

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА СРЕДНЕШИРОТНОЙ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НА ЗАТМЕНИЕ СОЛНЦА 29 МАРТА 2006 г.

© 2008 г. А. М. Гоков, А. И. Григчин, О. Ф. Тырнов

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина*

*e-mail: Alexander.M.Gokov@univer.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 27.11.2006 г.

После доработки 25.04.2007 г.

Приведены результаты наблюдений за состоянием среднеширотной D-области ионосферы в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. по изменениям характеристик частично отраженных КВ-сигналов и радиошумов на частоте  $f = 2.31$  МГц. Установлено, что характерные процессы продолжались в течение 2–4 часов и вызваны в основном охлаждением атмосферного газа, уменьшением скорости ионизации и последующим уменьшением концентрации электронов. Экспериментально обнаружен рост концентрации электронов в среднем на 200–250% примерно через 70–80 мин после начала затмения на высотах 90–93 км и примерно через 240 мин после окончания солнечного затмения на высотах 81–84 км, продолжавшийся около 3–4 ч. Такое поведение  $N$  обусловлено, по-видимому, высыпанием электронов из магнитосферы в атмосферу во время солнечного затмения и после него. На основе этой гипотезы по экспериментальным данным оценены потоки высыпавшихся электронов, которые составили порядка  $10^7$ – $10^8$  м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>.

PACS: 94.20.Vv, 94.20.Jj

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Затмение Солнца (ЗС) в определенном регионе бывает сравнительно редко, поэтому наблюдение его дает уникальную возможность проследить за динамикой околоземной среды и уточнить сопутствующие физические процессы. Динамические процессы при конкретном затмении зависят от геофизической обстановки, степени возмущенности Солнца и околоземной среды. Эффектам, сопутствующим ЗС, посвящен ряд публикаций (см., например, [Акимов и др., 2005; Бойтман и др., 1999а,б; Гоков и Черногор, 2000; Костров и Черногор, 2000; Черногор, 2000]). Было установлено, что ЗС вызывает сложный комплекс физических и химических процессов в атмосфере, ионосфере и геомагнитном поле. Среди них отметим следующее: охлаждение атмосферного газа, генерация ударной волны плотности и, как результат, акустико-гравитационных волн в атмосфере, уменьшение концентрации электронов в ионосфере, уменьшение температур электронов и ионов во внешней ионосфере, вариации геомагнитного поля и др. Однако из-за сложности процессов и их многообразия изучение всей картины далеко до 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 [Бойтман и др., 1999а,б]. Поэтому задача исследования эффектов ЗС в

ионосфере остается актуальной. Представляет интерес дальнейшее изучение уже обнаруженных эффектов и поиск других проявлений затмения Солнца в атмосфере, особенно на высотах нижней ионосферы. Отметим, что подавляющая часть публикаций посвящена исследованиям эффектов ЗС в верхней ионосфере (на высотах более 100 км). Отклик среднеширотной D-области на ЗС изучен мало из-за сложности физико-химических процессов, протекающих в ней, и их многообразия, и трудностей проведения длительных непрерывных наблюдений.

В работе в развитие исследований [Гоков и Черногор, 2000; Черногор, 2000] солнечного затмения в августе 1999 г. приведены результаты экспериментальных наблюдений методом частичных отражений (ЧО) реакции региональной среднеширотной D-области ионосферы на солнечное затмение 29 марта 2006 г.

### 2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАТМЕНИИ СОЛНЦА

ЗС 29 марта 2006 г. в пункте наблюдений происходило с 13.03 до 15.21 LT, максимальное значение функции покрытия в районе пункта наблюдений составляло около 77% в 14.03 LT. Наблюдения выполнены 28–30 марта. Данные для первого и третьего дней использовались как контрольные. Геофизическая обстановка 28–30 марта была спо-

Таблица 1. Координаты радиофизической обсерватории ХНУ

Возвышение над уровнем моря, м	Географические		Геомагнитные		Магнитное наклонение	Магнитное склонение, W	L-оболочка
	Широта, N, град	Долгота, E, град	Широта, град	Долгота, град			
156	49°38'	36°20'	45.37°	118.7°	66°36.8'	6°19.6'	-2.0

койной. Полоса полного ЗС была шириной около 100 км. Минимальное удаление пункта наблюдений от полосы полного ЗС составляло около 900 км. Скорость лунной тени вблизи пункта наблюдений составляла около 750 м/с.

### 3. СРЕДСТВА РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

Зондирование нижней ионосферы проводилось в радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина (см. табл. 1) вблизи г. Харькова на аппаратуре [Turnov et al., 1994] с помощью радара ЧО. В период проведения наблюдений параметры комплекса были следующими: импульсная мощность передатчика  $P = 150$  кВт, рабочая частота  $f = 2.31$  МГц, длительность импульса 25 мкс, частота повторения импульсов  $F = 10$  Гц, коэффициент усиления антенны  $G \approx 50$ , исследуемый диапазон высот – 60–126 км.

### 4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Во время эксперимента регистрировались высотнo-временные зависимости амплитуд смеси  $A_{\text{ш},x}(z, t)$  частично отраженного сигнала  $A_{\text{о},x}(z, t)$  и радишума  $A_{\text{ш},x}(t)$  (где  $t$  – время, индексы “о” и “х” соответствуют обыкновенной и необыкновенной поляризациям) с 22 высотных уровней, начиная с 60 км через  $\Delta z = 3$  км. Измерения выполнялись непрерывными сеансами длительностью единицы-десятки часов. Для выделения амплитуд частично отраженных сигналов  $A_{\text{о},x}(z, t)$  записывались также амплитуды только радишума  $A_{\text{ш},x}(t)$  (две выборки в полосе частот 50 кГц), в моменты времени, предшествующие излучению зондирующего импульса. Оценки средних значений интенсивностей  $\langle A_{x,o}^2 \rangle$  и шумов  $\langle A_{\text{ш},\text{ш}}^2 \rangle$  осуществлялись по 60 реализациям на интервале времени 600 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10%. Вычислялись высотнo-временные зависимости  $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$  и  $\langle A_{\text{ш},\text{ш}}^2 \rangle(t)$ . Для анализа дополнительно применялось их сглаживание методом скользящего среднего на интервалах 10–30 мин со сдвигом 1–5 мин.

По полученным значениям  $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z)$  на фиксированных высотах с шагом  $\Delta z = 3$  км вычислялось

их отношение  $R_{\text{o},x}$  (высотные профили  $R_{\text{o},x}(z)$  вычислялись на интервале усреднения  $\Delta t = 10$  мин), используемое далее для получения профилей электронной концентрации  $N(z)$  по методике дифференциального поглощения с применением алгоритма регуляризации [Гармаш и Черногор, 1996]. Погрешность вычислений профилей  $N(z)$  не превышала 30%.

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

### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Вариации температуры атмосферы.* При покрытии диском Луны солнечного диска поверхность Земли и нижняя часть ее атмосферы охлаждается. Зависимость температуры воздуха  $T(t)$  от времени в день рассматриваемого ЗС приведена на рис. 1а. Здесь же приведена такая же зависимость, полученная в период ЗС 11 августа 1999 г. (б) в том же пункте наблюдений [Гок и Черногор, 2000]. В целом, как видно из рисунка, зависимости  $T(t)$  отличались незначительно: в течение первых 30 мин уменьшение  $T$  достигало 7°C (11 августа) и 3°C (29 марта), далее в течение 60 мин имело место ее увеличение к почти фоновым значениям на 5°C и 2.5°C соответственно. Различия в абсолютных значениях изменений температуры, по-видимому, вызваны заметными как сезонными отличиями (лето в первом и весна во втором случаях) общего потока солнечной радиации, достигающего поверхности Земли, так и отличием степени покрытия диском Луны солнечного диска во время рассматриваемых ЗС.

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

В день ЗС, как видно из рис. 2 (чтобы не загромождать рисунок, мы приводим только для одной магнитоионной компоненты – обыкновенной), интенсивность шумов  $\langle A_{\text{ш},\text{ш}}^2 \rangle$  начала уменьшаться до начала ЗС. В течение примерно 40 мин после начала ЗС значения  $\langle A_{\text{ш},\text{ш}}^2 \rangle$  уменьшились в

–1.4–1.8 раза, после чего начался их небольшой рост в течение ~70 мин, который затем постепенно перешел в значительно больший предвечерний рост. Поведение шумов в целом сходно с описанным в [Гоков и Черногор, 2000] увеличением интенсивности шумов в период ЗС. Отличие обсуждаемых данных состоит в том, что в период ЗС 11 августа 1999 г. рост  $\langle A_{\text{ш}, \text{ш}}^2 \rangle$  был несколько большим, поскольку до начала ЗС в том эксперименте не было уменьшения уровня шумов, которое наблюдалось до ЗС 29 марта 2006 г. Наоборот, до начала ЗС 11 августа 1999 г. наблюдался небольшой плавный рост  $\langle A_{\text{ш}, \text{ш}}^2 \rangle$ , который затем во время ЗС заметно увеличился. Поэтому поведение шумов можно объяснить так же, как объяснили [Гоков и Черногор, 2000].

В контрольный день 30 марта интенсивность шумов в выделенный период времени менялась незначительно, как и во время ЗС 29 марта.

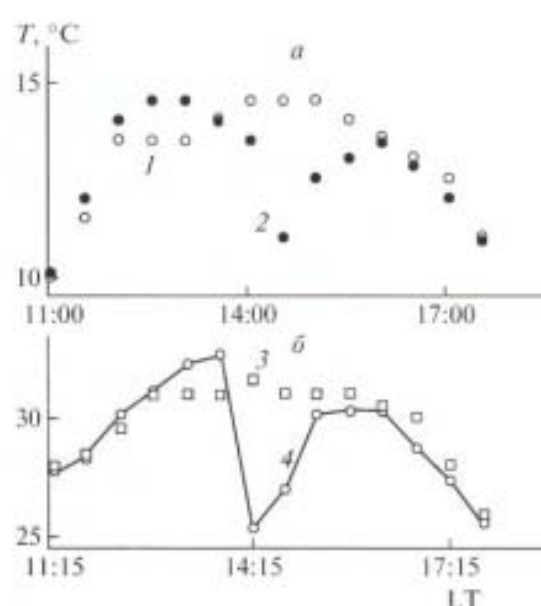
В день ЗС 29 марта имело место увеличение в единицы–сотни раз средних интенсивностей ЧО-сигнала и его дисперсии на высотах 81–96 км, начавшееся вскоре после начала ЗС и продолжавшееся в течение десятков–сотен минут после него (на высотах  $z < 87$  км рост  $\langle A_{x, \omega}^2 \rangle(t)$  после окончания ЗС

сменился уменьшением значений  $\langle A_{x, \omega}^2 \rangle(t)$  в течение примерно 2 ч, после чего начался быстрый рост значений  $\langle A_{x, \omega}^2 \rangle(t)$  так же, как и на  $z > 87$  км). Этот эффект аналогичен описанному в [Гоков и Черногор, 2000]. Его объяснение приведено там же.

В контрольный день средние интенсивности ЧО-сигнала и его дисперсии на высотах 81–96 км испытывали типичные для невозмущенных условий высотно-временные изменения.

**Вариации отношения ЧО сигнал/шум.** Рассмотрим временные вариации отношения ЧО сигнал/шум  $s/n(z, t)$ , приведенные на рис. 3. Характер поведения таких зависимостей в день ЗС во всей  $D$ -области оказался примерно одинаковым. Отметим основные особенности: 1) примерно через 10 мин после начала ЗС отношение  $s/n(z, t)$  в течение единиц минут возросло в десятки – сотни раз и продолжало расти в течение всего периода ЗС; 2) после окончания ЗС началось сравнительно плавное уменьшение  $s/n(z, t)$  в течение нескольких часов. В контрольные дни характер поведения величины  $s/n(z, t)$ , как видно из рисунка, заметно отличался. В частности, существенный рост  $s/n(z, t)$  начался примерно на час раньше, чем в день солнечного затмения 29 марта.

Отмеченные вариации отношения  $s/n(z, t)$  вызваны, как показывают экспериментальные данные, значительно большим ростом интенсивностей ЧО сигналов и ее дисперсии по сравнению с ростом интенсивностей шумов. Рост интенсив-



**Рис. 1.** Временные зависимости температуры воздуха у поверхности Земли: *a* – 1 (кружки) – 30 марта 2006 г.; 2 (затемненные кружки) – 29 марта 2006 г. в период ЗС. *б* – 3 (прямоугольники) – 10 августа 1999 г.; 4 (кружки) – 11 августа 1999 г. в период ЗС.

ностей ЧО сигналов и ее дисперсии также наблюдался нами в эксперименте в период ЗС 11 августа 1999 г. [Гоков и Черногор, 2000]. Для объяснения такого эффекта, как и в [Гоков и Черногор, 2000], мы приведем известную в методике ЧО теоретическую связь [Belrose and Burke, 1964; Belrose, 1970; Черногор, 1985]:

$$\langle A_{x, \omega}^2 \rangle \propto \frac{\overline{\Delta N^2}}{\Omega_z^2 + \nu^2} \exp\{-4K_{x, \omega}\},$$

где  $\overline{\Delta N^2}$  – интенсивность флуктуаций  $N$ ,  $\Omega_z = \omega \pm \omega_L$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\omega_L = 2\pi f_L$ ,  $f_L$  – продольная вдоль направления геомагнитного поля составляющая гирочастоты электронов,  $\nu$  – частота соударений электронов с нейтралами,  $K_{x, \omega}$  – интегральный коэффициент поглощения ЧО сигнала  $x$ - и  $\omega$ -поляризации. Исходя из полученных экспериментальных данных отметим, что затмение Солнца приводит к следующим основным процессам: 1) уменьшению  $N$ , а значит, и  $K_{x, \omega}$ ; 2) уменьшению температуры газа, а значит, и  $\nu$ ; 3) вследствие нарушения термодинамического режима в  $D$ -области к изменению, а при определенных условиях к увеличению  $\overline{\Delta N^2}$  (см. [Черногор, 1985]). Все три фактора могут объяснить увеличение  $\langle A_{x, \omega}^2 \rangle$ . Увеличение дисперсии интенсивностей свидетельствует о росте нестационарности процессов во время ЗС, а также о неполном “вычитании” шумов.

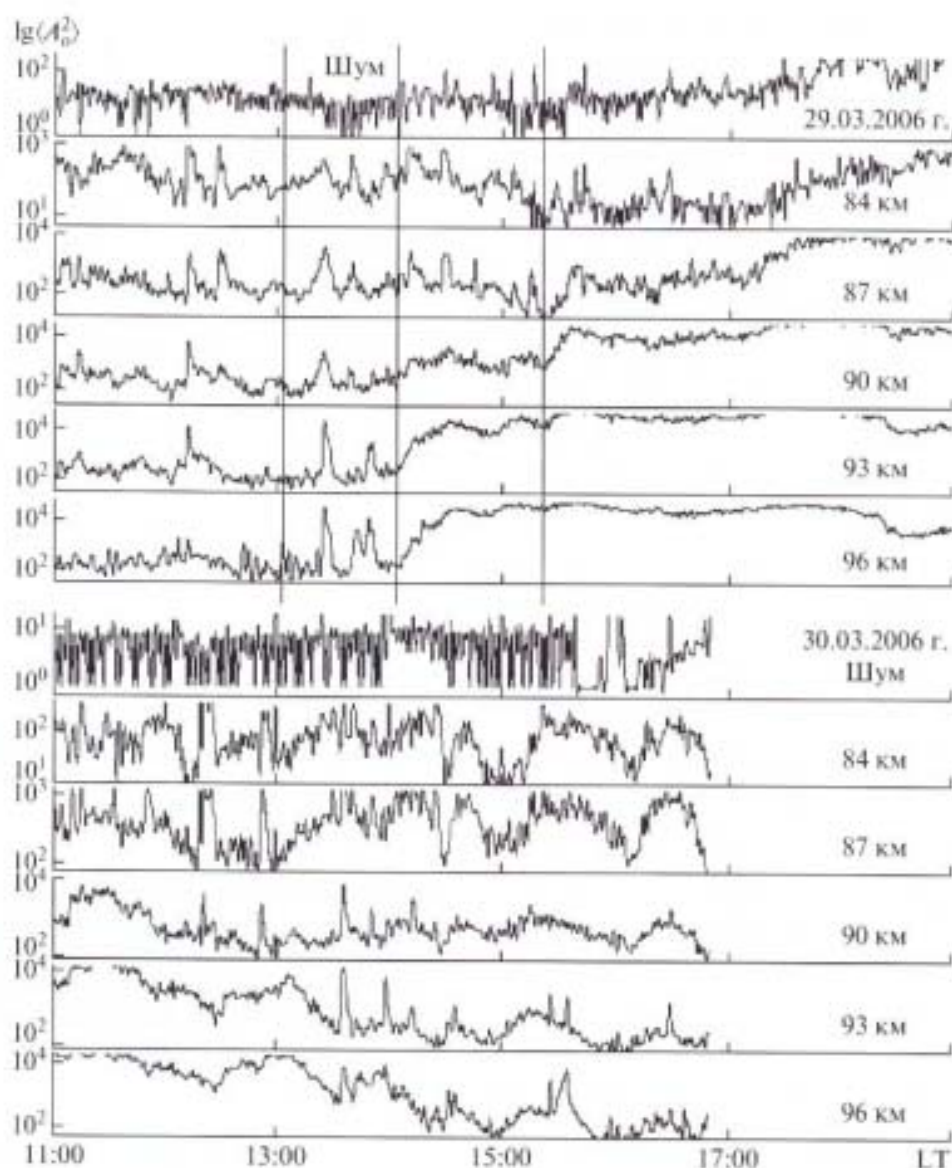


Рис. 2. Высотно-временные вариации средних интенсивностей (в относительных единицах) шума и ЧО сигнала обыкновенной поляризации 29 и 30 марта 2006 г. Вертикальными линиями показаны условные моменты начала, максимального покрытия и окончания ЗС. Усреднение проводилось на интервале 1 мин.

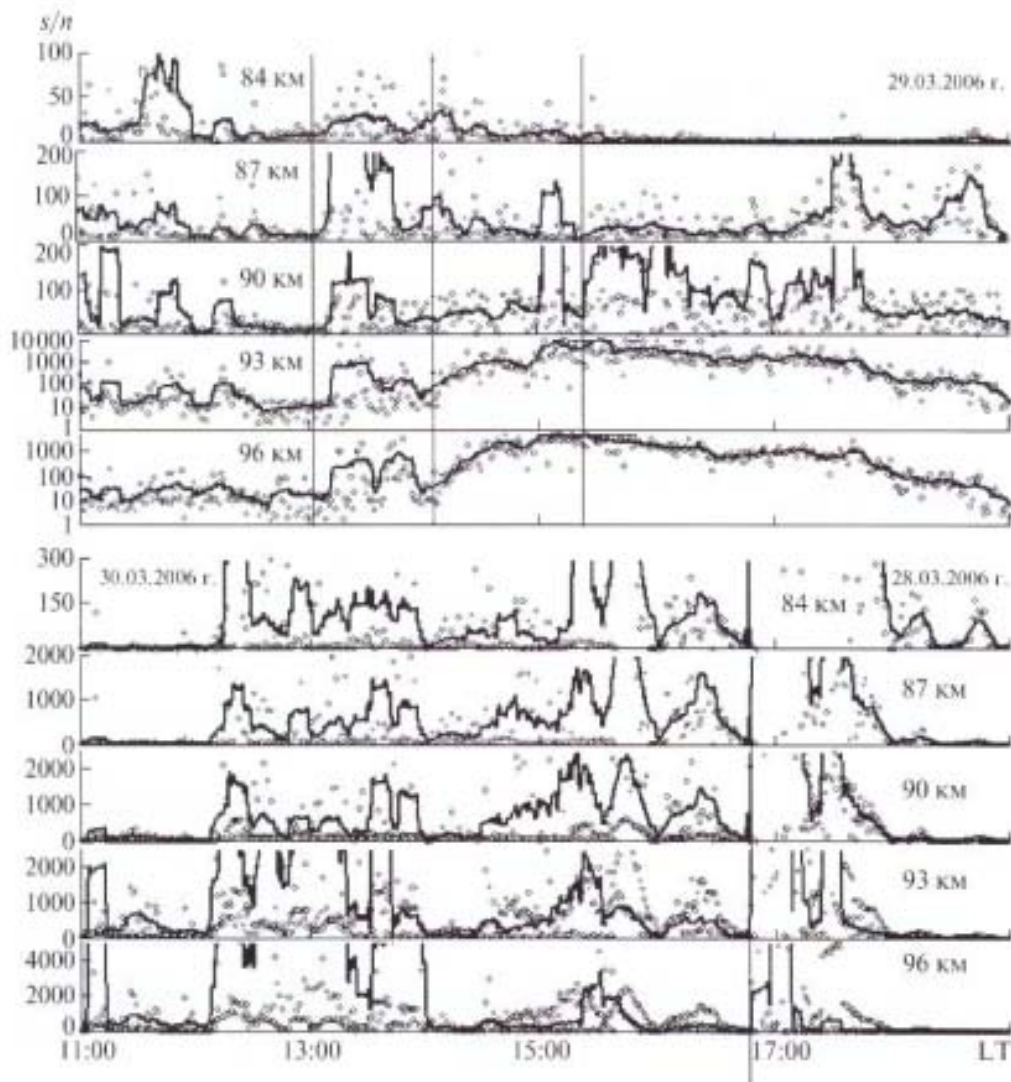
Вариации отношения интенсивностей необыкновенной и обыкновенной поляризации шумов и ЧО сигналов  $R_{o,x}(z, t)$ . Рассмотрим далее высотно-временные вариации отношения интенсивностей  $R_{o,x}(z, t)$  (рис. 4). Для отношения интенсивностей шумов характерно следующее: за день до ЗС примерно до 13 ч  $R_{o,x} \approx 0.3-0.5$ . После 13:10–14:00 LT это отношение увеличилось до 8–14. Это продолжалось в течение примерно 4 ч. После 17:10 отношение  $R_{o,x} \approx 0.1-0.3$ . В день ЗС перед началом затмения значения  $R_{o,x}(z, t)$  составляли  $\sim 0.8$ . Примерно через 30 мин после начала закрытия солнечного диска значения  $R_{o,x}(z, t)$  в течение нескольких минут уменьшились в 1.5–2 раза и далее плавно уменьшались в течение примерно 2.5 ча-

сов. После примерно 16 ч наблюдался небольшой рост значений  $R_{o,x}(z, t)$ .

Для отношения интенсивностей ЧО сигналов  $R_{o,x}(z, t)$ , полученных в день ЗС, характерно следующее:

1) на высотах  $z < 87$  км примерно до 15:10 LT значения  $R_{o,x} \approx 0.5$ . За 10 мин до окончания ЗС значения  $R_{o,x}(z, t)$  увеличивались в 3–4 раза квазипериодически с периодом около 50 мин в течение  $\sim 150-160$  мин с последующей релаксацией к значениям  $R_{o,x} \approx 0.5-0.7$ ;

2) на высотах  $z > 87$  км через 55–60 мин после начала ЗС (вблизи максимума ЗС) значения  $R_{o,x}(z, t)$  плавно уменьшились примерно в 2 раза (процесс продолжался до окончания ЗС). Сразу же после ЗС в течение нескольких часов наблю-



**Рис. 3.** Высотно-временные вариации отношения ЧО сигнал/шум обыкновенной поляризации 28, 29 и 30 марта 2006 г. (сплошные линии, полученные методом скользящего среднего, усреднение 10 мин, сдвигка 1 мин). Вертикальными линиями показаны условные моменты начала, максимального покрытия и окончания ЗС. Усреднение проводилось на интервале 1 мин (точки на графике). На нижних пяти диаграммах вертикальной линией отделены экспериментальные данные для 28 и 30 марта.

дался постепенный рост значений  $R_{\alpha, \nu}(z, t)$ , характерный и для невозмущенных условий. При этом значения дисперсии  $\sigma_R$  этой величины менялись почти синхронно с ее изменениями.

В контрольные дни 28 и 30 марта описанные выше особенности в высотно-временных изменениях интенсивностей ЧО сигналов не наблюдались.

Для объяснения отмеченных особенностей, как и в [Гокон и Черногор, 2000], приведем известное из теории метода ЧО выражение [Belrose and Burke, 1964; Belrose, 1970; Черногор, 1985]:

$$R_{\alpha, \nu} = \frac{\langle A_{\nu}^2 \rangle}{\langle A_{\alpha}^2 \rangle} = \frac{\Omega_{+}^2 + \nu^2}{\Omega_{-}^2 + \nu^2} \exp \{-4(K_{\alpha} - K_{\nu})\}.$$

С учетом того, что  $\Omega_{+}^2 \gg \nu^2$ ,  $\Omega_{-}^2 \gg \nu^2$  в значительной части D-области ионосферы ( $z \approx 75-90$  км) будет

$$R_{\alpha, \nu} \approx \frac{\Omega_{+}^2}{\Omega_{-}^2} \exp \{-4(K_{\alpha} - K_{\nu})\}.$$

Как видно из экспериментальных данных, в период ЗС  $N$  уменьшается с квазипериодическими вариациями (возрастанием), что отчетливо видно из рис. 3 ( $z < 87$  км). Это приводит к подобным вариациям  $K_{\alpha, \nu}$  и, следовательно,  $R_{\alpha, \nu}$ . Аналогичным образом объясняется и вторая особенность: как видно из рис. 3, на  $z > 87$  км 29 марта 2006 г. имело место увеличение  $N$  в 2–3 раза через 70–80 мин после начала ЗС, что и привело к опи-

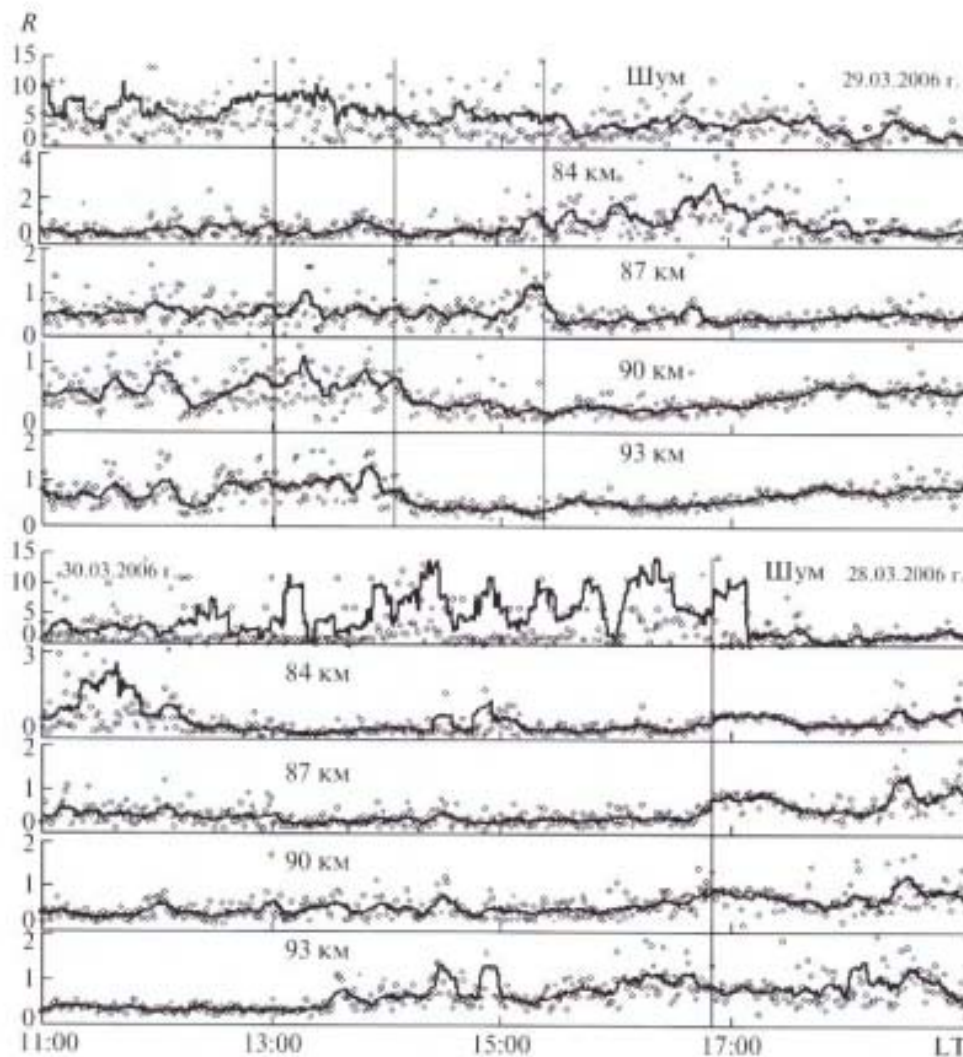


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для отношения  $R$  необыкновенной и обыкновенной поляризации средних интенсивностей ЧО сигнала и шума.

санным выше изменениям  $R_{\text{о.с.}}(z, t)$ . Рост  $\sigma_R$ , как и в других случаях, связан с усилением нестационарности среды.

**Вариации концентрации электронов.** На рис. 5 приведены высотно-временные вариации концентрации электронов в  $D$ -области ионосферы на фиксированных высотах в рассматриваемый период. Опишем их кратко.

Отчетливое околополуденное увеличение концентрации электронов имело место 30 марта на высотах больше 87 км в интервале времени 12:30–16:00 LT с максимумом в 13–14 LT. На меньших высотах оно выражено значительно меньше. В день ЗС 29 марта такая зависимость не была установлена. Отсутствие околополуденного максимума  $N$  можно объяснить уменьшением  $N$  в результате ЗС. Подобный эффект в период ЗС 11 августа 1999 г. был установлен в [Гокков и Черногор, 2000], где приведена теоретическая оценка его. Как и в

случае [Гокков и Черногор, 2000], теоретическая оценка этого эффекта хорошо совпадает с наблюдаемым в период рассматриваемого ЗС.

В день ЗС 29 марта на высотах меньше 87 км плавное уменьшение концентрации электронов началось в период ЗС примерно через 78–80 мин после его начала. В контрольный день 30 марта послеполуденное уменьшение концентрации началось примерно на час позже, чем в день с ЗС, и было более отчетливым.

29 марта на высотах 90–96 км примерно после максимальной фазы ЗС наблюдалось увеличение концентрации электронов в 2–3 раза в течение около 3 часов с последующей плавной релаксацией к невозмущенным значениям.

В работе [Гокков и Черногор, 2000] высказано предположение, что столь большое увеличение  $N$  вызвано высыпанием частиц из магнитосферы, т.е. является результатом проявления повторного

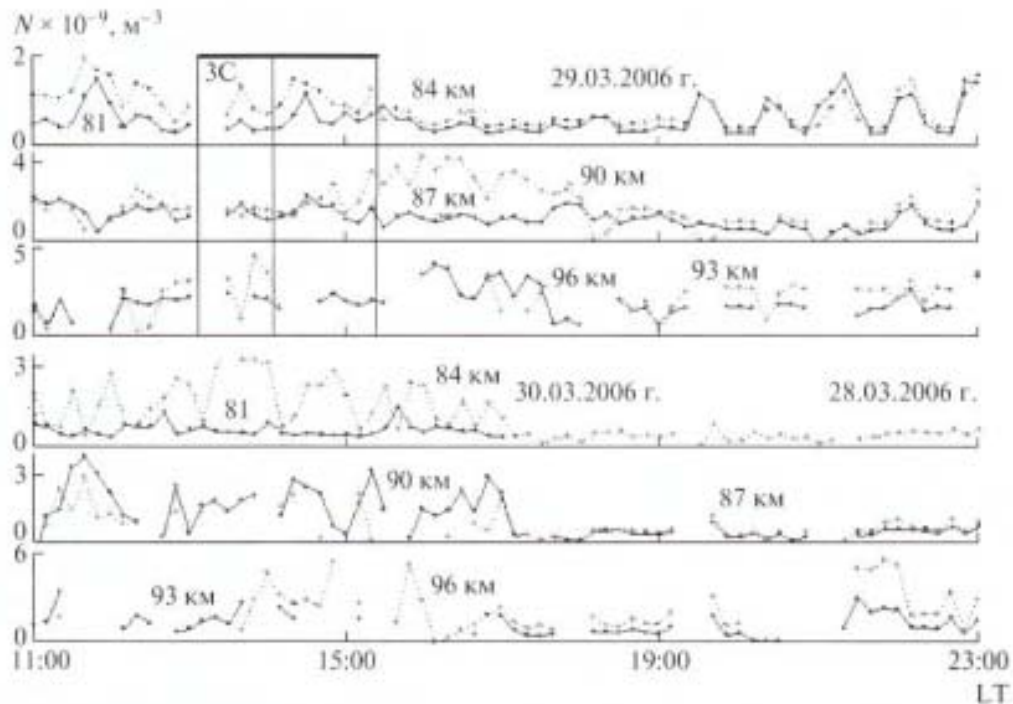


Рис. 5. Вариации концентрации электронов на фиксированных высотах в D-области ионосферы.

взаимодействия системы ионосфера–магнитосфера в средних широтах. В работе [Черногор, 2000] приведено теоретическое обоснование этого предположения. Показано что затмение Солнца может стимулировать высыпание электронов из магнитосферы и приведены оценки параметров высыпающихся частиц. Основные звенья механизма стимуляции высыпаний электронов, согласно [Черногор, 2000], следующие. ЗС вызывает уменьшение концентрации электронов на высотах динамо-области. Это приводит к генерации электрического потенциального поля поляризации и вихревого поля. Проникая в магнитосферу, эти поля способны уменьшить “поперечную” энергию электронов и тем самым перевести их в конус потерь. Возникающее высыпание электронов приводит к ионизации нейтральных частиц на высотах 80–95 км. Для обеспечения наблюдаемого на высотах 81–96 км роста  $N$  во время ЗС и после него, согласно расчетам [Черногор, 2000], требуются потоки электронов с плотностью  $p \sim 10^7\text{--}10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Такие значения  $p$  не представляются большими.

Примерно через 4 ч после окончания ЗС 29 марта 2006 г. имел место квазипериодический рост в 2–3 раза значений концентрации электронов на высотах 81–84 км с периодом 60 мин и длительностью около 4 ч. В контрольные дни такой особенности в поведении концентрации электронов не было. Этот эффект, по-видимому, также связан с ЗС. Важно, что квазипериодический рост  $N$  начался в предзатменный период (примерно

за 2 часа до времени прохождения солнечного терминатора в этой области ионосферы), когда в ионосфере начинается перестройка термодинамического режима. ЗС, по-видимому, привело к нарушению такого режима, что, в свою очередь, привело к явлениям, описанным в работе [Черногор, 2000] и выше.

По методике [Chernogor et al., 1998] на основе механизма о высыпании высокоэнергичных частиц (электронов) для обсуждаемого эксперимента оценены параметры потоков электронов. По величине электронной концентрации в невозмущенных  $N_0$  и возмущенных  $N$  условиях оценивались скорости ионизации  $q_0 = \alpha_0 N_0^2$ ,  $q = \alpha N^2$ , где  $\alpha_0$  и  $\alpha$  – соответствующие коэффициенты рекомбинации. Если пренебречь распределением высыпающихся частиц по энергиям, которое при наземных наблюдениях неизвестно, то плотность потока мощности частиц  $P_1 \approx 2e_i \Delta z \Delta q$ , где  $\Delta q = q - q_0$ ,  $e_i \approx 35 \text{ эВ}$  – энергия, затрачиваемая на один акт ионизации;  $\Delta z$  – диапазон высот, где эффективно поглощается поток частиц данной энергии  $e$ . Далее будем полагать, что  $\Delta z = 10 \text{ км}$ . С другой стороны, параметр  $P_1$  связан с потоком частиц  $p$ :  $P_1 = ep$ . Имея  $P_1$ , можно оценить мощность и энергию частиц, высыпающихся на площади  $S$ :  $P = P_1 S$ ,  $E = P \Delta T$ , где  $\Delta T$  – длительность высыпаний. Методика [Chernogor et al., 1998] оценки параметров потока частиц сводится к вычислению величины  $\Delta q$ , затем –  $P_1$ ,  $p$ ,  $P$  и  $E$ .

В табл. 2 приведены параметры потоков электронов, полученные по методике [Chernogor et al.,

Таблица 2. Параметры потоков электронов

Высота, км	$\Delta q, \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$	$\rho, \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$P, \text{ МВт}$	$E, \text{ ГДж}$
11.08.1999				
81	$32 \times 10^5$	$1,4 \times 10^7$	2,3	25
87	$108 \times 10^5$	$9,4 \times 10^7$	7,8	131
29.03.2006				
84	$54 \times 10^5$	$5,9 \times 10^7$	5,8	65
93	$48 \times 10^5$	$2,4 \times 10^7$	3,3	38
90	$134 \times 10^5$	$1,4 \times 10^8$	8,7	142

1998] из экспериментальных данных  $N(z, t)$  во время рассматриваемого ЗС. Для сравнения в таблице приведены также результаты расчетов для ЗС 11 августа 1999 г. Полученные оценки хорошо согласуются как между собой, так и с теоретическими оценками, а также с результатами экспериментальных исследований потоков во время возмущений антропогенного и естественного характера (см., например, [Гок и Тырнов, 2006а,б; Гок и Черногор, 2005; Кнут и Вюррибергер, 1976; Кнут и Федорова, 1977; Лаштовичка и Федорова, 1976]). Энергетические характеристики потоков электронов также являются сравнительно небольшими: мощность  $P = 2\text{--}9$  МВт, энергия  $E = 30\text{--}150$  ГДж.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены и объяснены сопутствующие затмению Солнца 29 марта 2006 г. изменения параметров ЧО сигналов, радишумов и концентрации электронов в среднеширотной  $D$ -области ионосферы, часть из которых подобна тем эффектам, которые наблюдались ранее в период ЗС 11 августа 1999 г. Установлено, что характерные процессы продолжались в течение 2–4 часов и вызваны, в основном, охлаждением атмосферного газа, уменьшением скорости ионизации и последующим уменьшением концентрации электронов.

2. Подтверждено отсутствие околорассветного максимума в зависимости  $N(t)$  на высотах  $D$ -области в день ЗС, вызванное, по-видимому, уменьшением на этих высотах концентрации электронов.

3. Экспериментально обнаружен рост концентрации электронов на высотах 90–93 км в среднем на 200–250% (пиковое увеличение составило около 350%) примерно через 70–80 мин после начала ЗС.

4. Обнаружен рост концентрации электронов на высотах 81–84 км примерно через 240 мин после солнечного затмения, продолжавшийся не менее 3–4 ч.

5. На основе гипотезы о высыпании электронов из магнитосферы в атмосферу во время солнечного затмения и после него по экспериментальным данным оценены энергетические параметры высыпавшихся электронов: потоки высыпавшихся электронов составили порядка  $10^7\text{--}10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Авторы благодарят К.П. Гармаша за предоставленную программу расчета  $N(z)$ -профилей с применением метода регуляризации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов Л.А., Боговский В.К., Григоренко Е.И., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 г. в Харькове // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 45. № 4. С. 526–551. 2005.
- Бойтман О.Н., Калихман А.Л., Тащилин А.В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 1. Моделирование эффектов затмения // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 39. № 6. С. 45–51. 1999а.
- Бойтман О.Н., Калихман А.Л., Тащилин А.В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 2. Данные наблюдений и сравнения с результатами моделирования // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 39. № 6. С. 52–60. 1999б.
- Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Профили электронной концентрации  $D$ -области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 36. № 2. С. 75–81. 1996.
- Гок А.М., Тырнов О.Ф. Вариации концентрации электронов в среднеширотной  $D$ -области ионосферы в период магнитной бури 7–11 ноября 2004 г., обусловленные утренним солнечным терминатором // Космічна наука і технологія. Т. 12. № 5/6. С. 69–78. 2006а.
- Гок А.М., Тырнов О.Ф. Экспериментальные исследования методом частичных отражений отклика среднеширотной  $D$ -области ионосферы на удаленные старты и полеты космических аппаратов // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 46. № 5. С. 690–697. 2006б.
- Гок А.М., Черногор Л.Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 5. № 4. С. 348–360. 2000.
- Гок А.М., Черногор Л.Ф. Вариации электронной концентрации в среднеширотной  $D$ -области ионосферы во время магнитных бурь // Космічна наука і технологія. Т. 11. № 5/6. С. 12–21. 2005.
- Кнут Р., Вюррибергер И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 16. № 4. С. 666–673. 1976.
- Кнут Р., Федорова И.И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Высыпание энергичных частиц во время бурь различного возмущения среднеширотной  $D$ -области



- ионосферы // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 17. № 5. С. 854–861. 1977.
- *Костров Л.С., Черногор Л.Ф.* Результаты наблюдения процессов в средней атмосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 5. № 4. С. 361–370. 2000.
  - *Лаштовичка Я., Федорова Н.И.* Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпускулярного происхождения // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 16. № 6. С. 1018–1025. 1976.
  - *Черногор Л.Ф.* Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 5. № 4. С. 371–375. 2000.
  - *Черногор Л.Ф.* Возмущение неоднородной структуры в нижней ионосфере под действием мощного излучения // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 28. № 12. С. 17–26. 1985.
  - *Belrose J.S., Burke M.J.* Study of the lower ionosphere using partial reflection. 1. Experimental technique and method of analysis // J. Geophys. Res. V. 69. № 13. P. 2799–2818. 1964.
  - *Belrose J.S.* Radio wave probing of the ionosphere by the partial reflection of radio waves (from heights below 100 km) // J. Atmos. Terr. Phys. V. 32. P. 567–597. 1970.
  - *Chernogor L.F., Garmash K.P., Rozumenko V.T.* Flux Parameters of Energetic Particles Affecting the Middle Latitude Lower Ionosphere // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 3. № 2. P. 191–197. 1998.
  - *Tyrnov O.F., Garmash K.P., Gokov A.M., Gritchin A.I., Dorohov V.L., Kontsevaya L.G., Kostrov L.S., Leus S.G., Martynenko S.I., Misyura V.A., Podnos V.A., Pokhilko S.N., Rozumenko V.T., Somov V.G., Tsybal A.M., Chernogor L.F., Shemet A.S.* The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere // Turkish J. Phys. V. 18. № 11. P. 1260–1265. 1994.