в несколько раз средних интенсивностей ЧО-сигнала и шума, а также их дисперсий, которое продолжается в течение всего ЗС и нескольких десятков мин после его окончания.

2. Обнаружено увеличение почти в 3 раза во время ЗС отношения средних интенсивностей необыкновенной и обыкновенной поляризаций, а также почти в 4 ÷ 9 раз их дисперсий на высотах 87 ÷ 84 км соответственно, которое продолжается примерно 2.5 ч. Это вызвано уменьшением в среднем на 30 % электронной концентрации в нижней части D-области ионосферы.

3. Обнаружено отсутствие околополуденного максимума в зависимости  $N(t)$  на высотах 81 и 84 км, вызванное, по-видимому,

уменьшением почти в два раза концентрации электронов на этих высотах в результате ЗС.

4. Обнаружен рост концентрации электронов на высотах  $81 \div 87$  км через  $100 \div 40$  мин после начала затмения, который продолжался не менее  $3 \div 4$  ч. Такое поведение  $N$  обусловлено, по-видимому, высыпанием электронов из магнитосферы.

Авторы выражают глубокую благодарность К. П. Гармашу за предоставленную возможность использовать компьютерную программу регуляризующего алгоритма получения профилей  $N(z)$  и А. И. Гритчину за помощь в проведении экспериментов.

### Литература

1. J. V. Evans. *J. Geophys. Res.* 1965, **70**, pp. 131-137.
2. J. S. Belrose, L. R. Bodé, R. Bunker, D. B. Ross. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1102-1104.
3. J. N. Rowe, A. J. Ferraro, H. S. Lee. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1116-1117.
4. W. A. Kissick. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1119-1121.
5. J. R. Kennedy, J. J. Schauble. *Nature*, 1970, **226**, pp. 1118-1119.
6. B. Wieder, R. H. Espeland. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1117-1118.
7. M. J. Rycroft, C. D. Reeve. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1126-1127.
8. R. E. Schaal, A. M. Mendes, S. Ananthkrishan, P. Kaufmann. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1127-1129.
9. R. H. Doherty. *Nature*. 1970, **226**, p. 1129.
10. M. Anastassiadis, G. Moraitis. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1125-1126.
11. J. P. Schödel, J. Klostermeyer, J. Röttger. *Nature*. 1973, **245**, pp. 87-91.
12. P. R. Arendt, F. Gorman, Jr., H. Soicher. *Nature*. 1970, **226**, p. 1114.
13. H. C. Carlson, R. Harper, V. Wickwar, R. L. Showen, R. Behnke, T. F. Trost, L. R. Cogger, C. J. Nelson. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1124-1125.
14. B. J. Bienstock, R. T. Marriott, D. E. St. John, R. M. Thorne, S. V. Venkateswaran. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1111-1112.
15. J. A. Klobuchar, C. Malik. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1113-1114.
16. O. G. Almeida, A. V. Da Rosa. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1115-1116.
17. B. J. Flanerty, H. R. Cho, K. C. Yeh. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1121-1123.
18. M. J. Davis, A. V. Da Rosa. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1123-1124.
19. A. N. Hunter, B. K. Holman, D. G. Felgate, R. Kelleher. *Nature*. 1974, **250**, pp. 205-206.
20. P. Broche, M. Crochet, J. C. De Maistre. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1976, **38**, pp. 1361-1369.
21. J. E. Hall, P. H. G. Dickinson, A. J. Hall. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1105-1107.
22. R. M. Henry, R. S. Quiroz. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1108-1110.
23. A. C. Faire. *Nature*. 1970, **226**, pp. 1110-1111.
24. Special Eclipse Issue (The eclipse of 7 March 1970). *J. Atmos. Terr. Phys.* 1972, **34**, pp. 559-739.
25. K. Davies. *Proc. Indian Nat. Sci. Acad.* 1982, **48A**, Suppl. 3, pp. 342-376.
26. В. Д. Соколов, И. П. Безродных, В. А. Кузьмин, Н. Г. Скрябин. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1999, **39**, №2, с. 139-140.
27. Б. Б. Борисов, Д. А. Егоров, Н. Е. Егоров и др. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2000, **40**, №3, с. 94-103.
28. О. Н. Бойтман, А. Д. Калихман, А. В. Тащилин. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1999, **39**, №6, с. 45-51, с. 52-60.
29. В. И. Таран, Е. И. Григоренко. *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. 2000, вып. 103, с. 110-112.
30. В. П. Урядов, А. М. Леонов, А. А. Понятов, Г. Н. Бойко, С. П. Терентьев. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2000, **43**, №8, с. 682-686.
31. G. Chimonas, C. O. Hines. *J. Geophys. Res.* 1970, **75**, pp. 875.
32. К. П. Гармаш, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1999, №7, с. 3-5, №8, с. 3-19.
33. К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1996, **36**, №2, с. 75-81.
34. 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.
35. Л. Ф. Черногор. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1985, **28**, №1, с. 17-26.
36. К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор, А. Б. Шварцбург. *Компьютерная оптика*. 1989, вып. 6, с. 62-71.
37. К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1998, №6, с. 17-40.
38. Л. Ф. Черногор. *Радиофизика и радиоастрономия*. 1997, **2**, №4, с. 463-472.
39. Л. Ф. Черногор. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000, **5**, №4, с. 371-375.

**Processes in Lower Ionosphere during  
August 11, 1999 Solar Eclipse**

**A. M. Gokov, L. F. Chernogor**

Daytime measurements acquired with the MF radar on 2.2 MHz were used to examine the conditions in the lower ionosphere on August 10 and 12, 1999, as well as on August 11, 1999 when an

83 % solar eclipse occurred. The variations in MF radar signal parameters associated with the solar eclipse, are detected and interpreted. 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 by 30÷50 % in the lower ionosphere.