

УДК 550.388.2

## СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 1 АВГУСТА 2008 г. НАД ХАРЬКОВОМ. 1. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

© 2013 г. И. Ф. Домнин<sup>1</sup>, Л. Я. Емельянов<sup>1</sup>, Д. В. Котов<sup>1</sup>, М. В. Ляшенко<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков, Украина

e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина

e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 01.08.2009 г.

После доработки 07.12.2011 г.

Представлены результаты наблюдений эффектов в геокосмической плазме в течение частного (фаза ~0.42) солнечного затмения. Экспериментальные данные получены с помощью радара некогерентного рассеяния Института ионосферы (вблизи г. Харькова). Во время затмения концентрация в максимуме слоя  $F_2$  уменьшилась на 32%, критическая частота  $foF_2$  – на 17.5% и высота максимума слоя  $F_2$  увеличилась незначительно. В высотном диапазоне 290–680 км концентрация электронов уменьшилась на ~25%. Во время затмения Солнца в диапазоне высот 190–490 км наблюдалось уменьшение температуры электронов и ионов на 70–180 и 0–140 К соответственно. Вблизи главной фазы затмения вертикальная составляющая скорости движения плазмы уменьшилась на 10–45 м/с в высотном диапазоне 200–470 км соответственно. Во время главной фазы солнечного затмения относительная концентрация ионов водорода увеличивалась на высотах 450–650 км на 50% по сравнению с контрольным днем.

DOI: 10.7868/S0016794013010070

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, затмение Солнца (ЗС) относится к высокоэнергетическим процессам в атмосфере и геокосмическом пространстве. Эффекты ЗС заметно проявляются в вариациях основных параметров атмосферы и ионосферы Земли и, тем самым, существенно влияют на динамический и тепловой режим в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ) [Черногор, 2006, 2007; Chernogor and Rozumenko, 2008; Chernogor et al., 2011].

Для исследования физических процессов в течение ЗС применяется целый арсенал наземных и спутниковых методов [Афраймович и др., 2007; Белинская и др., 2006; Каримов и др., 2008; Колоколов и др., 1993; Afraimovich et al., 2002; Voitman et al., 1999; Deshpande et al., 1982; Jones et al., 2004; Le et al., 2008, 2009]. Каждый из упомянутых методов имеет ограниченные возможности по количеству диагностируемых параметров среды, диапазону высот, пространственно-временному разрешению, точности получаемых данных и т.п. Особое место среди методов диагностики занимает метод некогерентного рассеяния (НР) [Varon, 1973; Evans, 1965a, b; Salah et al., 1986; Sterling et al., 1972]. Он позволяет найти высотные зависимости основных параметров ионосферной плазмы в широком диапазоне высот с прием-

лемыми высотно-временным разрешением и погрешностью измерений (~1–10%).

Важные и интересные результаты получены в ходе наблюдений эффектов ЗС 30 мая 1986 г. в США [Salah et al., 1986]. В работе [Roble et al., 1986] приведено моделирование отклика ионосферы на это затмение. В этих работах сделан вывод, что не все наблюдаемые эффекты согласуются с результатами моделирования.

С использованием экспериментальных данных харьковского радара НР ранее выполнен детальный анализ и моделирование вариаций параметров ионосферы во время частных ЗС над Харьковом (Украина) 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г. [Акимов и др., 2002, 2005; Бурмака и др., 2007а, б; Григоренко и др., 2008; Ляшенко и Черногор, 2008]. Найдены основные закономерности в поведении регулярных параметров атмосферы и ионосферы в периоды частных ЗС на широтах г. Харькова.

В результате исследований, проведенных многими авторами, установлено, что эффекты ЗС существенно зависят от географических (магнитных) координат места наблюдения, времени суток, состояния атмосферной и космической погоды, степени покрытия диска Солнца, фазы в цикле солнечной активности и т.п. Оказалось, что процессы при каждом затмении отличаются

сложностью и многообразием, имеют индивидуальные особенности, которые, в свою очередь, требуют детального изучения и анализа. По этой причине задача исследования эффектов ЗС в околоземной среде остается актуальной.

Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных эффектам ЗС, в настоящее время существует ряд нерешенных вопросов в понимании механизмов перестройки структуры ионосферы, теплового и динамического режимов в геокосмической плазме во время ЗС, каналов и механизмов взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ. Поэтому наблюдение, анализ и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы во время ЗС по-прежнему остается одной из актуальных задач современной физики атмосферы и геокосмоса.

Целью работы является изложение результатов наблюдения, анализа и интерпретации эффектов в геокосмосе во время частного солнечного затмения 1 августа 2008 г. над Харьковом.

Следует отметить, что отличительной особенностью ЗС 1 августа 2008 г. является то, что оно имело место в период глубокого и продолжительного минимума 23-го цикла солнечной активности. Это предопределило структуру ионосферы и особенности физико-химических процессов в ней. Выяснению этих особенностей и посвящена настоящая работа.

В части 1 работы описаны результаты наблюдения пространственно-временных вариаций параметров ионосферы, вызванных ЗС. К ним относятся концентрация электронов, температуры электронов и ионов, скорость движения ионосферной плазмы и ионный состав во внешней ионосфере.

В части 2 приведены результаты исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших затмение.

В части 3 изложены результаты интерпретации наблюдаемых эффектов, моделирование пространственно-временных вариаций параметров околоземной среды, непосредственно не измеряемых методом НР, и сравнение с результатами исследований других авторов.

## 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАТМЕНИИ СОЛНЦА

Затмение Солнца 1 августа 2008 г. началось в 08:18 (здесь и далее UT) на севере Канады в заливе Куин-Мод. Лунная тень, двигаясь со скоростью  $\sim 0.9$  км/с в северном направлении, прошла по южной оконечности о. Виктория, северо-западной части о-ва Кинг-Уильям, п-ова Бутия и южной части о-ва Принца Уэльского. Далее, в  $\sim 250$  км восточнее северного магнитного полюса, тень Луны пересекла о-ва Сомерсет, Девон и Элсмир и в  $\sim 08:22$  накрыла о. Гренландия. Пройдя по север-

ной части острова, полоса полного ЗС далее продвигалась по водной поверхности Северного Ледовитого океана. В 08:32 лунная тень задела восточную часть норвежского о. Белый и западную часть островов Земли Франца-Иосифа. В 08:55 тень от лунного диска пересекла Новую Землю, и в 9:04, в районе Байдарацкой губы, лунная тень вступила на евразийский материк. Далее полоса полного ЗС прошла над городами Надым, Нижневартовск, Новосибирск, Барнаул, Бийск, Горно-Алтайск и далее по территории Казахстана, Монголии и Китая, где полное затмение завершилось на заходе Солнца в  $\sim 11:21$ .

Максимальная ширина полосы полного ЗС составляла  $\sim 237$  км, длина полосы полного ЗС  $\sim 8200$  км.

Частные солнечные затмения 1 августа 2008 г. наблюдались на крайнем севере Северной Америки, в Северном Ледовитом и северной части Атлантического океана, в Европе (кроме ее южной части), Азии (кроме ее восточной и юго-восточной частей).

Затмение Солнца 1 августа 2008 г. в обсерватории (вблизи г. Харькова) было частным и наблюдалось с 09:11 до 11:17. Максимальное покрытие диаметра и площади диска Солнца имело место в 10:15 и составило  $\sim 0.42$  и  $0.31$  соответственно. Освещенность поверхности Земли во время ЗС уменьшилась в  $\sim 1.6$  раз. Общая продолжительность частного ЗС составила 2 ч 06 мин.

В качестве контрольного дня выбраны сутки 2 августа 2008 г.

## 3. ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Период 29 июля—4 августа 2008 г. характеризовался спокойной геомагнитной и солнечной активностью. Солнечная активность (СА) была низкой. Индекс СА — плотность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см ( $F_{10.7}$ ) — не превышал  $(66-67) \times 10^{-22}$  Вт м $^{-2}$  Гц $^{-1}$ . В день ЗС 1 августа  $F_{10.7} = 66 \times 10^{-22}$  Вт м $^{-2}$  Гц $^{-1}$ .

Геомагнитный индекс  $A_p$  менялся в диапазоне 3—5 единиц, в день ЗС  $A_p = 3$ . Трехчасовые индексы геомагнитного поля  $K_p$  в рассматриваемый период не превышали 3 единиц, в день затмения  $K_{p_{\max}} = 2$ . Индекс  $Dst$ -вариаций геомагнитного поля в рассматриваемый период не превышал  $-10$  нТл, индекс авроральной активности  $AE$  в среднем менялся в пределах 50—60 нТл. Следует отметить, что в отдельные сутки имели место локальные всплески в вариациях индекса авроральной активности со значениями  $AE$  около 200—300 нТл. Такие аномальные всплески в вариациях  $AE$ -индекса на фоне низкой геомагнитной активности связаны с вариациями  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля, а также коррелируют с вариациями  $Dst$ -индекса. Компонента  $B_z$  межпланетного маг-

нитного поля хаотически варьировалась в пределах  $\pm(2-3)$  нТл.

Таким образом, состояние космической погоды 1 августа 2008 г. было устойчивым. Это обстоятельство позволило выделить возмущения в ионосферной плазме, которые сопутствовали частному ЗС.

#### 4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ

*Радар НР.* Для исследования эффектов в ионосфере, вызванных ЗС, использовался радар НР Института ионосферы НАН и МОН Украины. Географические координаты радара НР:  $49.6^\circ$  N,  $36.3^\circ$  E; геомагнитные:  $\Phi = 45.7^\circ$ ,  $\Lambda = 117.8^\circ$ ; наклонение геомагнитного поля –  $66.4^\circ$ , параметр Мак-Илвейна  $L \approx 1.9$ . Радар имеет крупнейшую в мире зенитную двухзеркальную параболическую антенну диаметром 100 м и предназначен для исследования ионосферы в интервале высот 100–1500 км. Рабочая частота радара – 158 МГц. Импульсная мощность радиопередающего устройства составляет 2–4 МВт.

Радар НР позволяет измерять с приемлемыми разрешениями по высоте (10–100 км) и точностью (обычно погрешность в дневное и ночное время не более 5–10 и 20–30% соответственно) следующие параметры ионосферы: концентрацию электронов  $N$ , температуры электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$ , вертикальную составляющую скорости переноса плазмы  $V_z$ , относительный ионный состав.

*Ионозонд “Базис”.* Ионозонд служит для измерения критической частоты слоя  $F2$  ионосферы  $foF2$  и последующей калибровки профиля  $N(z)$ , полученного на радаре НР.

*Методы анализа.* При наблюдениях ионосферы с помощью метода НР такие параметры плазмы как температуры заряженных частиц, относительное содержание ионов различных сортов и вертикальная составляющая скорости движения плазмы получают в результате решения обратной радиодифракционной задачи.

Исходными данными являются измеренные автокорреляционные функции (АКФ) сигнала, некогерентно рассеянного ионосферной плазмой. В процессе измерений специализированный коррелятор вычисляет оценки значений АКФ НР-сигнала для заданных величин временных задержек. Эти оценки накапливаются в течение сеансов измерений длительностью 1 мин и записываются с дискретностью 18.33 км вдоль всей развертки дальности.

Перед вычислением ионосферных параметров измеренные АКФ подвергаются коррекции с целью устранения систематических ошибок, вызываемых как спецификой инструмента исследования, так и неоднородностью по высоте параметров изучаемой среды.

Помимо высотного суммирования измеренных АКФ, для уменьшения статистической погрешности используется временное усреднение оценок, полученных в базовых минутных сеансах. На практике чаще всего усреднение осуществляется по 15-ти сеансам. Такой временной интервал обычно меньше характерных времен становления естественных процессов в ионосфере. Таким образом, можно считать, что временное разрешение в результате усреднения остается приемлемым.

После коррекции и усреднения измеренных АКФ, полученные для заданных промежутков времени и высот коэффициенты корреляции используются для определения профилей концентрации электронов, температур заряженных частиц, относительного содержания ионов разных сортов и вертикальной составляющей скорости переноса заряженных частиц.

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

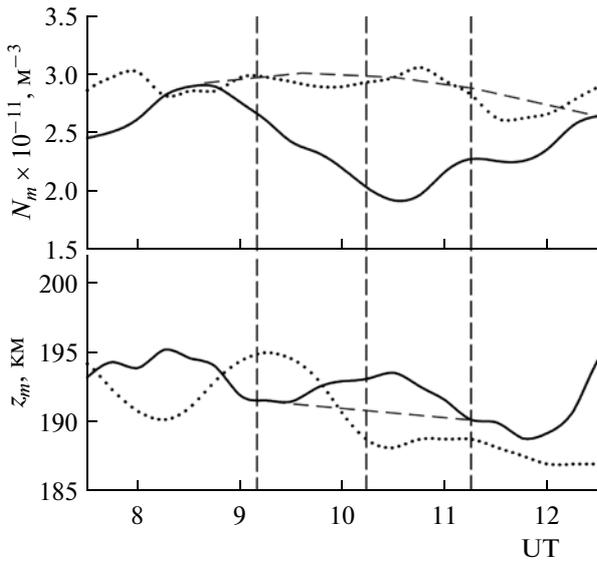
ЗС имело место вблизи местного полудня. Несмотря на это, отношение сигнал/шум  $q$  принимало приемлемое значение  $q_{\min} = 0.1$  на высоте  $z_{\max} = 700$  км. Причиной низких значений  $q$  было то, что измерения проведены в период глубокого минимума солнечной активности. Значение концентрации электронов в максимуме слоя  $F2$  ионосферы не превышало  $3 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , а высота максимума ионизации составляла  $\sim 190$  км.

По указанным причинам далее анализируются пространственно-временные зависимости основных параметров ионосферы в диапазоне высот 190–700 км.

*Вариации основных параметров слоя  $F2$ .* На рис. 1 представлены временные вариации концентрации электронов  $N_m$  и высоты  $z_m$  максимума слоя  $F2$  области  $F$  ионосферы во время ЗС 1 августа 2008 г. и контрольные сутки 2 августа 2008 г.

В момент наступления максимальной фазы ЗС наблюдалось уменьшение  $N_m$  на  $\sim 32\%$  по сравнению с контрольным днем. Критическая частота слоя  $F2$   $foF2$  при этом уменьшилась на  $\sim 17.5\%$ .

Вариации  $z_m$  во время затмения заключались в следующем. До начальной фазы затмения наблюдалась тенденция к уменьшению высоты  $z_m$  от 195 до 191 км. В момент начала ЗС уменьшение высоты максимума прекратилось, примерно через 30 мин высота  $z_m$  начала увеличиваться от 191 км и достигла величины  $z_m \approx 194$  км вблизи максимальной фазы покрытия Солнца (см. рис. 1). Далее по мере движения диска Луны по диску Солнца, высота максимума области  $F2$  опять уменьшалась. Таким образом, ЗС привело к увеличению  $z_m$  примерно на 3 км по сравнению с прогнозируемым значением (пунктир на рис. 1).



**Рис. 1.** Временные вариации концентрации электронов  $N_m$  и высоты  $z_m$  в максимуме слоя  $F_2$  ионосферы во время ЗС 1 августа 2008 г. (сплошная) и в контрольный день 2 августа 2008 г. (точки). Пунктирной линией здесь и далее показаны результаты интерполяции, отображающие прогнозируемые временные вариации параметров ионосферы. Вертикальными линиями здесь и далее показаны моменты начала, главной фазы и окончания ЗС.

**Вариации концентрации электронов.** На рис. 2 приведены временные вариации концентрации электронов  $N$  в диапазоне высот 190–490 км непосредственно в день ЗС 1 августа и контрольный день 2 августа 2008 г.

ЗС 1 августа 2008 г. привело к заметным эффектам в вариациях концентрации частиц в широком диапазоне высот. Как видно из рис. 3, на высотах  $z = 190–210$  км падение концентрации электронов в главную фазу затмения составило примерно 32%. С ростом высоты эффект затмения изменялся слабо. В диапазоне высот 290–680 км падение  $N$  в фазу максимального покрытия диска Солнца составило ~25%. Такое поведение  $N$  было лишь в среднем. Следует отметить, что в день затмения 1 августа и последующие сутки 2 августа в вариациях  $N$  имели место заметные волновые возмущения с относительной амплитудой 5–10%. Они подробнее рассматриваются в части 2 настоящей работы.

На рис. 3 представлены высотные профили концентрации электронов для четырех характерных моментов времени: в ночные часы, до ЗС, в главную фазу ЗС и после окончания затмения. Как видно из рисунка, во время максимальной фазы ЗС имело место уменьшение  $N$  в диапазоне высот 190–680 км и смещение всего профиля  $N(z)$  в направлении к ночному. Такое поведение концентрации электронов соответствует постепенному переходу к ночным условиям. Профили 2 и

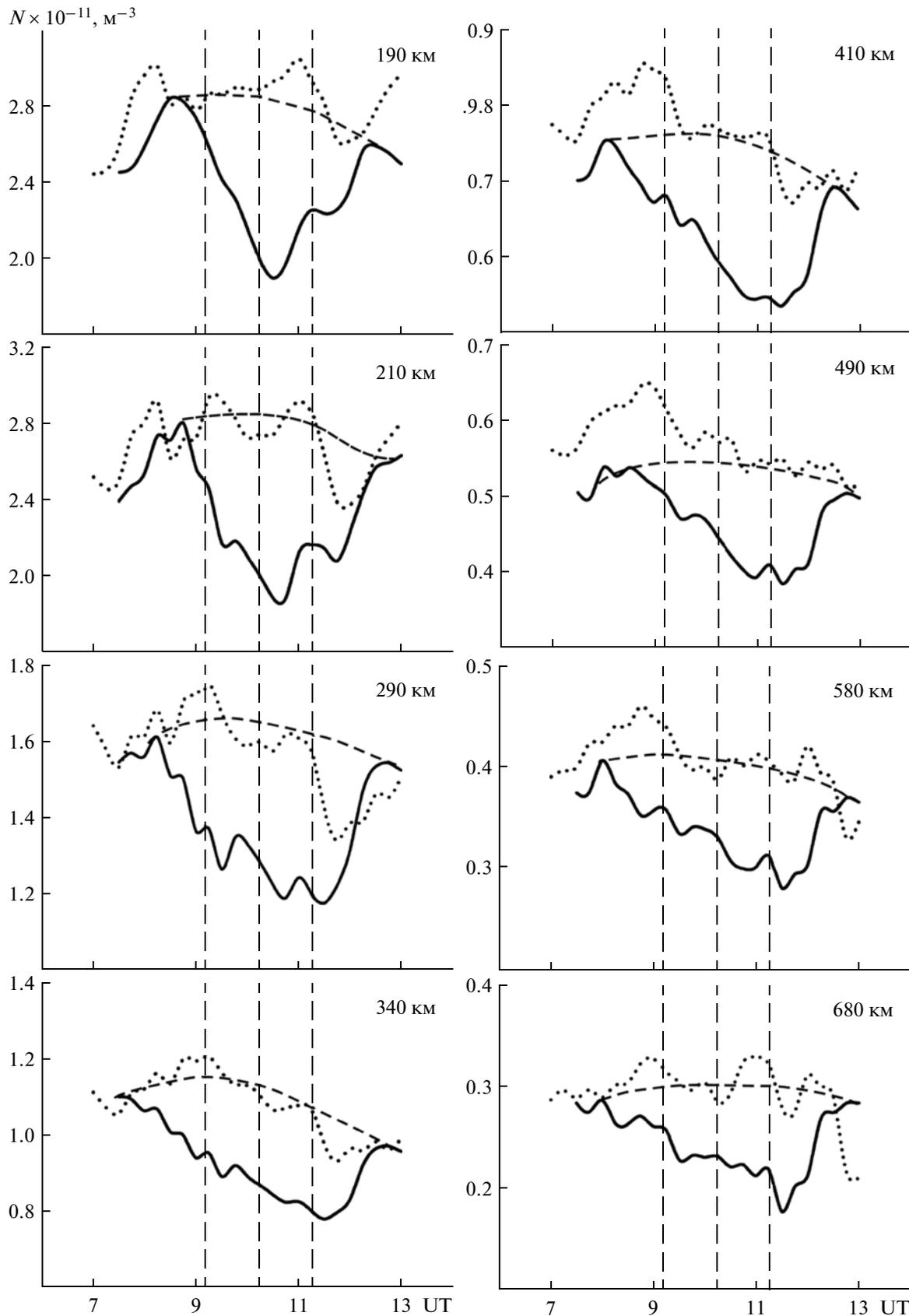
4, соответствующие моментам времени до и после ЗС, мало различались между собой и представляли собой типичные высотные профили  $N(z)$  в дневных условиях в период минимума солнечной активности.

**Вариации температуры электронов и ионов.** Временные зависимости температуры электронов во время ЗС и контрольный день 2 августа представлены на рис. 4. Следует отметить, что вариации  $T_e$  как в день затмения, так и контрольный день имели сложный характер (см. рис. 4). С началом затмения наблюдалось уменьшение температуры электронов, которое продолжилось и после максимального покрытия диска Солнца. Минимум в вариациях  $T_e$  запаздывал по отношению к главной фазе ЗС на ~95–75 мин на высотах 190–490 км соответственно. Далее, по мере движения тени Луны,  $T_e$  увеличивалась до своих фоновых значений, которое имело место до затмения. На высотах 190 и 490 км ЗС привело к уменьшению  $T_e$  на ~70–180 К соответственно.

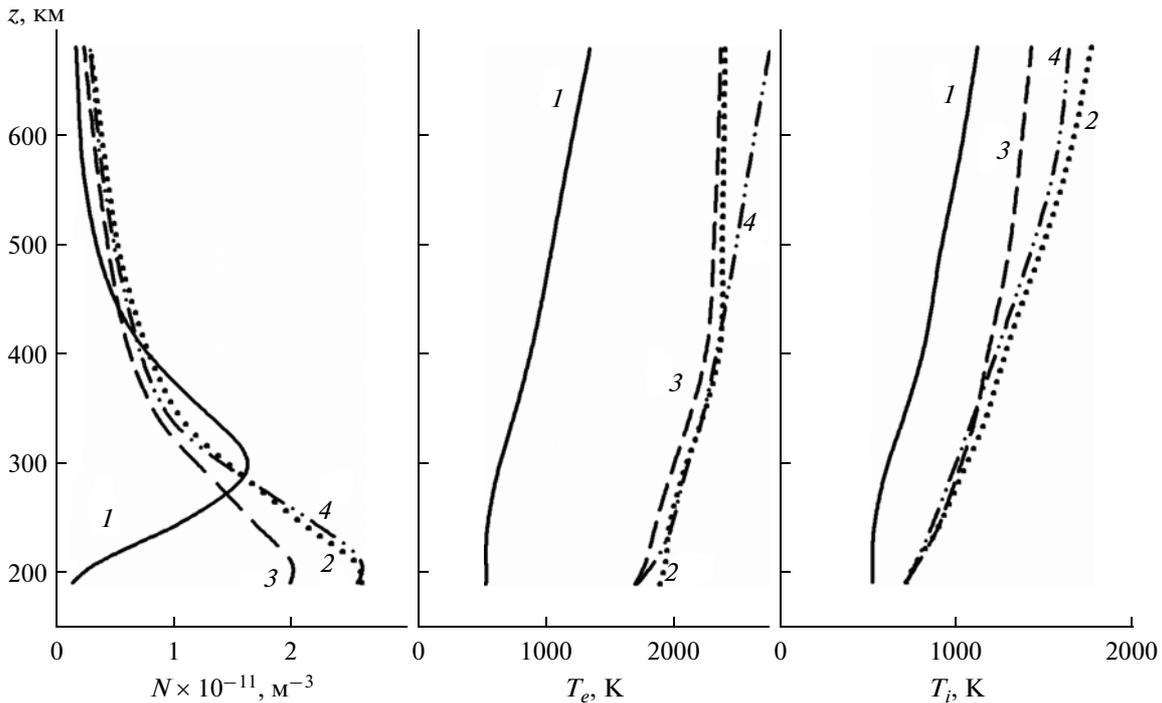
На рисунке 5 представлены вариации температуры ионов  $T_i$  в ионосфере во время ЗС и контрольные сутки 2 августа 2008 г. В контрольный день 2 августа в рассматриваемый период времени, соответствующий ЗС, наблюдался заметный рост  $T_i$ . Тогда как, в день затмения 1 августа, зафиксировано уменьшение  $T_i$  с началом ЗС в месте наблюдения (см. рис. 5). Как видно из рис. 5, на высотах 190–210 км эффекты ЗС проявлялись слабо. Здесь уменьшение  $T_i$  составило 10–30 К. На этих высотах значения  $T_i$  в день затмения практически мало отличаются от значений температуры ионов в контрольный день 2 августа. На высотах 240, 290, 340, 410 и 490 км во время ЗС  $T_i$  уменьшилась на ~60, 60, 70, 100 и 140 К соответственно. Максимальное уменьшение во временных вариациях  $T_i$  наблюдалось через 80–35 мин после начала ЗС на высотах 210–490 км соответственно.

На рисунке 3 представлены высотные профили  $T_e$  и  $T_i$  для четырех характерных моментов времени. Из рисунка видно, что в момент максимального покрытия диска Солнца (кривая 3) наблюдалось уменьшение температуры электронов и ионов в рассматриваемом высотном диапазоне, причем этот эффект постепенно увеличивался с увеличением высоты. В главную фазу ЗС высотные профили  $T_e(z)$  и  $T_i(z)$  качественно подобны профилям  $T_e(z)$  и  $T_i(z)$  в ночное время. Разумеется, значения  $T_e$  и  $T_i$  в этот момент времени и ночью существенно различаются, так как ЗС было частным.

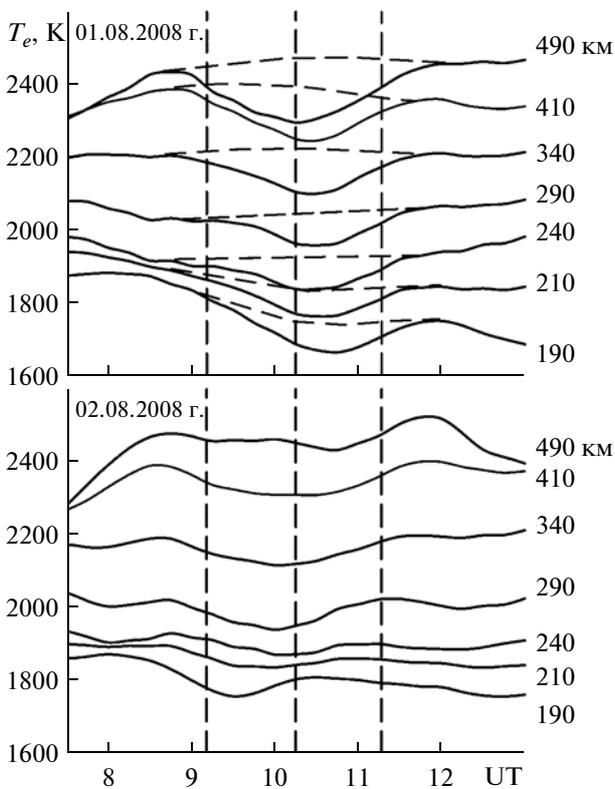
**Временные вариации вертикальной составляющей скорости движения плазмы.** На рисунке 6 показаны временные вариации вертикальной составляющей скорости движения плазмы  $V_z$  для ряда высот ионосферы в диапазоне 200–470 км



**Рис. 2.** Временные вариации концентрации электронов  $N$  на фиксированных высотах во время ЗС 1 августа и в контрольный день 2 августа 2008 г.



**Рис. 3.** Высотные профили концентрации электронов  $N$ , температуры электронов  $T_e$  и ионов  $T_i$  для характерных моментов времени в период ЗС 1 августа 2008 г.: 1 – в ночные часы (19:15–19:30); 2 – непосредственно перед началом ЗС (7:45–8:00); 3 – в момент максимального покрытия диска Солнца (10:00–10:15); 4 – после окончания ЗС (12:30–12:45).



**Рис. 4.** Временные вариации температуры электронов  $T_e$  на фиксированных высотах во время ЗС и в контрольный день 2 августа 2008 г.

(здесь  $q > 0.2$ ). Из рисунка 6 видно, что временной ход  $V_z(t)$  на всех высотах практически повторяет ход функции  $B(t) = 1 - A(t)$ , где  $A(t)$  – функция покрытия. На высотах  $z \approx 250$ –360 км модуль скорости (здесь  $V_z < 0$ , плазма движется вниз) увеличился от 10–25 м/с до 50 м/с, а на высотах, близких к  $z \approx 200$  км он изменился незначительно: от 38 до 50 м/с. В то же время в диапазоне высот 360–470 км модуль скорости увеличился на 35–40 м/с. До ЗС на высотах 400–470 км  $V_z = 10$ –50 м/с, а вблизи главной фазы затмения  $V_z \approx -(35$ –40) м/с. Это означает, что в верхней части изучаемой области ионосферы затмение привело к переходу от дневных условий к ночным. На этих высотах в ночное время поток плазмы направлен из плазмосферы в ионосферу. Плазмосфера “подпитывает” ночную ионосферу плазмой. Подобные процессы наблюдались вблизи главной фазы ЗС. После окончания затмения в диапазоне высот 400–580 км скорость снова стала положительной и достигла значений 25–55 м/с на высотах 470 и 580 км соответственно. Поток плазмы, как и до ЗС, здесь направлен вверх: ионосфера “подпитывает” плазмосферу.

Переход к дневной ионосфере завершился к 12:15, т.е. через 1 час после окончания затмения.

*Высотные вариации вертикальной составляющей скорости движения плазмы.* Высотные профили  $V_z(z)$  для различных моментов времени пока-

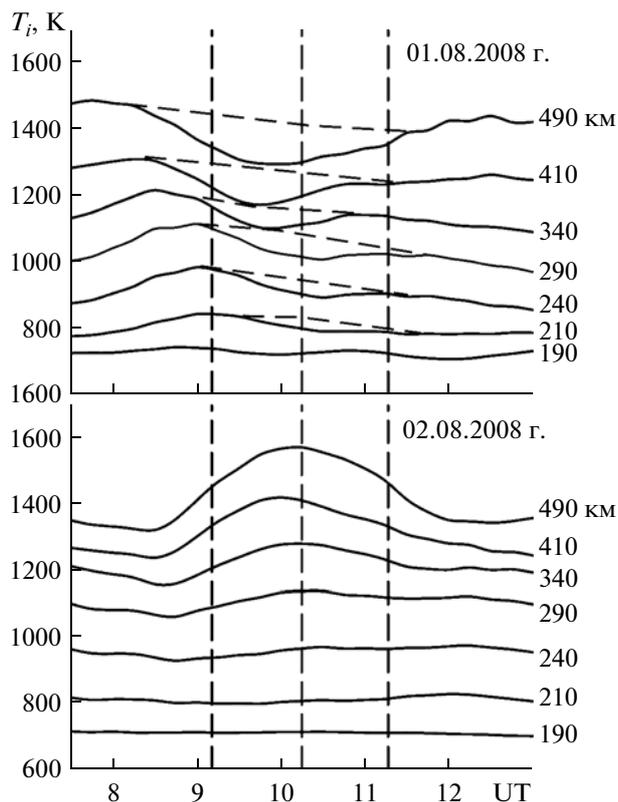


Рис. 5. Временные вариации температуры ионов  $T_i$  на фиксированных высотах во время ЗС 1 августа 2008 г. и в контрольный день 2 августа 2008 г.

заны на рис. 7. Из рисунка видно, что до ЗС переход от отрицательных значений скорости к положительным осуществляется на высоте  $z \approx 390\text{--}420$  км. Примерно через 20 мин после наступления затмения на всех высотах  $V_z < 0$ . Это продолжалось  $\sim 90$  мин. После 10:50 на высоте  $z \approx 530$  км и выше скорость стала положительной. Постепенно высота, где  $V_z = 0$ , опускалась вниз. В 12:00 она составила  $\sim 400$  км, а в 12:15 – 360 км. К этому времени эффекты ЗС практически закончились.

Отметим, что высотный профиль скорости  $V_z$ , полученный вблизи главной фазы ЗС в 10:15, несколько отличается от ожидаемого на высотах 400–530 км из-за уменьшения модуля  $V_z$  на 20–50 м/с в этом диапазоне высот, тем не менее, знак скорости не изменяется. Этот эффект подлежит более тщательному анализу. Добавим, что на графике высотного профиля  $V_z(z)$ , полученного в 10:30 штриховой линией показан профиль  $V_z(z)$ , измеренный 18 августа 2008 г. в 20:00. Из рисунка видно сходство высотных вариаций скорости движения плазмы в вечернее время и днем вблизи главной фазы ЗС.

**Высотные вариации концентрации ионов водорода.** На рисунке 8 представлены высотные зависимости относительного содержания ионов водо-

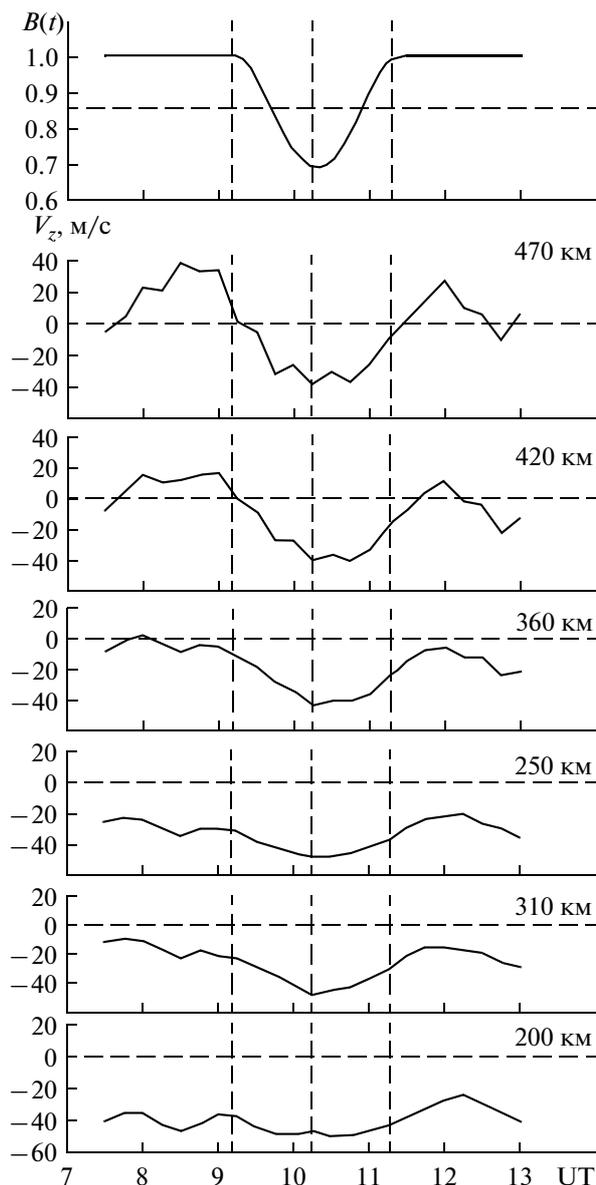
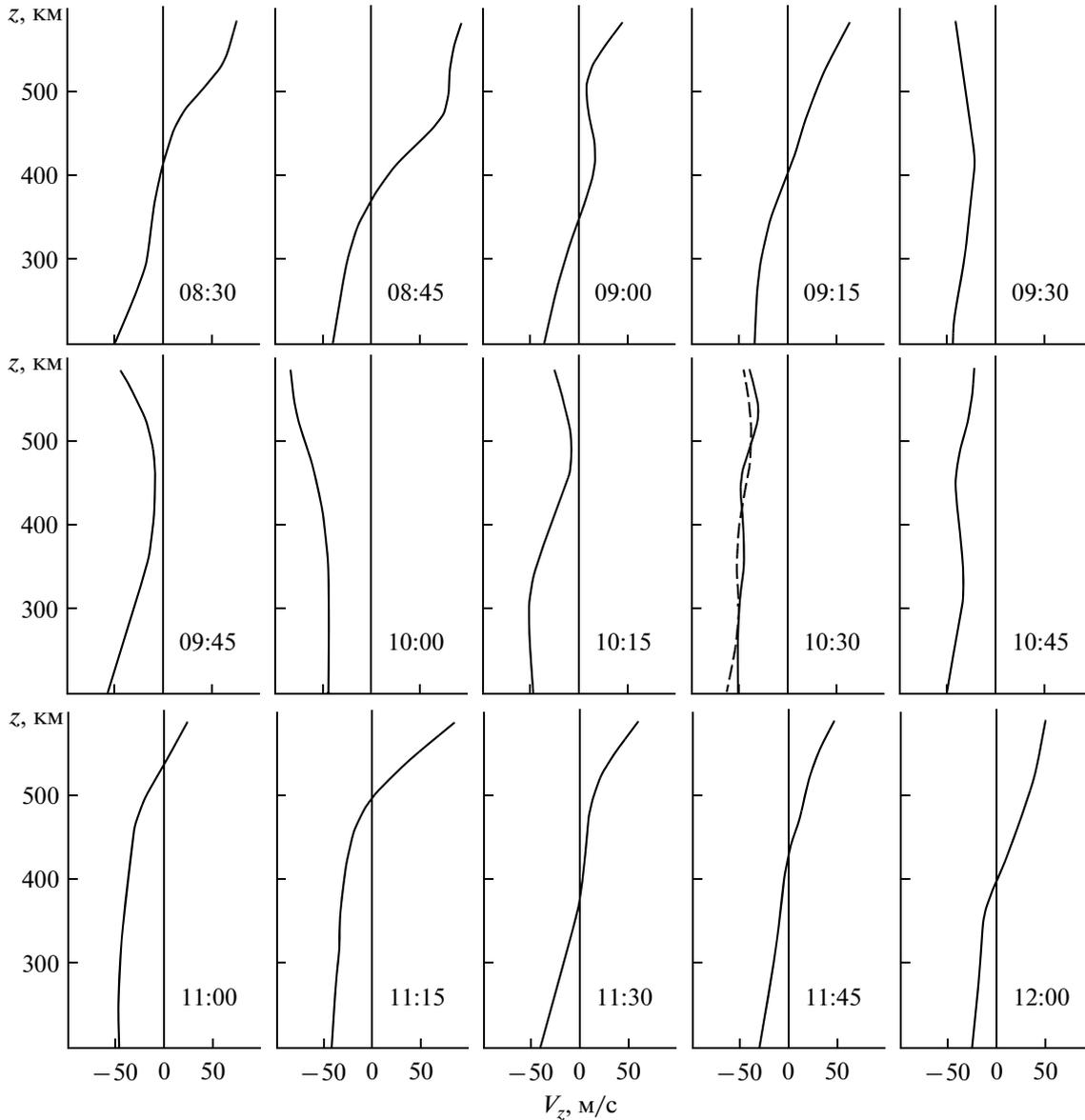


Рис. 6. Временные вариации функции  $B(t)$  (верхняя панель) и вертикальной составляющей скорости движения плазмы на различных высотах (результаты скользящего усреднения по 45 мин).

рода  $N(\text{H}^+)/N$  для трех моментов времени в день ЗС: до начала затмения, вблизи его максимальной фазы, а также после окончания затмения. Видно, что во время главной фазы ЗС наблюдалось увеличение относительного содержания ионов водорода на всех высотах выше 450 км, причем эффект увеличения отношения  $N(\text{H}^+)/N$  усиливался с ростом высоты (от 18% на высоте 491 км до 33% на высоте 656 км).

После окончания затмения выше 450 км происходило уменьшение относительного содержания ионов водорода. В целом, высотный профиль



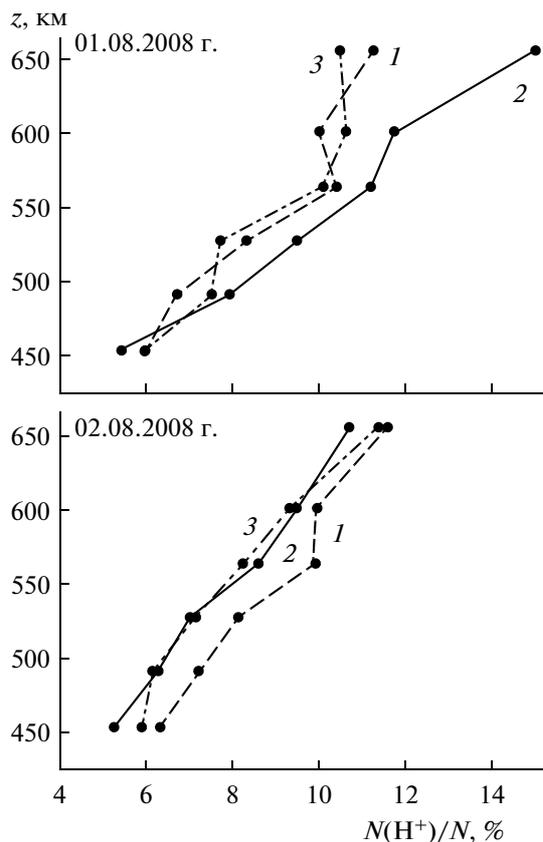
**Рис. 7.** Высотные зависимости вертикальной составляющей скорости движения плазмы для различных временных интервалов (усреднение по 15 минут). Штриховой линией показана высотная зависимость вертикальной составляющей скорости для вечернего времени (20:00) 18 августа 2008 г.

$N(\text{H}^+)/N$  имел тенденцию принять вид профиля до затмения.

На рисунке 8 также приведены аналогичные зависимости для тех же моментов времени для контрольного дня 2 августа 2008 г. Поведение высотных профилей  $N(\text{H}^+)/N$  для контрольного дня характерно для спокойных условий. Видно, что на рассматриваемом интервале времени происходило уменьшение относительного содержания ионов водорода практически на всех высотах, а максимальное значение  $N(\text{H}^+)/N$  было менее 12%, тогда как во время главной фазы ЗС оно достигало 15%.

*Временные вариации концентрации ионов водорода.* На рисунке 9 представлены временные зависимости концентрации ионов водорода  $N(\text{H}^+)$  в рассматриваемые моменты времени для дня затмения и для контрольного дня на фиксированных высотах. Видно, что в отличие от времени до и после затмения, во время главной фазы ЗС для высот, меньших 491 км, наблюдалось уменьшение концентрации ионов водорода. Для высот, больших 564 км, уменьшение величины  $N(\text{H}^+)$  не обнаруживалось.

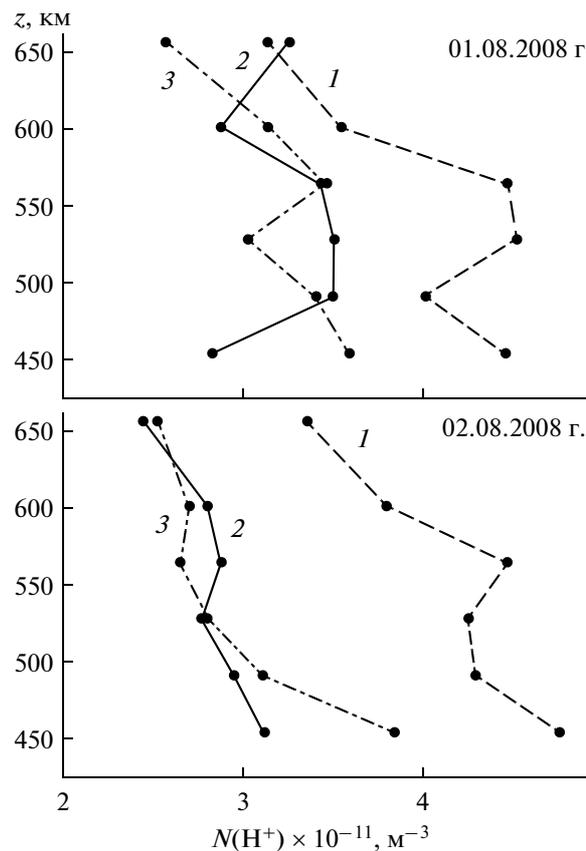
В отличие от дня затмения, 2 августа 2008 г. формы профилей  $N(\text{H}^+)$  качественно схожи между собой.



**Рис. 8.** Высотные профили относительного содержания ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. и контрольный день 2 августа 2008 г. для моментов времени: 1 – 08:10, 2 – 10:10 (главная фаза ЗС) и 3 – 12:10.

На рисунке 10 представлены временные вариации отношения  $N(H^+)/N$  на различных высотах для дня затмения и контрольного дня. Сравнение результатов показывает, что для всех высот, больших 454 км, в период главной фазы ЗС отношение  $N(H^+)/N$  для дня затмения больше, чем для контрольного дня. Степень расхождения увеличивалась с ростом высоты и составляла 33 и 50% на высотах 491 и 656 км соответственно. Кроме этого, в отличие от контрольного дня, в день затмения на рассматриваемых высотах наблюдалось возрастание относительного содержания ионов водорода вблизи начала главной фазы ЗС.

Следует отметить, что на больших высотах рост отношения  $N(H^+)/N$  начинался на несколько десятков минут раньше начала затмения, а на малых высотах – запаздывал по отношению к началу затмения на то же время. Обратная картина наблюдается при уменьшении отношения  $N(H^+)/N$ , т.е. продолжительность существования повышенных значений относительного содержания ионов водорода была большей на больших высотах.



**Рис. 9.** Высотные профили концентрации ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. и контрольный день 2 августа 2008 г. для моментов времени: 1 – 08:10, 2 – 10:10 (главная фаза ЗС) и 3 – 12:10.

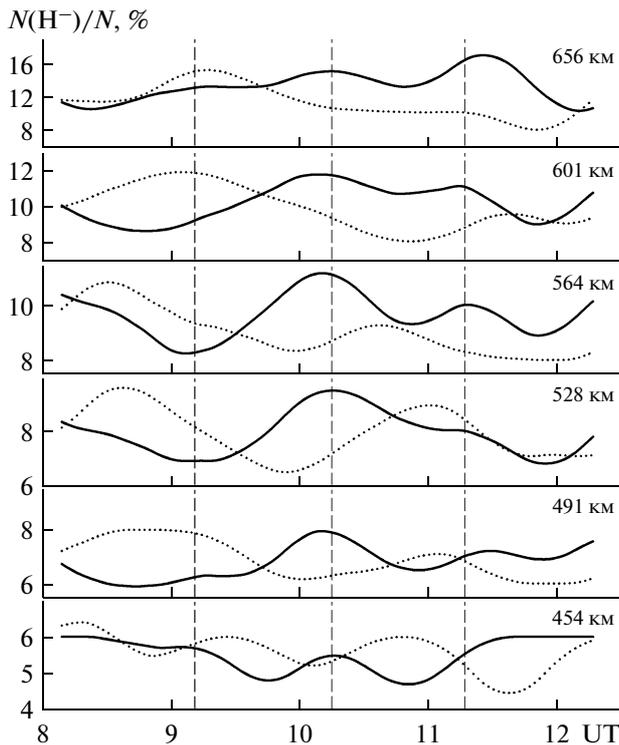
На рисунке 11 представлены временные вариации концентрации ионов водорода  $N(H^+)$  на различных высотах для дня затмения и контрольного дня. Важно, что временные вариации значений  $N(H^+)$  для рассматриваемых высот не имеют общих тенденций, как это происходит с относительным содержанием  $N(H^+)/N$ .

## 6. ВЫВОДЫ

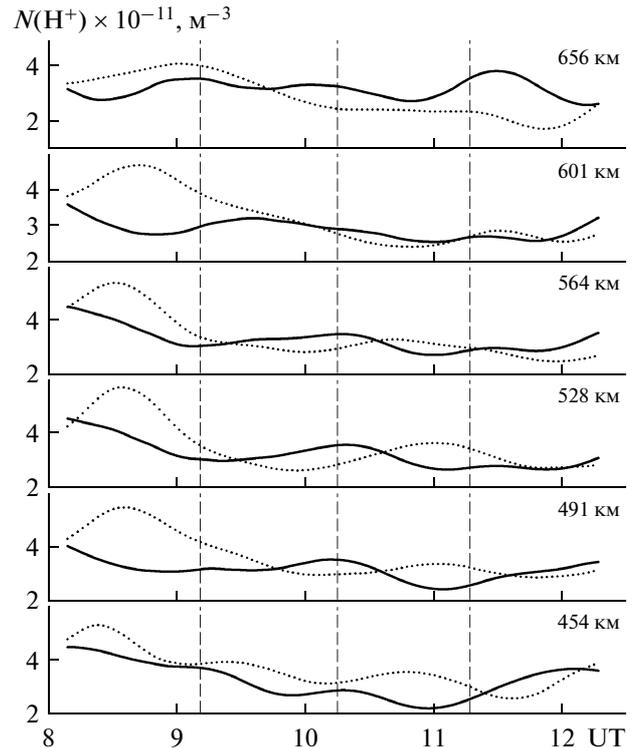
Проведен анализ эффектов ЗС в период глубокого и продолжительного минимума солнечной активности, который предопределил особенности физико-химических процессов в ионосфере. При этом установлено следующее.

Частное ЗС 1 августа 2008 г. вызвало заметную перестройку среды в широком диапазоне высот (190–700 км), подобную той, что имеет место во время захода/восхода Солнца, но с другими временными масштабами. При этом установлено следующее.

1. Во время ЗС критическая частота  $foF2$  и концентрация электронов  $N_m$  в максимуме слоя  $F2$  ионосферы, находившегося на высоте ~190 км,



**Рис. 10.** Временные вариации относительного содержания ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. и контрольный день 2 августа 2008 г. для различных высот. Результат двукратного скользящего усреднения на интервалах 31 мин со сдвигом 1 мин.



**Рис. 11.** Временные вариации концентрации ионов водорода в день затмения 1 августа 2008 г. и контрольный день 2 августа 2008 г. для различных высот. Результат двукратного скользящего усреднения на интервалах 31 мин со сдвигом 1 мин.

уменьшились на ~17.5 и 32% соответственно. Высота максимума слоя  $F_2$  ионосферы  $z_m$  увеличилась незначительно.

Примерно таким же было уменьшение концентрации электронов в момент максимального покрытия диска Солнца на высотах 190–210 км.

В диапазоне высот 290–680 км падение  $N$  вблизи главной фазы ЗС в среднем составило ~25%.

2. На высотах 190–490 км ЗС привело к уменьшению  $T_e$  на ~70–180 К соответственно. Время запаздывания эффекта по отношению к началу затмения на этих высотах составило 95–75 мин.

3. Температура ионов во время затмения уменьшилась на ~60–140 К на высотах 240–490 км соответственно. Время запаздывания эффекта затмения на этих высотах близко к 80–35 мин соответственно.

4. В период ЗС в диапазоне высот 200–470 км скорость движения плазмы оказалась направленной вниз, в то время как до затмения она была направлена вниз лишь на высотах  $z \leq 360$  км. ЗС привело к изменению скорости движения плазмы на 10–45 м/с на высотах 200–470 км соответственно.

5. Во время главной фазы ЗС относительное содержание ионов водорода увеличивалось по

сравнению с контрольным днем в области высот 450–650 км. Различие в профилях  $N(H^+)/N$  увеличивалось с ростом высоты и составляло 33 и 50% на высотах 491 и 656 км соответственно.

Авторы благодарны А.Ф. Кононенко, И.Б. Склярову, С.В. Черняеву за организацию и проведение измерений на радаре НР.

#### 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 года в Харькове // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 4. С. 526–551. 2005.
- Акимов Л.А., Григоренко Е.И., Таран В.И., Тырнов О.Ф., Черногор Л.Ф. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Успехи современной радиоэлектроники. № 2. С. 25–63. 2002.
- Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Перезалова Н.П., Водяников В.В., Гордиенко Г.И., Литвинов Ю.Г., Яковец А.Ф. Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. над Казахстаном // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 47. № 4. С. 491–500. 2007.
- Белинская А.Ю., Хомутов С.Ю., Григорьева С.А. Ионосферный отклик на солнечное затмение

- 29.03.2006 г. // Изв. вузов. Физика. № 9. С. 68–72. 2006.
- Бурмака В.П., Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Успехи современной радиоэлектроники. № 3. С. 38–53. 2007а.
- 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. Т. 13. № 6. С. 74–86. 2007б.
- Григоренко Е.И., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 3. С. 350–364. 2008.
- Каримов Р.Р., Козлов В.И., Муллаяров В.А. Особенности вариаций характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 2. С. 250–254. 2008.
- Колоколов Л.Е., Легенька А.Д., Пулинец С.А. Ионосферные эффекты, связанные с солнечным затмением 18 марта 1988 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 1. С. 49–57. 1993.
- Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Моделирование и обсуждение результатов // Космічна наука і технологія. Т. 14. № 1. С. 57–64. 2008.
- Черногор Л.Ф. “Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера” как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 1) // Нелинейный мир. Т. 4. № 12. С. 655–697. 2006.
- Черногор Л.Ф. “Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера” как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 2) // Нелинейный мир. Т. 5. № 4. С. 198–231. 2007.
- Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Lesyuta O.S. Effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network // J. Atm. Solar-Terr. Phys. V. 64. № 18. P. 1933–1941. 2002.
- Baron M.J. Incoherent scatter radar observations of the auroral zone ionosphere during the total eclipse of July 10, 1972 // J. Geophys. Res. V. 78. № 31. P. 7451–7460. 1973.
- Boitman O.N., Kalikhman A.D., Tashchilin A.V. The mid-latitude ionosphere during the total solar eclipse of March 9, 1997 // J. Geophys. Res. V. 104. № A12. P. 28197–28206. 1999.
- Chernogor L.F., Rozumenko V.T. Earth–Atmosphere–Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Physics and Radio Astronomy. V. 13. № 2. P. 120–137. 2008.
- Chernogor L.F., Grigorenko Ye.I., Lyashenko M.V. Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv // Intern. J. Remote Sens. V. 32. № 11. P. 3219–3229. 2011.
- Deshpande M.R., Chandra H., Sethia G., Vats H.O., Vyas G.D., Iyer K.N., Janve A.V. Effects of the total solar eclipse of 16 February 1980 on TEC at low latitudes // Proc. Indian. Nat. Acad. Sci. V. A48. Suppl. № 3. P. 427–433. 1982.
- Evans J.V. An F region eclipse // J. Geophys. Res. V. 70. № 1. P. 131–142. 1965a.
- Evans J.V. On the behavior of  $f_oF_2$  during eclipse F region eclipse // J. Geophys. Res. V. 70. № 3. P. 733–738. 1965b.
- Jones T.B., Wright D.M., Milner J., Yeoman T.K., Reid T., Senior A., Martinez P. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse 11 August 1999 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 66. № 5. P. 363–374. 2004.
- Le H., Liu L., Yue X., Wan W. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling // Ann. Geophys. V. 26. P. 107–116. 2008.
- Le H., Liu L., Yue X., Wan W. The ionospheric behavior in conjugate hemispheres during the 3 October 2005 solar eclipse // Ann. Geophys. V. 27. P. 179–184. 2009.
- Roble R.G., Emery B.A., Ridley E.C. Ionospheric and thermospheric response over Millstone Hill to the May 30, 1984, annual solar eclipse // J. Geophys. Res. V. 91. № A2. P. 1661–1670. 1986.
- Salah J.F., Oliver V.L., Foster J.C., Holt J.M. Observations of the May 30, 1984, annual solar eclipse at Millstone Hill // J. Geophys. Res. V. 91. № A2. P. 1651–1660. 1986.
- Sterling D.L., Hanson W.B., Woodman R.F. Synthesis of data obtained at Jicamarca, Peru, during the September 11, 1969, eclipse. // Radio sci. V. 7. № 2. P. 279–289. 1972.