

УДК 520.16+523.31+523.9:520.86, 550.388

В. П. Бурмака¹, В. Н. Лысенко¹, М. В. Ляшенко¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери НАН і МОН України, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений

Надійшла до редакції 31.03.07

Представлено результати спостережень ефектів у приземній атмосфері, іоносфері та геомагнітному полі, які супроводжували часткове (близько 24 %) затемнення Сонця 3 жовтня 2005 р. Вимірювання виконано за допомогою засобів, розміщених в обсерваторіях поблизу м. Харкова. Після початку головної фази затемнення спостерігалось зменшення температури повітря в приземній атмосфері на 1—1.4 К, зменшення температур електронів та іонів на 100—200 і 40—80 К відповідно на висотах 410—490 км. Зменшення концентрації електронів було незначним (близько 5 %), воно маскувалось добовими варіаціями. Виявлено збільшення до двох разів на висотах 400—800 км і зменшення у 7—10 разів у діапазоні висот 900—1200 км концентрації іонів водню. Модуль вертикальної складової швидкості переносу плазми збільшився приблизно на 20 м/с. Затемнення супроводжувалось генерацією квазі-періодичних збурень в іоносфері та геомагнітному полі.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные и теоретические исследования, интерпретация и моделирование вариаций параметров динамических процессов в геокосмосе в периоды уникальных событий являются важнейшими и актуальными задачами в изучении околоземного и космического пространств. К таким уникальным событиям относится затмение Солнца (ЗС).

Процессы в атмосфере, ионосфере и геомагнитном поле, сопровождающие ЗС, качественно подобны процессам, протекающим в вечерне-утреннее время.

Наблюдения при каждом ЗС позволяют уточнить сопутствующие динамические процессы и описывающие их модели.

Несмотря на достаточно большое количество публикаций, посвященных эффектам ЗС [1—5, 9—11, 15—19]), из-за сложности и многообра-

зия явлений в околоземной среде есть ряд трудностей в понимании всей картины процессов в атмосфере и геокосмосе, сопровождающих ЗС. Следует добавить, что ЗС, особенно полные, в данной местности наблюдаются редко. Поэтому задача исследования поведения атмосферы, ионосферы и магнитосферы во время ЗС остается актуальной.

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдений, выполненных вблизи Харькова, вариаций температуры в приземной атмосфере, параметров ионосферной плазмы и геомагнитного поля, сопутствовавших частному ЗС 3 октября 2005 г.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАТМЕНИИ СОЛНЦА

Затмение 3 октября 2005 г. вблизи Харькова было частным. Оно началось в 08:36 (здесь и

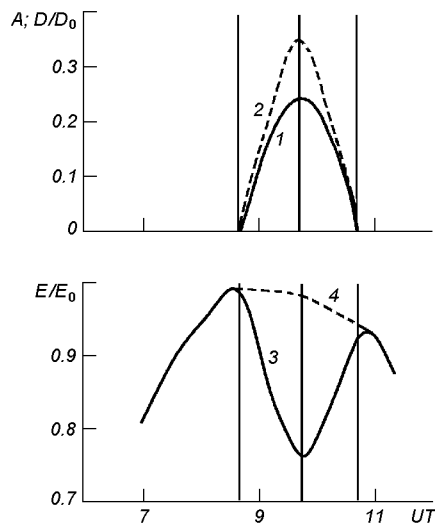


Рис. 1. Временные вариации функции A покрытия Солнца (1), отношения D/D_0 покрытого и полного диаметров диска Солнца (2), относительной освещенности E/E_0 поверхности Земли в день затмения Солнца 3 октября 2005 г. (3) и в контрольный день 4 октября 2005 г. (4). Здесь и далее вертикальные линии отмечают моменты начала, максимального покрытия и окончания ЗС

далее UT), а закончилось в 10:42. Максимальное покрытие диска Солнца, составившее 24 %, наблюдалось в 09:38. Освещенность поверхности Земли при этом уменьшилась в 1.3 раза. Общая продолжительность ЗС в месте наблюдения составила 2 ч 06 мин. Временные вариации функции покрытия $A(t) = S_{obs}/S$, отношения диаметров покрытого и полного дисков Солнца, а также относительной освещенности $E(t)/E_0$ показаны на рис. 1. Здесь S_{obs} и S — площади покрытой части диска и диска Солнца, $E(t) = E_0(1 - A(t))\cos\chi(t)$, $E_0 = E(\chi = \min)$, $\chi(t)$ — зенитный угол Солнца.

Известно, что энергетика процессов, вызванных даже частным ЗС, значительна [1, 2]. В окрестности г. Харькова скорость перемещения лунной тени составляла около 750 м/с, т. е. превышала скорость звука в атмосфере. При этом в воздухе может генерироваться ударная волна, которая по мере ее распространения от источника превращается в акустико-гравитационную волну (АГВ) [17, 18]. При покрытии диском Луны солнечного диска поверхность планеты, приземная атмосфера, озоносфера и тер-

мосфера охлаждаются. Это также может вызвать генерацию АГВ. Последние, модулируя параметры атмосферы и ионосферы, приводят к генерации волновых возмущений в геомагнитном поле. Поиску и описанию этих эффектов, в частности, посвящена настоящая работа.

СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Метеорологическая обстановка. Днем 3 октября 2005 г. небо было безоблачным, 4 октября степень покрытия неба облаками достигала 30—35 %. Последнее привело к снижению температуры воздуха по сравнению с температурой воздуха 2 и 3 октября примерно на 2 °С.

Скорость северо-западного ветра 2, 3 и 4 октября в среднем составляла 3—4 м/с. Эпизодически она увеличивалась до 6—8 м/с.

Гелиофизическая обстановка. На рис. 2 приведены значения параметров, описывающих состояние космической погоды: концентрации частиц n_{sw} , температуры T , радиальной скорости V_{sw} (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor) и динамического давления p_{sw} (расчет); компонентов B_z (сплошная линия), B_t (точки) межпланетного магнитного поля (ACE Satellite — Magnetometer); функции Акасофу ϵ (расчет); потоков протонов Π_{pr} (GOES-8 (W75)) и электронов Π_e (GOES-12), H_p -компонента геомагнитного поля (GOES-12); индексов K_p (Air Force Weather Agency), D_{st} (WDC-C2 for Geomagnetism Kyoto University); AE (WDC Kyoto). Видно, что за несколько дней до ЗС имело место существенное увеличение температуры частиц в солнечном ветре и его скорости. Это привело к эпизодическим «впрыскиваниям» энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли (всплескам энергетической функции Акасофу), всплескам индекса авроральной активности AE , падению D_{st} -индекса примерно до -30 нТл и увеличению K_p -индекса до 3—4. Это означало, что 1 октября 2005 г. имела место слабая магнитная буря, релаксация которой продолжалась еще несколько суток. День 3 октября был магнитоспокойным ($K_p = 1...2$). Еще менее возмущенными были сутки 4 октября, которые принимались за контрольные.

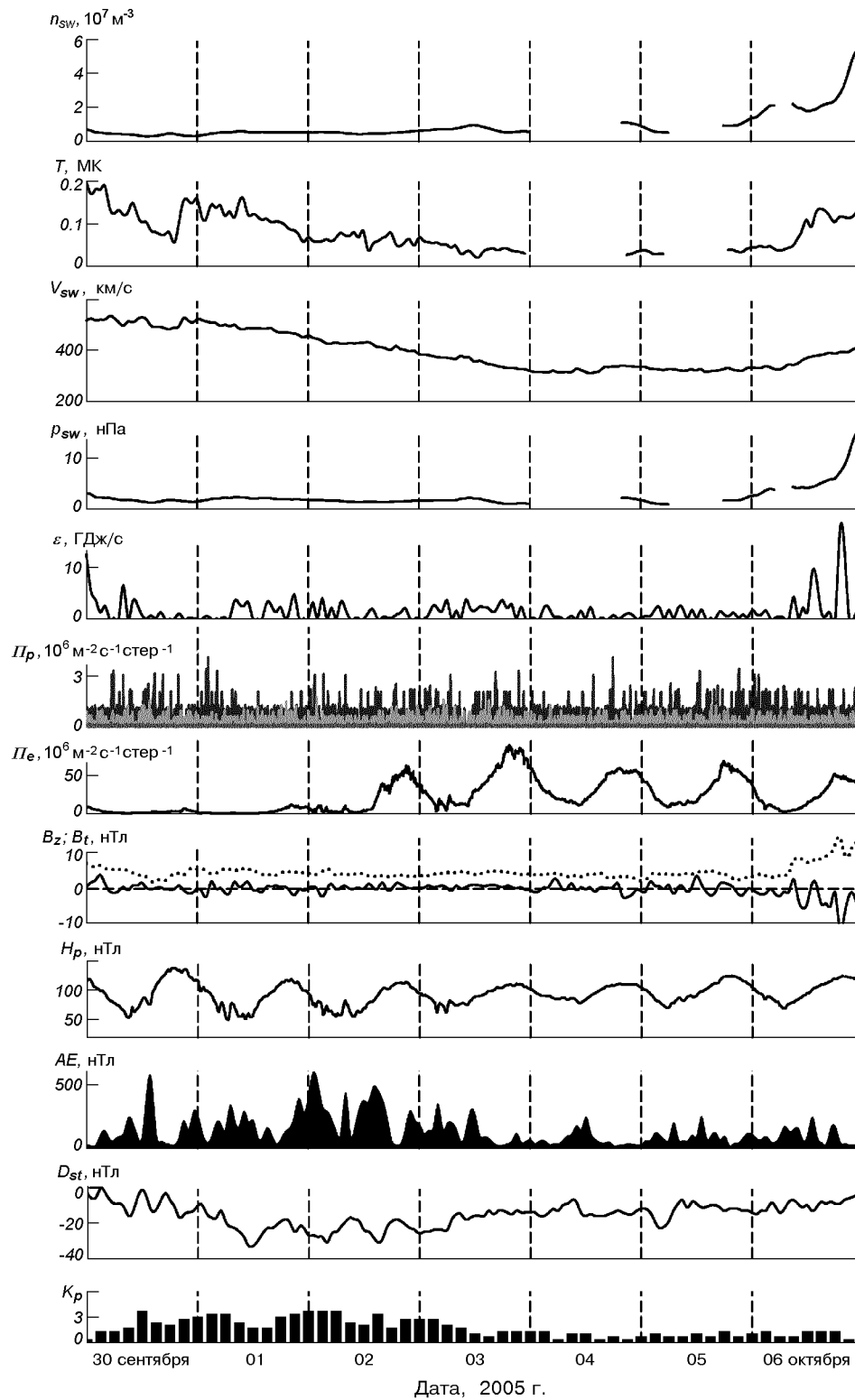


Рис. 2. Временные вариации параметров, описывающих состояние космической погоды 30 сентября — 6 октября 2005 г.

В качестве фоновых также использовались измерения, выполненные 21—23 сентября 2005 г. Эти сутки относились к магнитоспокойным ($K_p = 1...3$).

СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ

Радар некогерентного рассеяния. Единственный в среднеширотной Европе радар НР расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы вблизи Харькова ($49^\circ 36'$ с. ш., $36^\circ 18'$ в. д.) [14]. Основные параметры радара следующие: частота — 158 МГц, диаметр параболической антенны — 100 м, эффективная площадь антенны — около 3700 м^2 , коэффициент усиления антенны — около 10^4 , ширина основного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности — около 1° , импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства равны $P_i = 3.6 \text{ МВт}$ и $\bar{P} = 100 \text{ кВт}$ соответственно, длительность импульса $\tau = 100 \dots 800 \text{ мкс}$, частота следования импульсов — 24.4 Гц. Полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства составляет 5.5—9.5 кГц. Эффективная шумовая температура системы $T_{\text{ш}}$, приведенная ко входу радиоприемного устройства, зависит от времени суток, сезона и уровня промышленных радиопомех. Ее расчетное значение равно 1270—1770 К. Оцененная из данных наблюдений шумовая температура системы составляла $T_{\text{ш}} = 1300\text{—}1800 \text{ К}$. Радар подключен к локальной вычислительной сети, образуя измерительно-вычислительный комплекс, осуществляющий предварительную обработку НР-сигнала в реальном масштабе времени.

Основное влияние на точность измерения параметров ионосферы оказывает статистическая погрешность, которая зависит от отношения сигнал/шум, а значит от частоты повторения зондирующих радиоимпульсов и времени накопления. При частоте повторения 24.4 Гц и времени накопления 15 мин относительная средняя погрешность определения температуры электронов и ионов составляет 3—5 %, концентрации электронов — 5—7 %, скорости переноса плазмы — 10 м/с (на высотах, близких к высоте максимума концентрации электронов области F2 ионосферы в дневное время) [13]. С учетом

скользящего усреднения на интервале времени 75 мин и сдвигом на 15 мин эти погрешности уменьшаются примерно в 2.24 раза. Именно такое усреднение в основном использовалось в данной работе.

Ионозонд. Стандартный ионозонд БАЗИС предназначен для общего контроля состояния ионосферы и калибровки мощности НР-сигналов. Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории рядом с радаром НР.

Магнитометр-флюксметр. Исследования временных вариаций горизонтальных составляющих H и D геомагнитного поля (в направлениях север — юг и запад — восток соответственно) осуществлялись при помощи несерийного высокочувствительного магнитометра, включенного в состав программно-аппаратного комплекса [8]. Он размещен в магнитометрической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (с. Граково, Чугуевский район, Харьковская обл.). Его географические координаты: $49^\circ 38'$ с. ш., $36^\circ 56'$ в. д., геомагнитные координаты: $45^\circ 20'$, $119^\circ 20'$.

Комплекс содержит индукционный датчик, магнитометр-флюксметр ИМ-II, устройство регистрации на базе IBM-компьютера, оснащенного картой расширения многоканального аналого-цифрового ввода/вывода (АЦП) ЕС 1839.3004, СНЧ-генератор (для проведения калибровки) и блок бесперебойного питания с аккумулятором емкостью 65 А·ч. Этот блок позволяет обеспечивать автономное функционирование комплекса продолжительностью до 18 ч.

Основные технические характеристики магнитометра следующие:

- полоса рабочих частот f от 0.001 до 15 Гц. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) в полосе 0.001—2 Гц представляет собой АЧХ идеальной дифференцирующей цепочки;
- внутренние шумы на частотах 1, 0.1, 0.01 Гц не превышают 0.5, 5 и 50 пТл соответственно.

Во избежание недоразумений подчеркнем, что речь идет о магнитометре-флюксметре, чувствительность которого определяется уровнем шумов и величиной ЭДС индукционного датчика, пропорциональной f . Поэтому чувствительность прибора ухудшается с увеличением f^{-1} . Чувствительность 0.5—1 пТл близка к рекордной.

Дальнейшая обработка и анализ магнитометрических данных выполняется с использованием

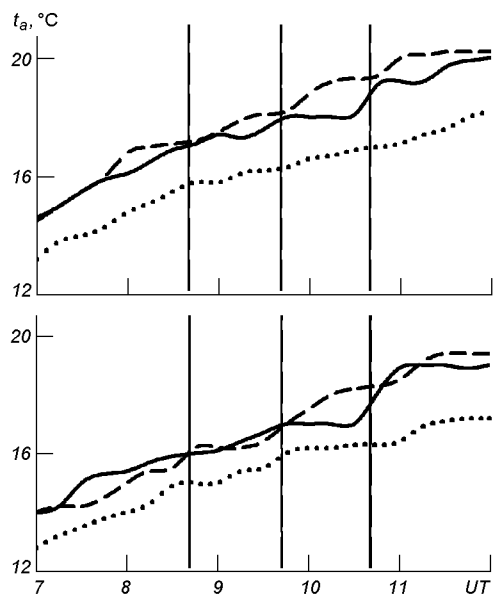


Рис. 3. Временные вариации температуры t_a газа в приземной атмосфере, измеренной двумя разнесенными по горизонтали термометрами: штрихи — 2 октября 2005 г., сплошная — 3 октября 2005 г., точки — 4 октября 2005 г.

специального программного обеспечения, включающего узкополосную цифровую фильтрацию, спектральное, статистическое оценивание и т. д.

Система термометров. Для наблюдений за вариациями температуры приземного воздуха использовались стандартные метеорологические термометры, погрешность измерения которых не превышала 0.1 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Вариации температуры воздуха в приземной атмосфере. Временные вариации t_a накануне, в день ЗС и после него показаны на рис. 3. Видно, что температура воздуха в фоновые дни практически монотонно увеличивалась в интервале времени 07:00—12:00. Средняя скорость увеличения была близка к 0.8 град/ч. В день ЗС температура воздуха также увеличивалась примерно до 09:40 (до момента наступления главной фазы затмения), а затем оставалась неизменной в течение 40 мин. Примерно за 10 мин до окончания затмения t_a начала быстро увели-

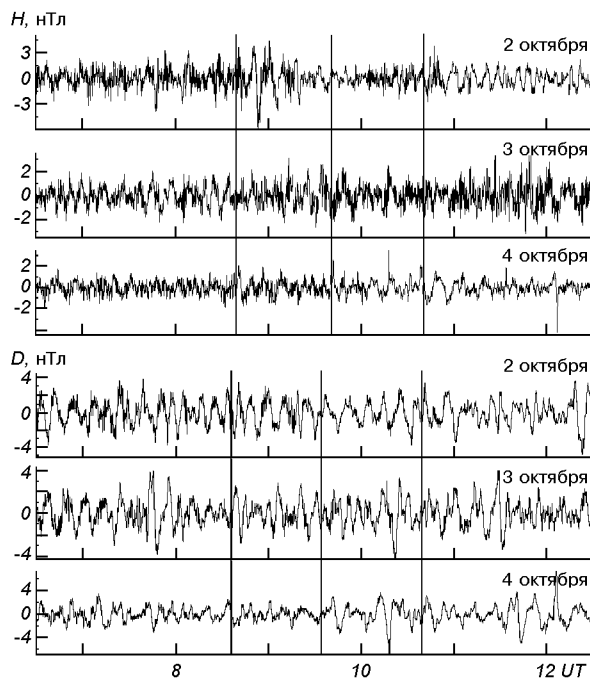


Рис. 4. Временные вариации уровней H - и D -компонентов геомагнитного поля

чиваться. Это продолжалось около 30 мин. Скорость увеличения составляла 2—3 град/ч. Около 11:00 величина t_a приблизилась к своему невозмущенному значению 19 °С.

Вариации флуктуаций геомагнитного поля. Временные вариации уровня флуктуаций горизонтальных составляющих геомагнитного поля показаны на рис. 4. Днем 2 октября 2005 г. геомагнитное поле было слегка возмущенным — уровень флуктуаций достигал 3—4 нТл. День 4 октября относился к магнитоспокойным — уровень флуктуаций был не более 1—2 нТл.

В день ЗС магнитная активность занимала промежуточное состояние. Уровень флуктуаций не превышал 2—3 нТл для H - и D -компонентов соответственно. В интервале времени 09:00—10:00 и 10:15—10:30 уровень флуктуаций H -компонента увеличился в среднем в 1.5 раза. Для D -компонента примерно такой же эффект наблюдался в интервалах времени 09:00—09:50 и 10:10—10:30. Увеличилась амплитуда колебаний с периодами $T \approx 10$ —15 мин.

Вариации параметров максимума области F2 ионосферы. Затмение Солнца 3 октября

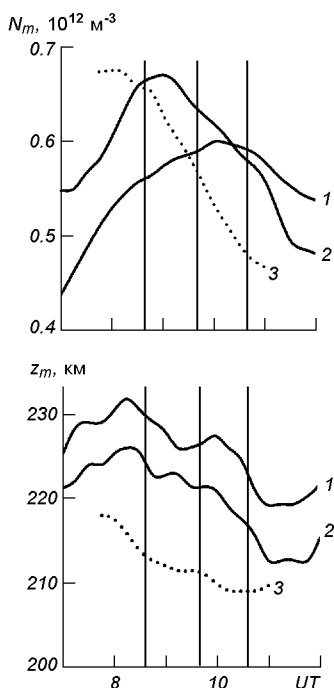


Рис. 5. Временные вариации концентрации электронов N_m в максимуме области F2 ионосферы и высоты z_m максимума области F2: 1 — для 23 сентября 2005 г., 2 — для 3 октября 2005 г., 3 — для 4 октября 2005 г. Скользящее усреднение на интервале 75 мин со сдвигом на 15 мин

2005 г. имело место вскоре после осеннего равноденствия 2005 г. Вначале опишем поведение концентрации электронов N_m и высоты максимума z_m области F2 23 сентября 2005 г. (рис. 5, кривые 1). Видно, что N_m достигала максимального значения примерно в 10:00. Высота z_m сначала увеличивалась до 232 км, после 08:25 постепенно уменьшалась до 220 км.

Опишем теперь поведение $N_m(t)$ и $z_m(t)$ в день ЗС (рис. 5, кривые 2). Концентрация N_m достигла максимума примерно в 09:00, после чего она уменьшалась. Высота z_m приблизилась к своему максимальному значению 225 км примерно в 08:25. Затем наблюдалось почти монотонное ее уменьшение до 210 км, которое имело место в интервале времени 11:00—11:45. С затмением, по-видимому, связаны уменьшение на 5—6% N_m и увеличение на 1—2 км высоты z_m в интервале времени 09:20—10:15, т. е. вблизи фазы максимального покрытия диска Солнца. В

контрольный день, 4 октября 2005 г., с 08:20 до 11:00 также фиксировались обусловленные суточными процессами уменьшения как N_m , так и z_m (см. рис. 5, кривые 3). Таким образом, естественные вариации $N_m(t)$ и $z_m(t)$ существенно замаскировали возможные эффекты ЗС.

Вариации концентрации электронов. Начнем с рассмотрения дневных вариаций $N(t)$ для 23 сентября 2005 г. Из рис. 6, а видно, что в утреннее время на высотах 190—280 км концентрация N увеличивалась примерно до 11:00. В интервале времени 11:00—12:00 имело место уменьшение N . На высотах 290—680 км N увеличивалась примерно до 08:30—09:00, а затем постепенно уменьшалась.

Несколько иным было поведение $N(t)$ 3 и 4 октября 2005 г. (рис. 6, б). Днем 3 октября концентрация электронов достигла своего максимального значения примерно в 08:30—09:00 на высотах 190—680 км. Затем в течение трех часов наблюдалось уменьшение N . В это же время имело место ЗС, которое тоже должно было привести к уменьшению N . Таким образом, естественный ход $N(t)$ в осеннее время вблизи полудня существенно маскировал ожидаемое уменьшение N , вызванное затмением.

В целом подобными были временные вариации N и в контрольный день 4 октября 2005 г. И все же в зависимостях $N(t)$ 3 и 4 октября были характерные отличия. В течение затмения 3 октября по сравнению с контрольным днем 4 октября скорость уменьшения N на высотах 190—250 км замедлилась, а на высотах 290—680 км — ускорилась. Описанный эффект, по-видимому, связан с ЗС.

Вариации температуры электронов и ионов. Сначала опишем вариации T_e 22 сентября 2005 г. (рис. 7). Видно, что в зависимости $T_e(t)$ примерно в 08:30—09:00 наблюдался максимум. В интервале времени 09:00—11:30 имело место монотонное уменьшение T_e . В день затмения T_e в утреннее время на всех высотах уменьшалась примерно до 08:00—08:30. В интервале времени 08:40—09:40 $T_e(t)$ оставалась практически неизменной на высотах 210—410 км. После 09:40 T_e на этих высотах монотонно увеличивалась. Уменьшение T_e в главную фазу ЗС четко выражено на высотах 400—500 км, здесь T_e уменьшилась на 100—200 К соответственно. Ме-

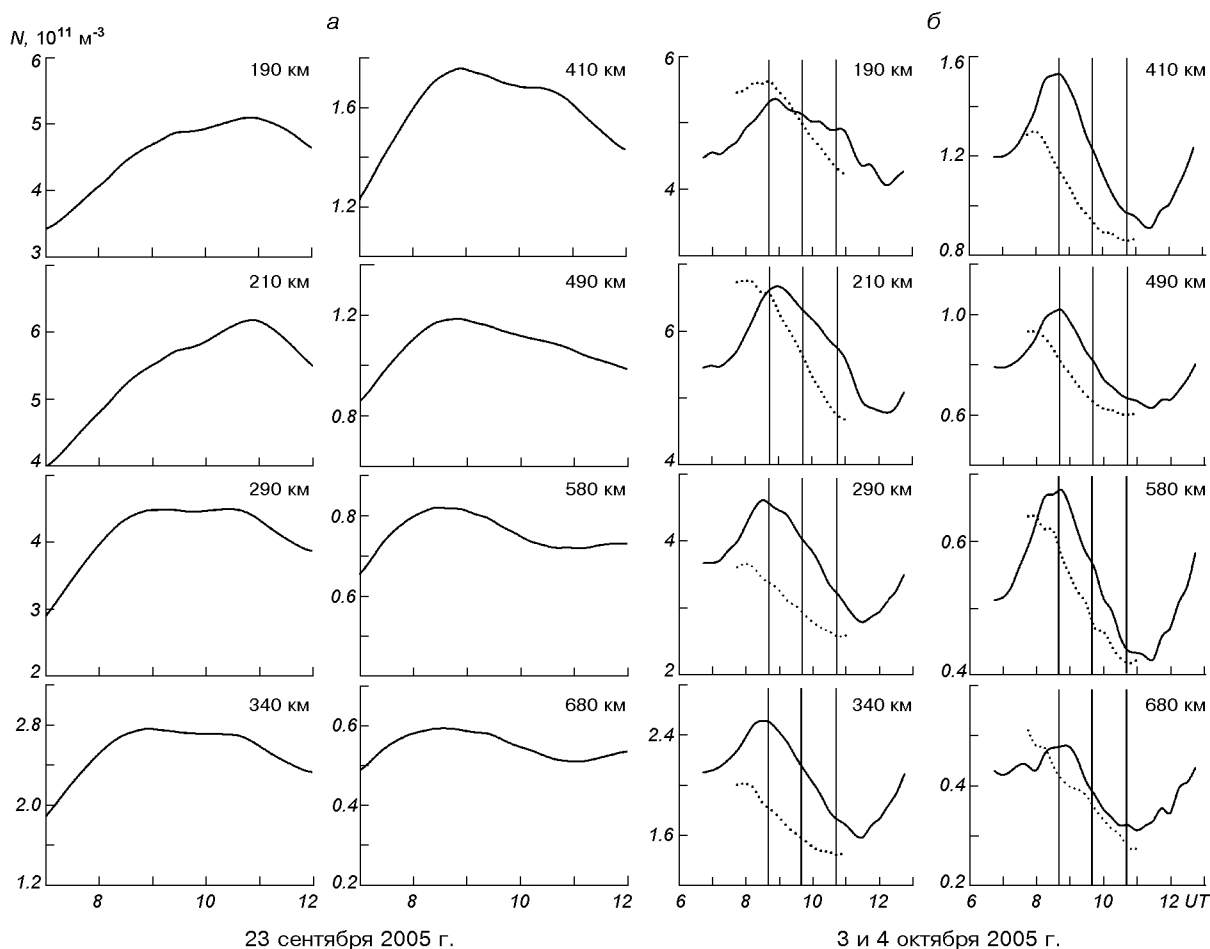


Рис. 6. Временные вариации концентрации электронов N на фиксированных высотах: a — для 23 сентября 2005 г., b — в период ЗС 3 октября 2005 г. (сплошная линия) и контрольный день 4 октября 2005 г. (пунктир). Скользящее усреднение на интервале 75 мин со сдвигом на 15 мин

нее уверенно этот эффект наблюдался на высотах 240—340 км, где уменьшение T_e составило 50—70 К. Добавим, что изменение $T_e(t)$ на всех высотах было малоинерционным, т. е. практически без запаздывания отслеживало изменение функции покрытия $A(t)$. В контрольный день, 4 октября 2005 г., вблизи момента времени главной фазы затмения Солнца 3 октября температура $T_e(t)$ увеличивалась.

Опишем далее поведение $T_i(t)$ 23 сентября 2005 г. (рис. 8). Видно, что на высотах 210—290 км температура ионов оставалась практически неизменной. На больших высотах в зависимости $T_i(t)$ в интервале времени 08:30—10:30

наблюдался слабовыраженный максимум. В день ЗС на всех высотах T_i в интервале времени 07:00—12:00 изменялась незначительно. Затмение сопровождалось уменьшением T_i на 40—80 К на высотах 340—490 км соответственно. На высотах 240, 290 и 340 км величина ΔT_i составляла 15, 20 и 30 К соответственно. На высотах около 210 км изменения T_i были незначительными и находились в пределах погрешности. Максимум эффекта запаздывал по отношению к моменту главной фазы затмения на 25—5 мин на высотах 240—410 км соответственно. В контрольный день, 4 октября 2005 г., подобный эффект не наблюдался.

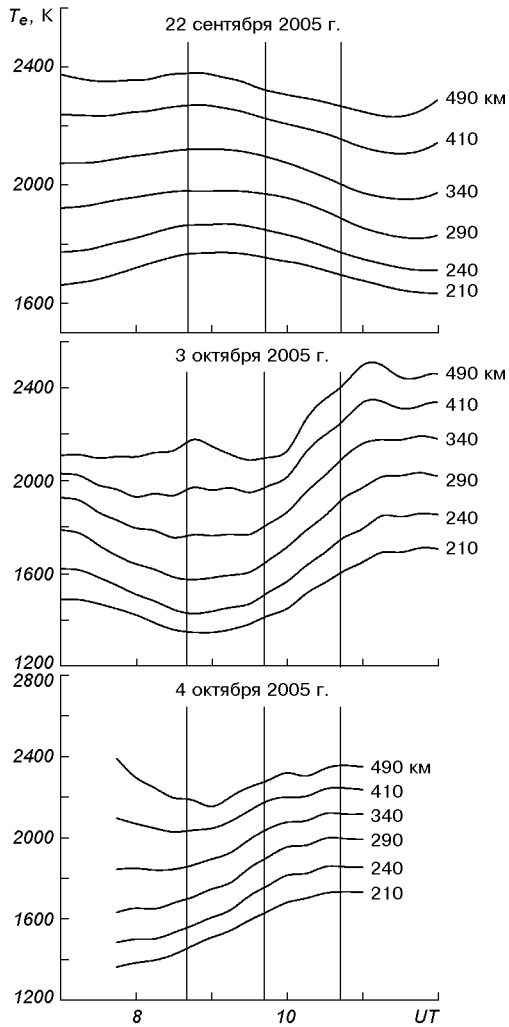


Рис. 7. Временные вариации температуры электронов T_e в период ЗС 3 октября 2005 г. и контрольные дни 22 сентября и 4 октября 2005 г. Цифрами на графиках обозначены высоты. Скользящее усреднение на интервале 75 мин со сдвигом на 15 мин

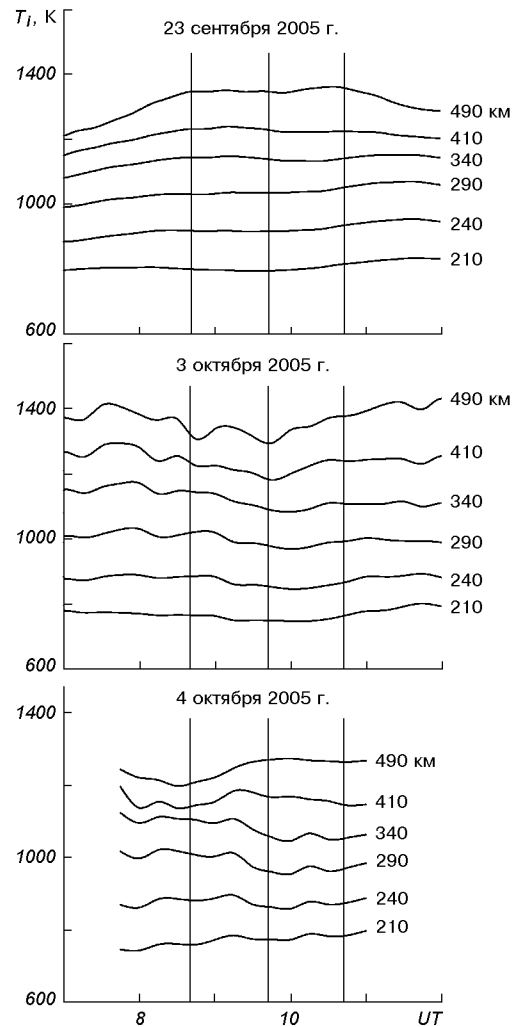


Рис. 8. То же для температуры ионов T_i в дни 23 сентября, 3 и 4 октября 2005 г.

На рис. 9 приведены высотные профили N , T_e и T_i для четырех характерных моментов времени: до начала, в течение главной фазы, после ЗС, а также в середине ночи. Видно, что профиль 3, соответствующий моменту главной фазы, в целом отражает перестройку процессов в ионосфере к ночным условиям (профиль 1). Исключением является уменьшение N после окончания ЗС (профиль 4), связанное с дневным ходом $N(t)$ в осеннее время.

Вариации скорости переноса плазмы. Временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z показаны на рис. 10. В день ЗС на высотах 360—470 км наблюдалось увеличение модуля V_z примерно на 20 м/с (на всех высотах $V_z < 0$), которое в целом отслеживало изменение функции $A(t)$. На следующий день такие изменения не отмечались.

Временные вариации профилей $V_z(z)$ показа-

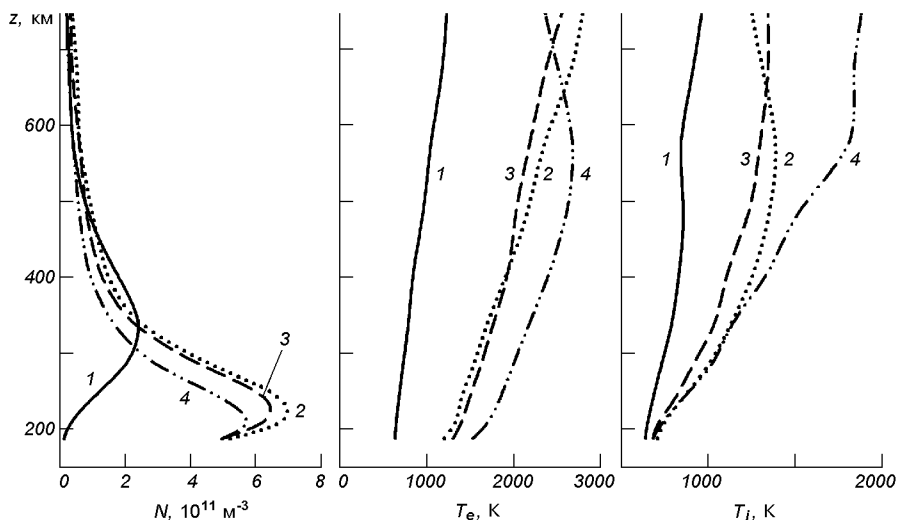


Рис. 9. Высотные профили концентрации электронов N , температуры электронов T_e и ионов T_i для характерных моментов времени в период ЗС 3 октября 2005 г.: 1 — в середине ночи (21:30—21:45); 2 — непосредственно перед началом ЗС (09:00—09:15); 3 — в момент максимального покрытия диска Солнца (09:45—10:00); 4 — после окончания ЗС (10:45—11:00)

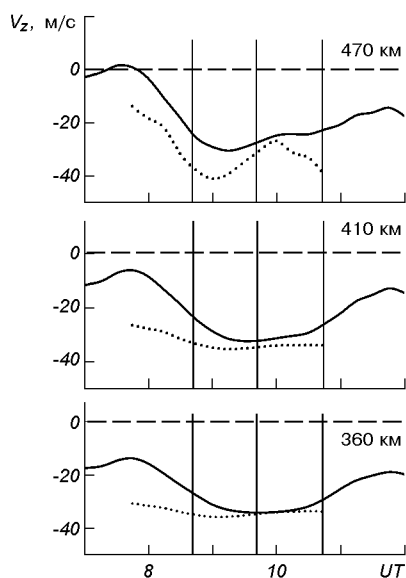


Рис. 10. Временные вариации вертикальной составляющей скорости переноса плазмы V_z на фиксированных высотах во время ЗС 3 октября 2005 г. (сплошная линия) и в контрольный день 4 октября 2005 г. (пунктир). Скользящее усреднение на интервале 75 мин со сдвигом на 15 мин

ны на рис. 11. Видно, что в день затмения как до события, так и после него профиль изменил знак: $V_z < 0$ при $z < 500$ — 600 км, а выше — $V_z > 0$. Вблизи фазы максимального покрытия диска Солнца на всех высотах $V_z < 0$. Такое поведение V_z свойственно ночному времени.

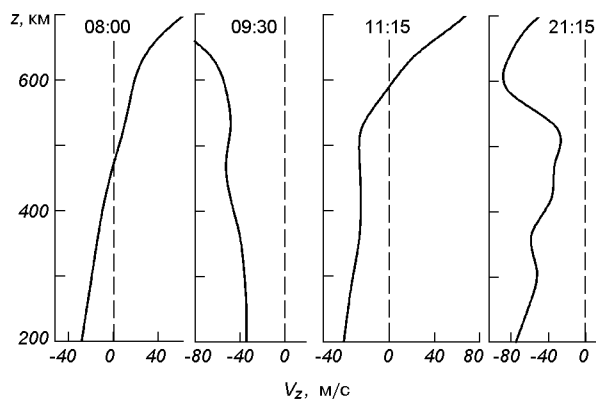


Рис. 11. Высотные профили вертикальной составляющей скорости переноса плазмы V_z для четырех характерных моментов времени 3 октября 2005 г. (в ночные часы, до начала, в момент максимальной фазы и после ЗС)

Вариации концентрации ионов водорода.

Пространственно-временное распределение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N$ в ионосфере показано на рис. 12. В день ЗС на высотах 900 и 1200 км $N(H^+)/N$ увеличилась на 20 и 10 % соответственно. 4 октября пространственно-временные вариации $N(H^+)/N$ отличались от вариаций 3 октября.

Высотные профили концентрации ионов водорода $N(H^+)$ для четырех характерных моментов времени приведены на рис. 13. 3 октября до ЗС и после него на высотах 300—800 км $N(H^+) \approx 0.5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а выше эта концентрация увели-

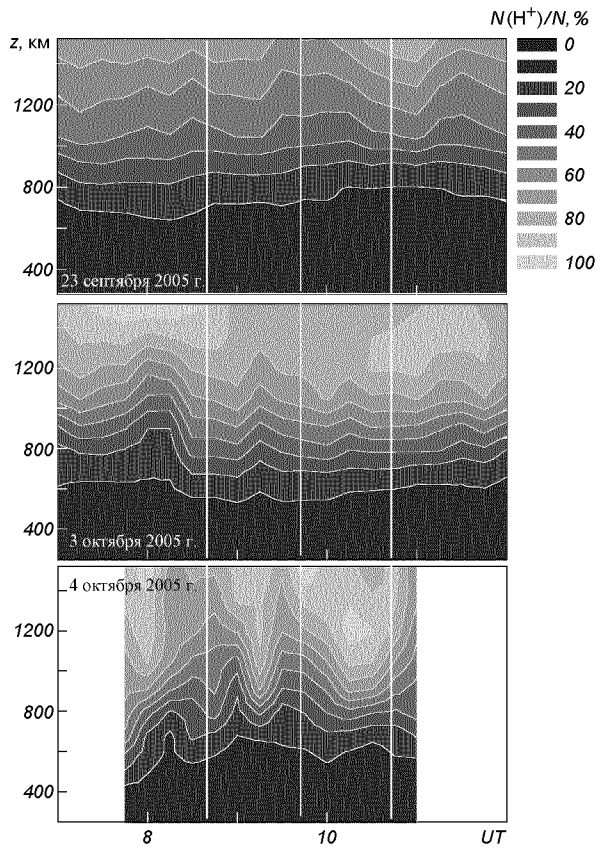


Рис. 12. Высотно-временное распределение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N$ в ионосфере во время ЗС 3 октября 2005 г. и контрольные сутки 23 сентября и 4 октября 2005 г.

чилась в 2–3 раза. Вблизи момента главной фазы затмения $N(H^+)$ существенно (до двух раз) увеличилась на высотах 400–800 км. На высотах 900–1200 км она, напротив, уменьшилась в 7–10 раз. Примерно такой высотный ход $N(H^+)$ свойственен ночному времени.

Волновые возмущения. Для оценки параметров волновых возмущений (ВВ) использовались методики [6, 7, 12]. Сначала кратко опишем результаты наблюдения ВВ концентрации электронов в ионосфере в дневное время 22 и 23 сентября 2005 г., которые для ЗС 3 октября 2005 г. могут использоваться как фоновые. Временные вариации амплитуд ΔN и относительных амплитуд $\delta_N = \Delta N/N$ для 22 сентября 2005 г. приведены на рис. 14, а и б. Видно, что

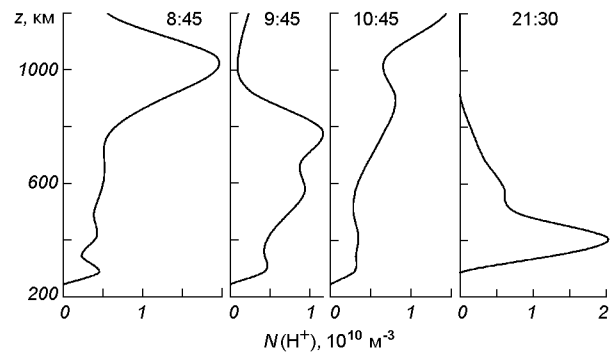


Рис. 13. Высотные профили концентрации ионов водорода $N(H^+)$ для четырех характерных моментов времени 3 октября 2005 г. (в ночные часы, до начала, в момент максимальной фазы и после ЗС)

амплитуда ВВ с увеличением высоты от 140 до 200 км увеличивалась от 10^{10} до $2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а затем убывала до $0.4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ на высоте 490 км. Значения δ_N на всех высотах не превышали 0.03–0.04. Преобладали колебания с периодами 1–1.5 ч.

23 сентября поведения ΔN и δ_N были несколько другими (рис. 14, б). Величина ΔN достигала максимального значения $4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ на высоте $z \approx 200$ км. При $z \approx 140$ км ΔN в среднем составляла около 10^{10} м^{-3} . Выше 200 км амплитуда ΔN убывала от $4 \cdot 10^{10}$ до $0.4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Максимальные значения δ_N наблюдались в диапазоне высот 200–250 км, где они достигали 0.08. Ниже и выше указанного диапазона высот δ_N постепенно уменьшалась до 0.02–0.03. В этот день также преобладали колебания с периодами около 1–1.5 ч.

Результаты наблюдения временных вариаций ΔN и δ_N для 3 октября приведены на рис. 14, в. В день ЗС в диапазоне высот 200–250 км амплитуда ΔN достигала максимального значения $3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Ниже и выше амплитуда ΔN уменьшалась. На высотах около 500 км она не превышала $0.4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Относительная амплитуда δ_N от высоты зависела слабо. До ЗС ее величина не превышала 0.05–0.1. Период преобладающего колебания $T \approx 2$ ч. После главной фазы ЗС произошел «сбой фазы» колебания, амплитуда преобладающего колебания уменьшалась в 1.5–2 раза, период стал близок к

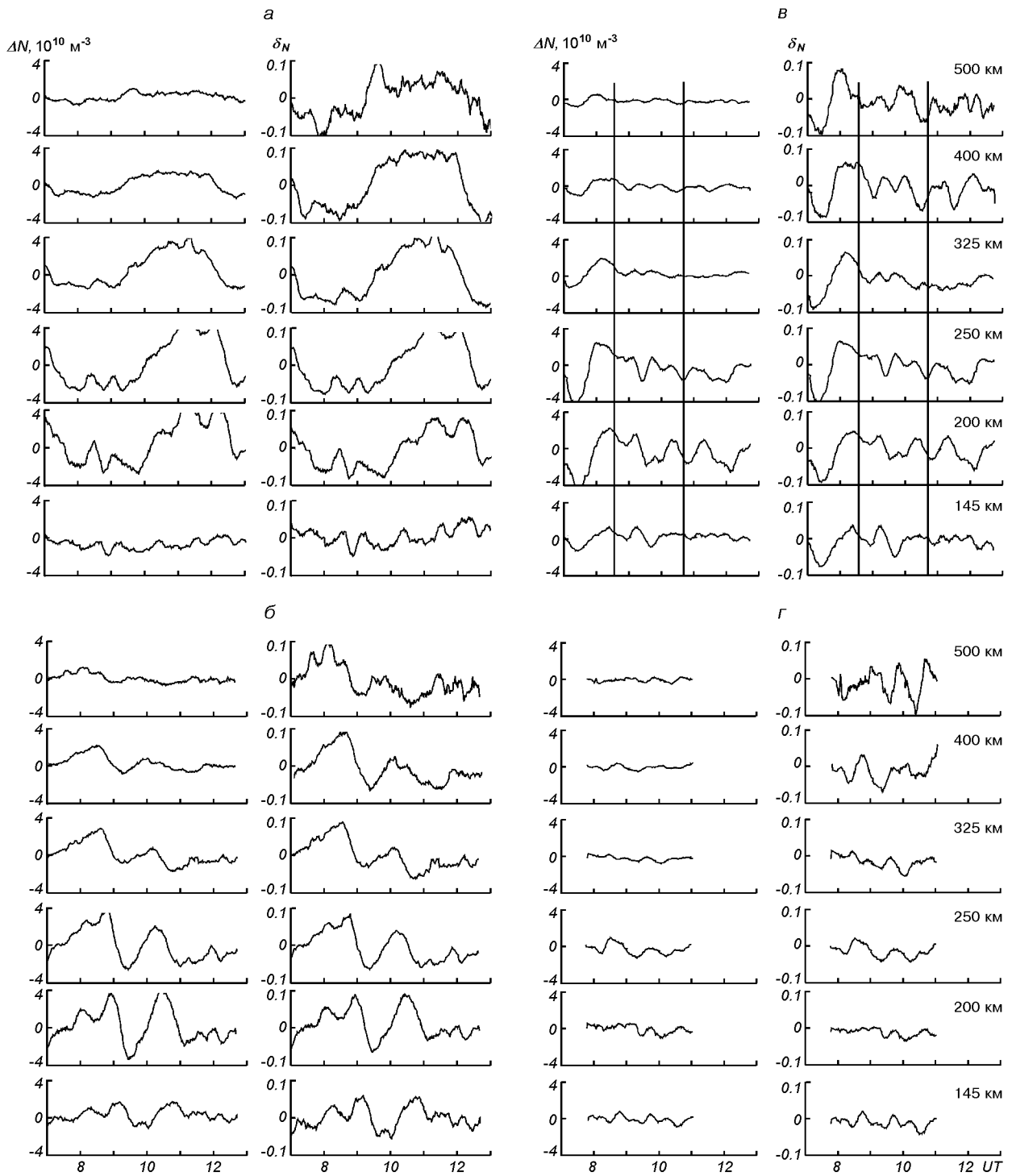


Рис. 14. Временные вариации амплитуд ΔN и относительных амплитуд δ_N ВВ концентрации электронов: *а*, *б* — в период, близкий к осеннему равноденствию 21 и 22 сентября 2005 г.; *в* — 3 октября 2005 г. (вертикальные линии — начало и окончание затмения Солнца); *г* — 4 октября 2005 г.

30—60 мин. Четко наблюдалось 1.5—2 колебания. После 12:00 характер ВВ снова изменился.

В фоновый день, 4 октября 2005 г., амплитуда ВВ в интервале времени с 08:00 до 11:00 изменялась слабо (рис. 14, з). Ее значение обычно не превышало 10^{10} м^{-3} .

В целом характеры волновых возмущений 3 октября и в контрольные дни отличались, что могло свидетельствовать о влиянии ЗС на волновую активность в атмосферно-ионосферной системе.

ВЫВОДЫ

Затмение Солнца 3 октября 2005 г. вблизи Харькова было частным. Функция покрытия диска Солнца не превышала 24 %, освещенность поверхности Земли и атмосферы уменьшилась не более чем в 1.3 раза. Несмотря на это, эффекты затмения достаточно уверенно наблюдались в приземной атмосфере, в ионосфере и, по-видимому, в геомагнитном поле. К ним относится следующее.

1. Показано, что затмение Солнца вызвало в атмосфере, ионосфере и геомагнитном поле ряд сложных динамических процессов, качественно напоминающих кратковременную (~ 2 ч) перестройку околоземной среды в вечерне-утреннее время.

2. После наступления главной фазы затмения зафиксировано уменьшение температуры воздуха в приземной атмосфере на 1—1.4 К, которое продолжалось около 40 мин.

3. Обнаружено уменьшение на 5—6 % концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы. Увеличение высоты этого слоя, по-видимому, не превышало нескольких километров.

4. Установлено, что затмение сопровождалось замедлением скорости падения концентрации электронов во времени на высотах 190—210 км и ее ускорением на высотах 290—680 км.

5. Обнаружены малоинерционные уменьшения температуры электронов и инерционные (с запаздыванием 25—5 мин на высотах 240—410 км соответственно) уменьшения температуры ионов. Величина эффекта постепенно увеличивалась с увеличением высоты. Уменьшения

T_e и T_i достигли соответственно 200 и 80 К (10 и 8 %) на высоте около 410 км.

6. Обнаружено, что в день затмения на высотах 360—470 км модуль направленной вниз вертикальной составляющей скорости переноса плазмы увеличился примерно на 20 м/с. В отличие от контрольных дней вблизи момента фазы максимального покрытия диска Солнца на всех высотах упомянутая составляющая скорости принимала отрицательные значения (как в ночное время).

7. Установлено, что затмение Солнца сопровождалось увеличением до двух раз концентрации ионов водорода на высотах 400—800 км и ее уменьшением в 7—10 раз на высотах 900—1200 км, что характерно для ночной ионосферы.

8. Показано, что затмение Солнца сопровождалось изменением волновой активности в ионосфере. Скорее всего, затмение привело к подавлению в ионосфере волнового возмущения с периодом около 120 мин и относительной амплитудой 0.05—0.10 и к генерации квазипериодического процесса с периодом 30—50 мин и относительной амплитудой 0.03—0.05.

9. Продемонстрировано, что эффекты затмения Солнца в геомагнитном поле наблюдались не так уверенно, как в приземной атмосфере или ионосфере. Возможно, что затмение вызвало некоторое увеличение уровня *H*- и *D*-компонентов вблизи момента наступления главной фазы покрытия диска Солнца. Эффект наблюдался в диапазоне периодов 20—1000 с, но сильнее всего был выражен в поддиапазоне 300—1000 с.

Авторы благодарят В. И. Тарана за интерес к работе, К. П. Гармаша и С. Г. Леуса за проведение измерений на магнитометре-флюксметре, А. Ф. Кононенко, Л. Я. Емельянова, И. Б. Склярова и Ю. В. Черняка — за наблюдения на радаре некогерентного рассеяния.

1. Акимов Л. А., Боговский В. К., Григоренко Е. И. и др. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // Геомагнетизм и аэронавигация.—2005.—45, № 4.—С. 526—551.
2. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И. и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи совре-

- менной радиоэлектроники.—2002.—№ 2.—С. 25—63.
3. Бойтман О. Н., Калихман А. Д., Тащилин А. В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 1. Моделирование эффектов затмения // Геомагнетизм и аэронаука.—1999.—39, № 6.—С. 45—51.
 4. Бойтман О. Н., Калихман А. Д., Тащилин А. В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 2. Данные наблюдений и сравнения с результатами моделирования // Геомагнетизм и аэронаука.—1999.—39, № 6.—С. 52—60.
 5. Борисов Б. Б., Егоров Д. А., Егоров Н. Е. и др. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. // Геомагнетизм и аэронаука.—2000.—40, № 3.—С. 94—103.
 6. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия.—2004.—9, № 1.—С. 5—28.
 7. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники.—2005.—№ 3.—С. 4—35.
 8. Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 163—180.
 9. Гокон А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 348—360.
 10. Колоколов Л. Е., Легенька А. Д., Пулинец С. А. Ионосферные эффекты, связанные с солнечным затмением 18 марта 1988 г. // Геомагнетизм и аэронаука.—1993.—33, № 1.—С. 49—57.
 11. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 361—370.
 12. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы.—2006.—10, № 10.—С. 39—49.
 13. Лысенко В. Н. Измерение вертикальной составляющей скорости дрейфа плазмы и кинетических температур в ионосфере // Геомагнетизм и аэронаука.—2001.—41, № 3.—С. 365—368.
 14. Таран В. И. Исследования ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронаука.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
 15. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 371—375.
 16. 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. Atmos. Solar-Terr. Phys.—2002.—64, N 18.—P. 1933—1941.
 17. Chimonas G. Internal Gravity-Wave Motions Induced in the Earth's Atmosphere by a Solar Eclipse // J. Geophys. Res.—1970.—75, N 28.—P. 5545—5551.
 18. Chimonas G., Hines C. O. Atmospheric Gravity Waves Induced by a Solar Eclipse // J. Geophys. Res.—1970.—75.—P. 875.
 19. Stubbe P. The F-region during an eclipse - A theoretical study // J. Atmos. and Terr. Phys.—1970.—32, N 6.—P. 1109—1116.

**TROPOSPHERIC-IONOSPHERIC EFFECTS
OF THE 3 OCTOBER 2005 PARTIAL SOLAR ECLIPSE
IN KHARKIV. I. OBSERVATIONS**

*V. P. Burmaka, V. N. Lysenko, M. V. Lyashenko,
L. F. Chernogor*

The effects in the troposphere, ionosphere and in the geomagnetic field that were observed during the 3 October 2005 partial (about 24 %) solar eclipse are presented. The measurements were carried out using instruments of observatories near Kharkiv. A decrease of 1 to 1.4 K in the tropospheric temperature, a decrease of 100 to 200 K in ion temperature and of 40 to 80 K in electron one in the 410—490 km altitude range were observed during the solar eclipse main phase. A decrease in the electron density was insignificant (about 5 %) and disguised by daily variations. The proton density showed a twofold increase in the 400—800 km altitude range and a decrease by a factor of seven to ten in the 900—1200 km altitude range. The magnitude of the plasma drift velocity vertical component increased by approximately 20 m/s. The solar eclipse was accompanied by the generation of quasi-periodic disturbances in the ionosphere and geomagnetic field.