

УДК 520.86:550.385.37: 550.388 И. Ф. ДОМНИН<sup>1</sup>, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>1</sup>, Л. Ф. ЧЕРНОГОР<sup>1, 2</sup><sup>1</sup>Институт ионосферы НАН и МОНМС Украины,  
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: Leonid.Ya.Emelyanov@gmail.com<sup>2</sup>Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

## ДИНАМИКА ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НАД ХАРЬКОВОМ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 4 ЯНВАРЯ 2011 Г.

*Приведены результаты наблюдений с помощью радара некогерентного рассеяния за динамическими процессами на высотах вблизи максимума ионизации области F и во внешней ионосфере, вызванными частным (с максимальным покрытием диаметра диска Солнца около 0.78) солнечным затмением 4 января 2011 г. вблизи г. Харькова. Показано, что затмение вызывало процессы перестройки ионосферы, подобные наступлению кратковременной ночи. Эксперимент был проведен зимой в условиях низкой солнечной активности.*

*Ключевые слова:* солнечное затмение, метод некогерентного рассеяния радиоволн, корреляционная функция, геокосмическая плазма, динамические процессы, скорость движения

### 1. Введение

Изучение динамических процессов в геокосмической плазме является одной из важных задач космической радиофизики и геофизики. Эти процессы в значительной степени определяют структуру области F ионосферы, существенно влияют на параметры ионосферного канала распространения радиоволн и, как следствие, на функционирование систем радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиотелеметрии и т. д.

Качественно новое понимание наблюдаемых процессов во всех геосферах и в околоземной космической среде в частности, а также построение физико-математических моделей этих процессов невозможно без представлений о том, что Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ) является единой системой [1–3]. Существенно, что эта система – открытая динамическая и нелинейная. Между указанными подсистемами существуют прямые и обратные, положительные и отрицательные связи. Воздействие на систему ЗАИМ высокоэнергетических источников различной физической природы приводит к перестройке характера взаимодействия подсистем.

Солнечное затмение (СЗ) также является высокоэнергетическим источником. Оно приводит к существенному возмущению околоземной среды и изменению взаимодействий между подсистемами.

© И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов, Л. Ф. Черногор, 2012

Исследованию реакции ионосферы на воздействия СЗ посвящено значительное количество работ. К ним относятся, например, [4–6]. В этих работах использовались методы наблюдений, дающие ограниченный объем информации о процессах, вызванных СЗ. Более полную информацию в широком диапазоне высот получают при помощи радиофизического метода некогерентного рассеяния (НР) радиоволн [7–16]. Этот метод позволяет получить наиболее полные сведения о параметрах плазмы и ее движении, а значит, открывает возможности в изучении динамических процессов и взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ, и, в частности, взаимодействия между ионосферой и плазмосферой.

Изучение вариаций скорости движения и других параметров ионосферной плазмы во время относительно редкого природного явления – СЗ – является важной и актуальной задачей, позволяющей усовершенствовать региональные модели ионосферы.

Эксперимент по исследованию воздействия СЗ на ионосферу 4 января 2011 г. был проведен в условиях низкой солнечной активности, т. е. при пониженных значениях концентрации электронов (и, как следствие, отношения сигнал/шум), а также характерно малой для зимы толщины области F.

Цель настоящей работы – изложение методики измерения вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы и представление результатов наблюдения за динамикой плаз-

мы в области F ионосферы в период частного СЗ вблизи г. Харькова 4 января 2011 г. в условиях низкой солнечной активности.

Для сопоставления приводятся результаты наблюдения в контрольные дни 22 декабря 2010 г. и 5 января 2011 г.

## 2. Общие сведения о солнечном затмении

В месте проведения измерений (вблизи г. Харькова) СЗ началось в 07:29:39, а закончилось в 10:28:36, главная фаза имела место в 08:58:30 (здесь и далее время UT). Покрытие диаметра диска Солнца достигало 0.781. При этом максимальная затененная площадь диска составляла около 70.8 %.

## 3. Состояние космической погоды

Анализ состояния космической погоды проводился по временным вариациям плотности, скорости, температуры и давления солнечного ветра,  $B_y$ - и  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля, а также индексов магнитной активности ( $A_p$ ,  $K_p$  и  $D_{st}$ ).

С 1 по 5 января значения плотности, скорости, температуры и давления солнечного ветра не превышали соответственно  $1.5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$ , 420 км/с,  $1.3 \cdot 10^5 \text{ К}$  и 4 нПа. Компонента межпланетного магнитного поля  $B_z$  изменялась в пределах  $\pm 6$  нТл. Малозначительными были флуктуации уровня компоненты  $B_y$  (около  $\pm 6$  нТл). Затмению предшествовало незначительное магнитное возмущение (индекс  $K_p$  изменялся от 0 до 3). Значения индекса  $D_{st}$  изменялись в пределах  $\pm(10 \div 15)$  нТл. Индекс магнитной активности в день СЗ 4 января  $A_p = 4$ , а в контрольный день 5 января  $A_p = 2$ .

День 22 декабря 2010 г., также выбранный в качестве контрольного дня, был исключительно спокойным. Значения плотности, скорости, температуры и давления солнечного ветра не превышали соответственно  $3 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ , 340 км/с,  $3 \cdot 10^4 \text{ К}$  и 0.4 нПа. Компонента  $B_z$  варьировалась в пределах  $\sim(1 \div 2)$  нТл. Индекс  $D_{st}$  изменялся от  $\sim 2$  до  $\sim 10$  нТл. Значения индекса  $K_p$  равнялись 0 и 0<sup>+</sup>. Индекс  $A_p = 0$ .

Таким образом, день СЗ 4 января 2011 г. и контрольные дни были спокойными. Это обстоятельство облегчало выделение возмущений, связанных с затмением.

Индекс солнечной активности  $F_{10.7}$  22 декабря, 4 и 5 января составлял 78, 91 и 88 соответственно.

## 4. Средства и методы

*Радар НР.* Радар расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36' с. ш., 36°18' в. д.). Основные параметры радара следующие: несущая частота – около 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны – 100 м, эффективная площадь антенны – около 3700 м<sup>2</sup>, коэффициент усиления антенны – около 10<sup>4</sup>, ширина основного лепестка диаграммы направленности около 1°, импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства равны 2 МВт и 100 кВт соответственно, частота следования зондирующих радиоимпульсов составляет 24.4 Гц. Шумовая температура радиоприемного устройства (РПрУ) равна 120 К, а полоса пропускания наиболее узкополосного тракта РПрУ – фильтра нижних частот – составляет 5.5 ÷ 9.5 кГц. Эффективная шумовая температура системы 470 ÷ 980 К.

Погрешность определения параметров ионосферы (концентрации электронов, температур ионов и электронов) обычно не превышает 5 ÷ 10 % в дневное время и 15 ÷ 30 % в ночное время.

В измерениях зондирование ионосферы осуществлялось составным радиоимпульсным двухчастотным сигналом, один из элементов которого имел длительность 650 мкс и несущую частоту  $f_0 = 158$  МГц, а второй – длительность 130 мкс и частоту  $f_1 = (158 + 0.1)$  МГц. В РПрУ производилась частотная селекция некогерентно рассеянных эхо-сигналов и выделение квадратных сигналов для каждого из элементов с помощью синхронного детектирования. Для выделения эхо-сигналов от первого элемента использовались фильтры нижних частот с шириной полосы пропускания по половинной мощности  $\Delta F = 9.5$  кГц, наиболее приемлемые для измерения ионосферных параметров внешней ионосферы при наличии в ее составе легких ионов. Для выделения сигналов от второго элемента (с несущей частотой  $f_1$ ) использовались фильтры с полосой пропускания  $\Delta F = 6.0$  кГц, достаточной для приема без искажения спектра НР сигнала нижней части области F ионосферы. В результате приема и обработки рассеянного

ионосферой сигнала от первого элемента определялись электронная концентрация  $N_e$ , температуры ионов  $T_i$  и электронов  $T_e$ , вертикальная составляющая скорости движения плазмы  $V_z$  и ионный состав для ряда значений высот вблизи высоты максимума ионизации и выше с разрешением по высоте около 120 км. Отклик от второго элемента использовался для определения высотного профиля мощности НР сигнала в диапазоне высот 100 ÷ 550 км с разрешением по высоте 20 км.

**Ионозонд.** Ионозонд “БАЗИС” предназначен для общего контроля состояния ионосферы и калибровки мощности НР сигнала при определении электронной концентрации методом НР. Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории рядом с радаром НР. Основные параметры ионозонда следующие: импульсная мощность – 15 кВт, длительность радиоимпульсов – 100 мкс, диапазон частот – 0.3 ÷ 20 МГц, диапазон исследуемых высот – 100 ÷ 400 км.

Погрешность определения критической частоты слоя F2 не хуже 0.05 МГц.

**Определение скорости движения плазмы совместно с другими ионосферными параметрами.** Вертикальная составляющая скорости движения ионосферной плазмы  $V_z$  определяется одновременно для ряда высот ионосферы по измеренным квадратурным составляющим комплексной корреляционной функции (КФ) НР сигнала согласно алгоритму [15, 17]

$$V_z(h_j) = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^n \left\{ \arctg \left[ \frac{r_{Im}(t_j, \tau_k)}{r_{Re}(t_j, \tau_k)} \right] \right\} r^2(t_j, \tau_k) \tau_k}{\sum_{k=1}^n r^2(t_j, \tau_k) \tau_k^2}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны радара;  $n$  – количество используемых значений КФ с различными сдвигами  $\tau_k$ ;  $r_{Im}(t_j, \tau_k)$  и  $r_{Re}(t_j, \tau_k)$  – квадратурные составляющие нормированной КФ для времени задержки сигнала  $t_j$ , соответствующей высоте  $h_j$ ,  $h_j = ct_j/2$ ;  $\tau_k = k\Delta\tau$ ,  $k$  – номер дискретного значения аргумента,  $\Delta\tau$  – шаг сдвига сигналов при расчете КФ;  $r^2(t_j, \tau_k) = r_{Re}^2(t_j, \tau_k) + r_{Im}^2(t_j, \tau_k)$ . В описываемых измерениях  $\Delta\tau = 61$  мкс,  $k = 1 \div 9$ .

Отметим, что в выражении (1) величины  $r_{Im}(t_j, \tau_k)$  и  $r_{Re}(t_j, \tau_k)$  – оценки коэффициентов

корреляции, получаемые в результате обработки случайных сигналов. Алгоритм (1) предполагает учет веса значений огибающей КФ сигнала  $r(t_j, \tau_k)$  и величины сдвига  $\tau_k$  (дискретного значения аргумента).

Одновременно со скоростью движения плазмы определяются другие параметры ионосферы. Температуры ионов  $T_i(h_j)$  и электронов  $T_e(h_j)$ , а также относительные концентрации ионов находятся по огибающей КФ НР сигнала  $r(t_j, \tau_k)$  путем сравнения ее с библиотекой теоретических КФ по методу наименьших квадратов. Электронная концентрация  $N_e$  определяется следующим образом [18]. Вычисляется нормированный к максимуму высотный профиль  $N_e(h_j)_{norm} = \left\{ q(h_j) h_j^2 \left[ 1 + T_e(h_j)/T_i(h_j) \right] \right\}_{norm}$ , где  $q(h_j)$  – отношение мощности сигнала, рассеянного на высотном интервале, соответствующем длительности зондирующего сигнала, с центром  $h_j$ , к мощности шума. Абсолютные значения  $N_e(h_j)$  (в метрах в минус третьей степени) определяются путем привязки нормированного профиля  $N_e(h_j)_{norm}$  в максимуме к измеренному ионозондом значению критической частоты  $f_oF2$  (в мегагерцах):  $N_e(h_j) = 1.24 \cdot 10^{10} N_e(h_j)_{norm} (f_oF2)^2$ .

Для вычисления квадратурных составляющих КФ используются измеренные взаимные и автокорреляционные функции НР сигналов, выделенных двумя квадратурными каналами РПРУ с помощью синхронного детектирования.

Первичная обработка в реальном масштабе времени включает в себя оценку мощности, авто- и взаимнокорреляционных функций выходных сигналов (смеси сигнала и шума) 1-го и 2-го квадратурных каналов приемника (входных сигналов коррелятора):

$$P_{1sn}(t_j) = R_{1sn}(t_j, 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{1,i}(t_j) u_{1,i}(t_j),$$

$$P_{2sn}(t_j) = R_{2sn}(t_j, 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{2,i}(t_j) u_{2,i}(t_j);$$

$$R_{1sn}(t_j, \tau_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{1,i}(t_j) u_{1,i}(t_j + \tau_k),$$

$$R_{2sn}(t_j, \tau_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{2,i}(t_j) u_{2,i}(t_j + \tau_k);$$

$$R_{12sn}(t_j, \tau_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{1,i}(t_j) u_{2,i}(t_j + \tau_k),$$

$$R_{21sn}(t_j, \tau_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{2,i}(t_j) u_{1,i}(t_j + \tau_k);$$

где  $u(t)$  – мгновенные значения напряжений выходного сигнала приемника;  $N$  – количество независимых выборок, используемых для расчета каждого отдельного значения КФ с аргументом  $\tau_k$ ;  $i$  – номер выборки (номер радиолокационной развертки). Индексы 1 и 2 обозначают канал приемника,  $s$  и  $n$  – сигнал и шум.

Квадратурные составляющие КФ выходного сигнала приемника (смеси сигнала и шума) выражаются формулами:

$$R_{\text{Re}sn}(t_j, \tau_k) = \frac{R_{1sn}(t_j, \tau_k) + R_{2sn}(t_j, \tau_k)}{2},$$

$$R_{\text{Im}sn}(t_j, \tau_k) = \frac{R_{12sn}(t_j, \tau_k) - R_{21sn}(t_j, \tau_k)}{2}.$$

В частном случае, когда определяется  $R_{12sn}(t_j, \tau_k)$  или  $R_{21sn}(t_j, \tau_k)$ , принимается во внимание, что  $R_{12sn}(t_j, \tau_k) \approx -R_{21sn}(t_j, \tau_k)$ , и используется следующее приближенное соотношение:

$$R_{\text{Im}sn}(t_j, \tau_k) \approx R_{12sn}(t_j, \tau_k) \approx -R_{21sn}(t_j, \tau_k).$$

Дальнейшая обработка включает в себя определение значений мощности и КФ НР сигнала для каждого дискретного времени запаздывания  $t_j$ , соответствующего высоте  $h_j$ , при фиксированных задержках  $\tau_k$  в виде разности оценок статистического параметра смеси сигнала и шума и соответствующего параметра шума, усредненного по ряду замеров в конце радиолокационной развертки, где уровень НР сигнала пренебрежимо мал:

$$P_1(t_j) = P_{1sn}(t_j) - \bar{P}_{1n},$$

$$P_2(t_j) = P_{2sn}(t_j) - \bar{P}_{2n},$$

$$P(t_j) = \frac{P_1(t_j) + P_2(t_j)}{2};$$

$$R_{\text{Re}}(t_j, \tau_k) = R_{\text{Re}sn}(t_j, \tau_k) - \bar{R}_{\text{Re}n}(t_j, \tau_k),$$

$$R_{\text{Im}}(t_j, \tau_k) = R_{\text{Im}sn}(t_j, \tau_k) - \bar{R}_{\text{Im}n}(t_j, \tau_k).$$

Далее производится коррекция результатов обработки и нормировка КФ:

$$r_{\text{Re}}(h_j, \tau_k) = r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k) = \frac{R_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)}{P(t_j)}, \quad (2)$$

$$r_{\text{Im}}(h_j, \tau_k) = r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k) = \frac{R_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)}{P(t_j)}. \quad (3)$$

Из (1)–(3) следует, что  $V_z$  можно вычислять независимо от определения других параметров ионосферы, используя ненормированные квадратурные составляющие КФ.

В результате первичной обработки в реальном масштабе времени для каждой высоты  $h_j$  определяются базовые оценки статистических характеристик НР сигнала при временном накоплении, равном 1 мин, а также высотные профили сечения рассеяния (в относительных единицах),  $T_i$ ,  $T_e$ ,  $V_z$  для текущего контроля 1-минутных сеансов измерений.

Вторичная обработка включает в себя отбраковку данных, подверженных искажениям помехами, усреднение статистических характеристик НР сигнала по высоте (с учетом трапецеидального усреднения КФ НР сигнала, описанного в [19]) и по времени, коррекцию результатов измерений с учетом характеристик радара, нормирование КФ и, наконец, вычисление скорости  $V_z$  согласно выражению (1) и других параметров ионосферы.

При обработке данных измерений предварительно осуществляется селекция мощных импульсных помех. Наиболее часто такие помехи вызваны отражением зондирующего сигнала от космических аппаратов, космического мусора, метеороидов и т. п. Селекция такой помехи не представляет особой сложности, поскольку она легко проявляется на фоне шума из-за своей большой интенсивности при отражении от точечной цели (в отличие от слабого НР сигнала), ее длительность, равная длительности зондирующего радиосигнала, и КФ (спектр) известны, а продолжительность не превышает нескольких секунд.

Сложнее обстоит дело с помехами радиолокационных станций, но в настоящее время они проявляются относительно редко. С другой стороны, такие помехи не синхронны с периодом посылок и присутствуют на всем протяжении радиолокационной развертки (т. е. как на участках, по которым определяются параметры смеси

НР сигнала и шума, так и на участках, по которым определяются параметры шума). Поэтому при используемом алгоритме обработки погрешность определения  $V_z$  и других параметров ионосферы, вызванная помехами радиолокационных станций, значительно ниже случайной погрешности, обусловленной наличием шумов.

Таким образом, при обработке анализировались данные (мощности и КФ сигналов) на всех участках радиолокационной развертки для каждого 1-минутного сеанса измерений. Данные, искаженные помехой, исключались и не участвовали в дальнейшем усреднении по нескольким сеансам.

Оптимальный интервал усреднения данных по времени для определения  $V_z$  устанавливается в зависимости от условий измерений (гелиогеофизической обстановки, уровня помех) и на основе опыта обычно выбирается равным 15 мин. При необходимости в дальнейшем осуществляется дополнительное сглаживание данных 15-минутных сеансов скользящим окном (для  $V_z$  при средней и низкой солнечной активности) шириной 45, 75 или 105 мин.

В качестве примера на рис. 1 приведены квадратурные составляющие  $r_{Re}(\tau)$  и  $r_{Im}(\tau)$  нормированной КФ НР сигнала, принятого с высоты 363 км (рис. 1, а) и 253 км (рис. 1, б), до начала, в момент главной фазы и после окончания СЗ 4 января и в те же часы в контрольный день 5 января 2011 г, полученные при 15-минутном накоплении. Отметим, что для наглядности из-за малости  $r_{Im}(\tau)$  масштабы осей ординат для  $r_{Re}(\tau)$  и  $r_{Im}(\tau)$  на рис. 1 отличаются в 10 раз. Видно, что действительная составляющая КФ  $r_{Re}(\tau)$ , характеризующая главным образом температуры  $T_i$  и  $T_e$ , а также ионный состав, имеет незначительно различающиеся значения в момент главной фазы СЗ и моменты до и после затмения (в равной степени для обеих высот). В контрольный день в эти же часы подобные отличия не наблюдались. Мнимая составляющая  $r_{Im}(\tau)$  КФ НР сигнала, принятого с большей высоты (363 км) претерпела значительные (см. рис. 1, а) изменения во время СЗ 4 января, а  $r_{Im}(\tau)$  сигнала, принятого с высоты 253 км, а также с обеих высот в контрольный день, изменилась существенно (см. рис. 1, а и б).

Среднеквадратическая погрешность  $\sigma_V$  измерения скорости  $V_z$  зависит главным образом от

отношения сигнал/шум  $q$  и временного интервала накопления данных. При 15-минутном накоплении она составляет от 2 м/с (для высот вблизи максимума ионизации) до 20 м/с при отношении сигнал/шум около 0.2. При  $q < q_{\min} = 0.1$  оценка  $V_z$  становится нецелесообразной.

## 5. Результаты наблюдений

*Вариации вертикальной составляющей скорости переноса плазмы.* На рис. 2 приведены временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы  $V_z$  в день затмения 4 января и в контрольные дни 5 января 2011 г. и 22 декабря 2010 г. Показаны также доверительные интервалы ( $\pm\sigma_V$ ). Отрицательным значениям  $V_z$  соответствует нисходящее движение плазмы. Видно, что погрешности минимальны на высотах 198 и 253 км, близких к высоте максимума ионизации. С увеличением высоты случайная погрешность возрастает в связи со снижением отношения сигнал/шум согласно уравнению радиолокации.

Во время СЗ наблюдалось увеличение абсолютных значений скорости нисходящего ( $V_z < 0$ ) движения ионосферной плазмы с последующим их восстановлением (рис. 2, а). Выявлена слабая асимметрия изменения скорости относительно главной фазы затмения. Максимальное изменение скорости относительно среднего значения  $V_z$  в начале и конце СЗ наблюдалось около 09:15, т. е. приблизительно через 15 мин после максимального покрытия Солнца, и составляло 11, 19, 41 и 62 м/с на высотах 253, 308, 363 и 418 км соответственно. Наибольшее отклонение значений скорости во время СЗ 4 января от значений, имевших место в такое же время в контрольный день 5 января, наблюдалось также около 09:15 и составляло 10, 19, 28 и 36 м/с на высотах 253, 308, 363 и 418 км соответственно.

В контрольные дни 22 декабря 2010 г. и 5 января 2011 г. в интервале времени с 07:00 до 10:00 также отмечалось изменение  $V_z$ , но его характер, положение на временной оси и амплитуда значительно отличались от вариаций  $V_z$  4 января (см. рис. 2, а и б).

Абсолютные значения скорости после затмения меньше абсолютных значений  $V_z$  в это же время в контрольные дни. Видимо, это связано с последствиями СЗ, которые, в свою очередь,

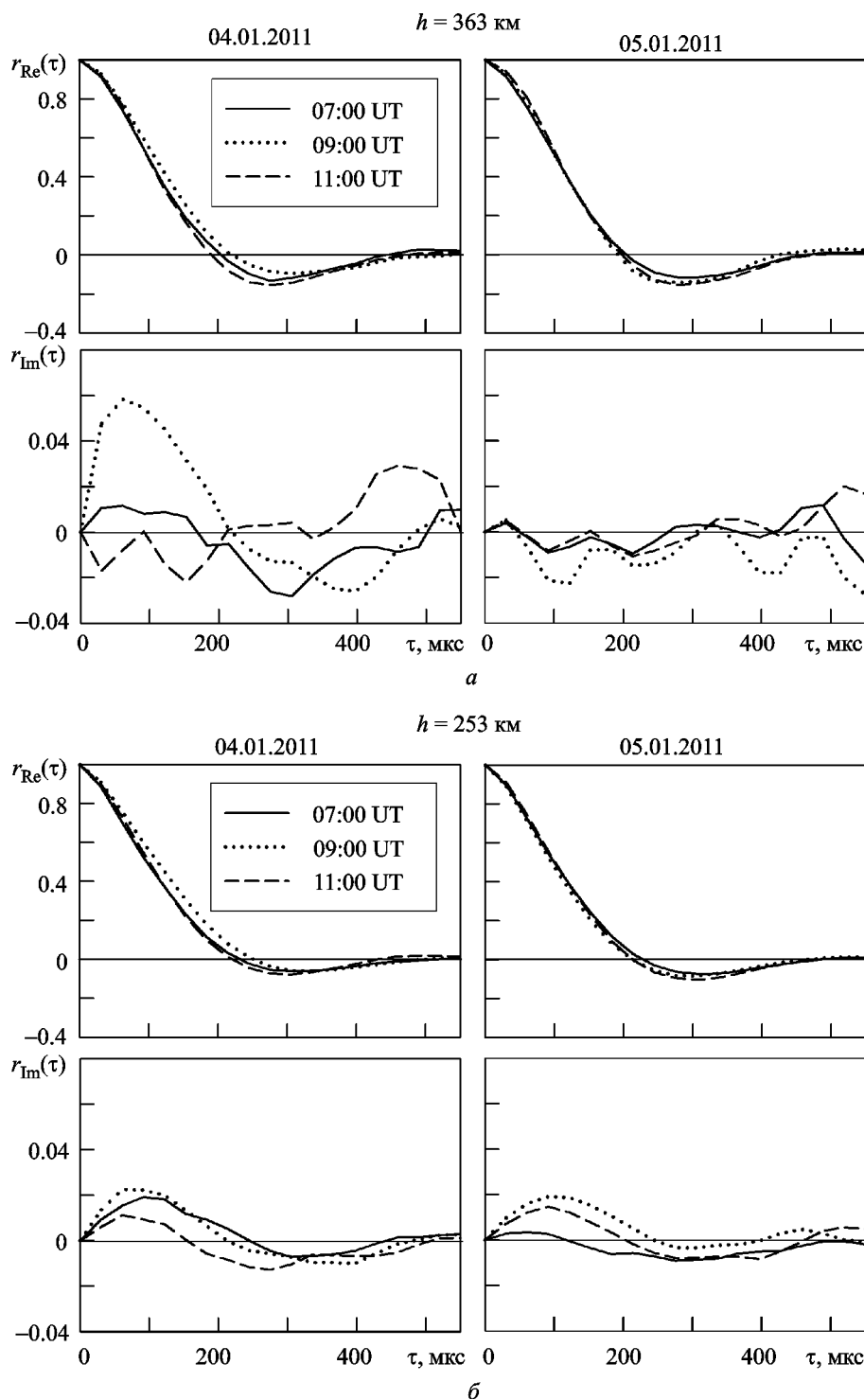
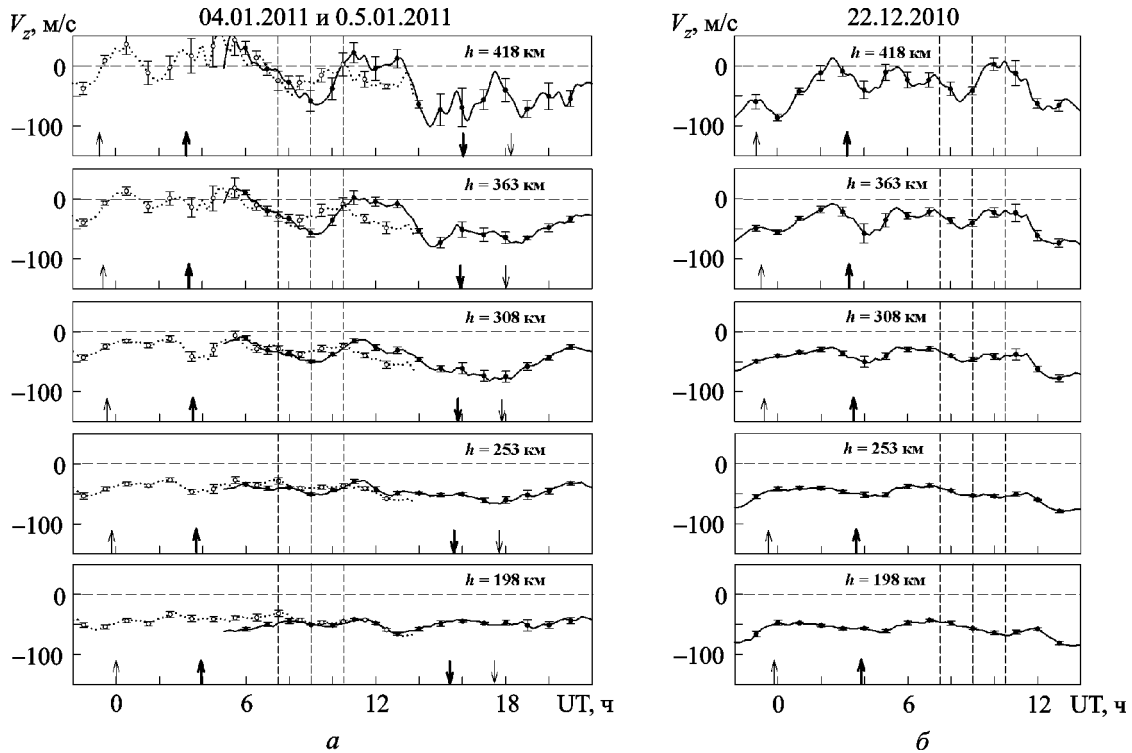


Рис. 1. Действительная  $r_{Re}(\tau)$  и мнимая  $r_{Im}(\tau)$  составляющие КФ НР сигнала, принятого с высот 363 км (а) и 253 км (б), до начала, в момент главной фазы и после завершения СЗ 4 января и в те же часы в контрольный день 5 января 2011 г.

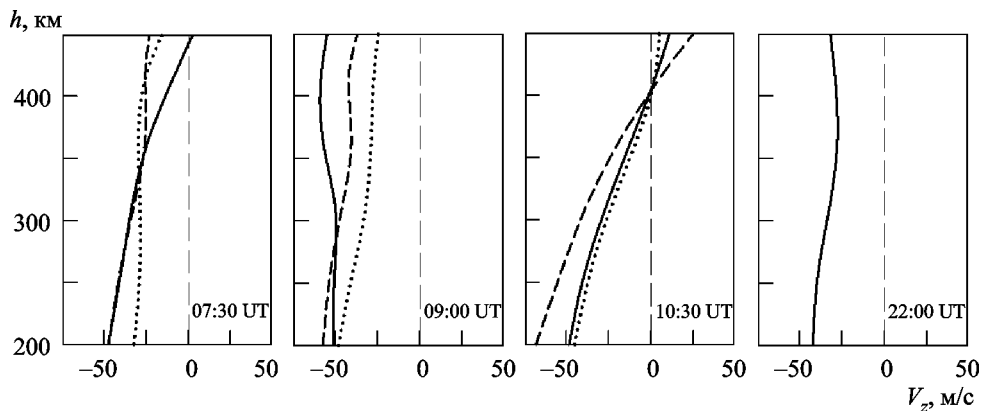
обусловлены изменением взаимодействия между подсистемами в системе ЗАИМ.

На рис. 3 представлены высотные профили скорости  $V_z(h)$  в характерные моменты времени:

в начале, в главной фазе, по окончании СЗ 4 января, – и (для сравнения) в соответствующие моменты времени 22 декабря 2010 г. и 5 января 2011 г., а также в 22:00 ночью 4 января (панель



**Рис. 2.** Временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы  $V_z$  на фиксированных высотах (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин): *а* – в день затмения 4 января (сплошные линии) и контрольный день 5 января (точки) 2011 г.; *б* – в контрольный день 22 декабря 2010 г. Жирными стрелками обозначены моменты восхода и захода Солнца на соответствующих высотах в Харькове, а тонкими – в магнитосопряженной точке. Вертикальные пунктирные линии здесь и на последующих рисунках обозначают моменты, соответствующие началу, главной фазе и окончанию СЗ



**Рис. 3.** Высотные профили вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы  $V_z$  в характерные моменты времени: в начале, в главной фазе, после окончания солнечного затмения, – и в 22:00 ночью 4 января 2011 г. (сплошные линии), а также в соответствующие моменты в контрольные дни 5 января 2011 г. (точки) и 22 декабря 2010 г. (пунктир)

справа). Из рисунка видно, что профиль  $V_z(h)$  вблизи главной фазы СЗ был подобен ночному профилю (на всех высотах  $V_z < 0$ ), значительно отличался от соответствующего по времени профиля  $V_z(h)$  5 января и в меньшей степени от

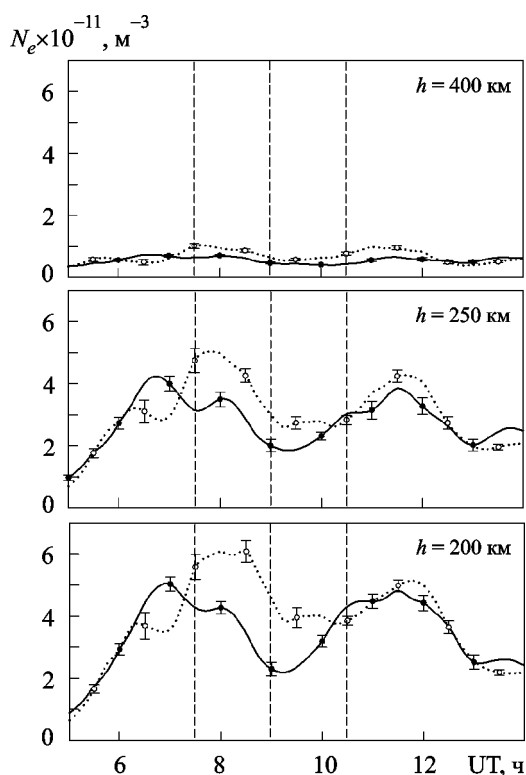
профиля  $V_z(h)$  22 декабря. В момент, отвечающий окончанию СЗ, профили  $V_z(h)$  4 и 5 января близки между собой, а по характеру подобны профилю 22 декабря. Высотные вариации  $V_z$  в это время типичны для дневной ионосферы:

на высотах  $h < 400$  км плазма движется вниз ( $V_z < 0$ ), а на высотах  $h > 400$  км – вверх ( $V_z > 0$ ), – что свидетельствует о достижении (после СЗ 4 января и прохождения утреннего терминатора для всех 3-х дней) характерного для этого времени состояния ионосферы.

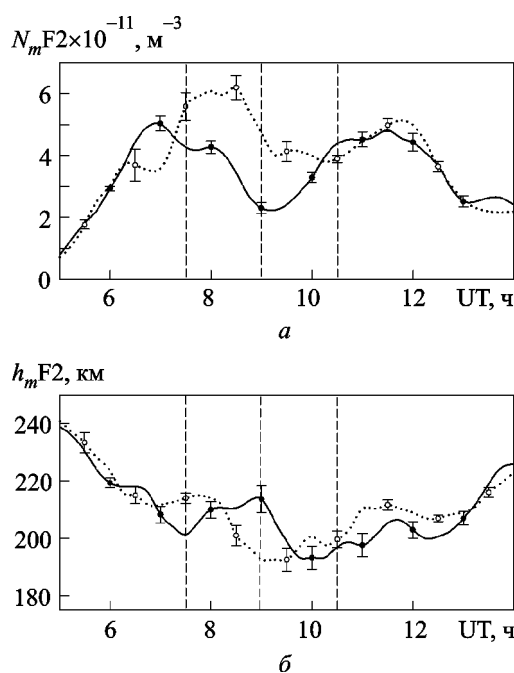
**Вариации концентрации электронов.** На рис. 4 представлены результаты измерения концентрации электронов  $N_e$  на 3-х высотах в день СЗ и в контрольный день 5 января 2011 г. Во время СЗ концентрация электронов  $N_e$  на рассматриваемых высотах, 200 и 250 км, вначале уменьшалась, достигнув минимума вблизи главной фазы СЗ (приблизительно через 15 мин после момента максимального покрытия диска Солнца), а затем увеличивалась до значений (в 10:30), близких к значениям  $N_e$ , наблюдавшимся до СЗ. На разных высотах величина изменения  $N_e$  различна. Максимальное изменение  $N_e$  (по отношению к значению  $N_e$  в 7:30, т. е. в момент начала СЗ) составило  $2.1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  на высоте 200 км и  $1.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  на высоте 250 км, что соответствует относительному изменению концентрации

электронов на этих высотах 49 и 41 %. Временные вариации  $N_e$  на рассматриваемых высотах имеют сходный характер. Симметрия вариаций  $N_e$  относительно главной фазы СЗ нарушается локальным возрастанием  $N_e$  в 08:00, которое приблизительно в такое же время наблюдается и в контрольный день. На высоте 400 км характер вариаций  $N_e$  несколько иной. С 07:30 (начало СЗ) до 09:15, когда на высотах 200 и 250 км наблюдался минимум, значение  $N_e$  уменьшилось на  $0.2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  (т. е. на 32 %), после 09:15 продолжало незначительно снижаться, достигнув минимума в 10:15, после чего начался постепенный рост  $N_e$  до достижения в 11:00 первоначальных значений. Максимальное изменение  $N_e$  на этой высоте за период СЗ составило 38 %.

Аналогичные вариации наблюдались и для концентрации электронов  $N_m F2$  в максимуме слоя F2 ионосферы (рис. 5, а). Качественно они сходны с вариациями  $N_e$  на высоте 200 км. Во время затмения минимальное значение концентрации  $N_m F2$  наблюдалось примерно через 15 мин после момента максимального покрытия диска Солнца. Это значение на 48 % меньше значения  $N_m F2$  в момент начала затмения. Отличие



**Рис. 4.** Временные вариации концентрации электронов  $N_e$  на фиксированных высотах в день затмения 4 января (сплошные линии) и в контрольный день 5 января 2011 г. (точки) при интервале усреднения 45 мин с шагом 15 мин



**Рис. 5.** Временные вариации концентрации электронов  $N_m F2$  в максимуме слоя F2 ионосферы (а) и высоты  $h_m F2$  максимума ионизации (б) в день затмения 4 января (сплошные линии) и в контрольный день 5 января 2011 г. (точки)



значений  $N_m F2$  в момент максимального покрытия Солнца 4 января от значений  $N_m F2$  в это же время в контрольный день 5 января составило 51 %, тогда как в моменты, соответствующие началу и окончанию СЗ, оно не превышало 23 и 13 % соответственно.

*Вариации высоты максимума ионизации области F ионосферы.* На рис. 5, б представлены вариации высоты максимума ионизации  $h_m F2$  в день СЗ и на следующий день. Во время затмения наблюдалось возрастание  $h_m F2$  на 13 км (с 201 км в 07:30 до 214 км в 09:00). После этого высота максимума снижалась, достигнув имевшего место в контрольный день значения 193 км около 10:00, т. е. на 30 мин раньше окончания СЗ. Во время фазы уменьшения покрытия диска Солнца и после окончания СЗ (с 09:30 до 12:50) наблюдались колебания  $h_m F2$  с периодом около 60 мин.

*Вариации плотности потока ионосферной плазмы.* Плотность потока плазмы является важной характеристикой для исследования динамики ионосферы и определяется по измеренным значениям концентрации электронов и скорости движения плазмы:  $\Pi = N_e V_z$ . Временные вариации плотности потока в день СЗ и контрольный день представлены на рис. 6. Во время СЗ на малых высотах области F ионосферы (около 200 км) абсолютная величина плотности нисходящего потока ( $\Pi < 0$ ) заметно уменьшилась от  $2.1 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в 07:30 до  $1.1 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , достигнув (аналогично  $N_e$ ) минимума в 09:15, а затем возросла до величины  $2.1 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в 10:30. На высоте 250 км вариации плотности потока по характеру сходны с вариациями на высоте 200 км, но ее абсолютные значения меньше. На высотах  $h \geq 450$  км во время СЗ плотность потока изменяла знак (до начала и после окончания СЗ поток был направлен вверх, во время СЗ направление потока изменилось на нисходящее). Значения  $\Pi$  на высоте 400 км составляли  $-0.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в 07:30,  $-2.8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в 09:15 и  $0.16 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в 10:30. Наибольшее отклонение плотности потока от значений, имевших место в начале (07:30) и в конце (10:30) СЗ, также наблюдалось в 09:15, т. е. через 15 мин после наступления главной фазы СЗ. Вариации плотности потока плазмы во время СЗ и в такое же время в контрольный день 5 января отличались.

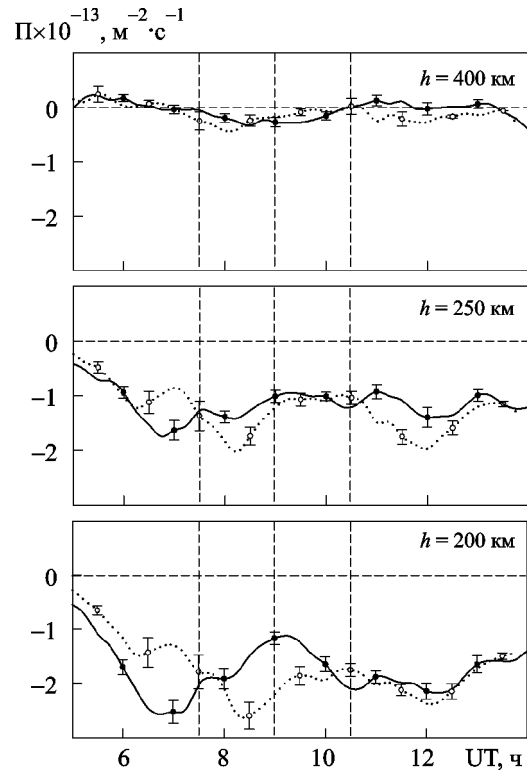


Рис. 6. Временные вариации плотности потока плазмы  $\Pi$  на фиксированных высотах в день затмения 4 января (сплошные линии) и в контрольный день 5 января 2011 г. (точки)

## 6. Обсуждение

Наиболее сложным для измерения параметром ионосферы в методе НР является скорость движения плазмы. Это связано с необходимостью регистрировать доплеровские сдвиги центральной частоты спектра НР сигнала, значения которых на 2÷3 порядка меньше ширины его спектра и на 8 порядков ниже значения несущей частоты радара. Кроме того, сложность заключается и в том, что анализируемый НР сигнал является случайным процессом, принимается на фоне космических и аппаратурных шумов, отношение сигнал/шум изменяется с высотой и для достаточно больших высот имеет значения меньше  $q_{\min} = 0.1$ .

Достигнутая с помощью радара Института ионосферы точность измерения скорости движения и других параметров ионосферной плазмы дает возможность наблюдать динамику ионосферы в возмущенном состоянии.

Анализ ионосферных измерений в день СЗ 4 января, а также в контрольные дни 22 декабря 2010 г. и 5 января 2011 г. показал, что в условиях

низкой солнечной активности зимой, когда слой F2 ионосферы является достаточно тонким, среднеквадратическая погрешность  $\sigma_V$  измерения скорости  $V_z$  при 15-минутном накоплении статистических параметров НР сигнала составляла от 3 м/с для высот вблизи максимума ионизации до 35 м/с для высот около 400 км, где величина концентрации электронов  $N_e$  меньше концентрации  $N_mF2$  в максимуме слоя F2 приблизительно в 6 раз. Отметим, что значения  $N_mF2$  в условиях эксперимента были в 3÷7 раз ниже значений  $N_mF2$ , регистрировавшихся в случае высокой активности Солнца [20, 21]. Например, 13 декабря 2000 г. (высокая солнечная активность) в 09:00  $N_mF2 \approx 1.7 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , тогда как 4 января 2011 г. в такое же время (главная фаза СЗ)  $N_mF2 \approx 2.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  (в 7.4 раза меньше), а в контрольный день 5 января 2011 г.  $N_mF2 \approx 4.7 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  (в 3.6 раза меньше). В результате предварительного анализа было подобрано подходящее для исследования вариаций  $V_z$  во время СЗ временное окно длительностью 75 мин, при котором погрешность  $\sigma_V$  составляла от 1 м/с (для высот вблизи  $h_mF2$ ) до 16 м/с (для высот около 400 км). Для остальных параметров было выбрано 45-минутное окно. Дело в том, что решение обратной радиофизической задачи при восстановлении значений  $V_z$  является менее устойчивым, чем решение задачи при определении значений концентрации электронов, температур электронов и ионов.

Уменьшение интенсивности солнечного излучения в течение СЗ вызвало изменение баланса между процессами ионизации, потерь и переноса заряженных частиц в ионосфере, который для слоя F2 ионосферы, где основными компонентами являются ионы атомарного кислорода  $O^+$ , описывается следующим уравнением непрерывности [22]:

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = q - L - \frac{\partial(N_e V_z)}{\partial h},$$

где  $q$  – скорость ионообразования ионов  $O^+$ ,  $L = \beta N_e$  – скорость потерь,  $\beta$  – линейный коэффициент рекомбинации ионов  $O^+$ .

Известно, что вертикальный перенос ионосферной плазмы происходит под влиянием трех основных процессов: амбиполярной диффузии, нейтрального ветра и дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях [23]:

$$V_z = (V_{d\parallel})_z + (V_{n\parallel})_z + (V_{\perp})_z,$$

где  $(V_{d\parallel})_z$  – вертикальная составляющая скорости движения плазмы, обусловленного амбиполярной диффузией, вдоль силовых линий геомагнитного поля;  $(V_{n\parallel})_z$  – вертикальная составляющая скорости ветрового увлечения заряженных частиц;  $(V_{\perp})_z$  – вертикальная составляющая скорости увлечения частиц электромагнитным дрейфом. Для среднеширотной области F последнее слагаемое пренебрежительно мало в условиях невозмущенной ионосферы [24, 25].

Качественная картина вариаций вертикальной составляющей скорости  $V_z$  подобна картине в более ранних наблюдениях за  $V_z$  во время СЗ [8–16]. Но есть и некоторые отличия, которые можно объяснить тем, что в данном случае ионосфера к началу СЗ не успела перестроиться к дневным условиям. Так, в наблюдениях [8–16] по мере покрытия диска Солнца на высотах больших 400÷500 км, где до начала СЗ плазма поднималась вверх ( $V_z > 0$ ), скорость плазмы постепенно уменьшалась и становилась отрицательной. Наибольшие по модулю значения  $V_z$  наблюдались вблизи главной фазы СЗ. После этого скорость постепенно увеличивалась (изменялась в сторону положительных значений) и достигала своего дневного значения, равного 30÷50 м/с. В данном случае на рассматриваемых высотах характер вариаций  $V_z$  во время СЗ такой же, как в предыдущих экспериментах на высотах ниже 400÷500 км: скорость, не изменяя знака ( $V_z < 0$ ), сначала возрастала по модулю, а затем по мере увеличения освещенности возвращалась к ожидаемому (наблюдающемуся в отсутствие затмения) значению. Иначе говоря, затмение сначала вызвало переходные процессы, подобные тем, которые имеют место в вечернее время, а затем процессы, свойственные утреннему времени.

Отмеченные вариации  $V_z$  в контрольные дни 22 декабря 2010 г. и 5 января 2011 г. в интервале времени с 07:00 до 10:00 объясняются тем, что к моменту времени, соответствующему началу СЗ, ионосфера еще не успела перестроиться к дневным условиям (см. рис. 2). Именно по этой причине прослеживается некоторое нарушение симметрии вариаций  $V_z$  относительно главной фазы затмения (см. рис. 2, а), чего не отмечалось в предыдущих наблюдениях за СЗ в условиях квазистационарного состояния ионосферы (см., напри-

мер, [8, 9, 14, 15]). (Еще в большей степени симметрия вариаций  $V_z$  была нарушена во время утренних наблюдений за СЗ 31 мая 2003 г., когда затмение развивалось в период восхода Солнца на фоне восстановительной фазы сверхсильной магнитной бури [10].) Отметим, что в момент, соответствующий окончанию СЗ, профили  $V_z(h)$  в рассматриваемые дни были по характеру близки между собой и типичны для дневной ионосферы:  $V_z < 0$  на высотах  $h < 400$  км и  $V_z > 0$  на высотах  $h > 400$  км. В целом вариации  $V_z$  во время СЗ объясняются изменением ионосферно-протоносферного взаимодействия, вызванным затмением, а также увеличивающейся с ростом высоты ролью диффузии плазмы.

Уменьшение концентрации электронов во время СЗ компенсировалось увеличением потока частиц из плазмосферы в ионосферу. Поступление плазмы из плазмосферы за счет амбиполярной диффузии восполняло потери ионов  $O^+$  на высотах слоя F2, способствуя восстановлению диффузионного равновесия в плазме [23]. Поэтому вариации  $N_e$  на различных высотах, а также вариации  $N_m F2$  и  $h_m F2$  во время СЗ зависели от соотношения скоростей потерь ионов  $O^+$  и поступления плазмы из плазмосферы в ионосферу. Поведение ионосферных параметров во время СЗ 4 января 2011 г. качественно согласуется с теоретическими представлениями [26].

Наибольшее падение концентрации электронов имело место в диапазоне высот 200 ÷ 250 км. На этих высотах фотохимические процессы играют существенную роль.

Что касается вертикальной составляющей скорости увлечения заряженных частиц термосферным ветром, СЗ не может в большой степени повлиять на нее, поскольку кратковременное и относительно локальное уменьшение освещенности Земли во время затмений несущественно изменяет глобальное распределение термосферных ветров [14]. В этом и есть отличие поведения ионосферы во время СЗ от ее поведения ночью, когда именно нейтральный ветер, направленный в ночное время от полюса к экватору, захватывая плазму, заставляет ее двигаться вверх, увозя из области повышенной рекомбинации и поддерживая тем самым ночной слой F. Отметим, что СЗ 4 января 2011 г. происходило в дневное время, когда под действием нейтрального ветра, направленного от экватора к полюсу,

плазма смещалась вниз, в область повышенной рекомбинации.

Особенность описываемых наблюдений заключается в том, что слой F2 в условиях, близких к зимнему солнцестоянию, был расположен низко (с максимумом вблизи 200 ÷ 215 км) и нижняя часть слоя попадала в область повышенной рекомбинации (область высот, где из-за значительного содержания ионов  $O_2^+$ ,  $NO^+$  и  $N_2^+$  скорость потерь ионов высока [22]). Поэтому во время СЗ по мере снижения уровня солнечного излучения и, как следствие, уменьшения скорости ионообразования, на малых (порядка 200 км) высотах потери ионов были более ощутимы по сравнению с потерями на больших высотах, где происходило пополнение ионов за счет переноса плазмы, а именно увеличения (по сравнению с обычным состоянием) скорости нисходящего движения плазмы, причем тем большего, чем больше высота (см. рис. 2 и 3). Поэтому во время СЗ по мере увеличения покрытия солнечного диска высота максимума ионизации  $h_m F2$  росла, а затем с увеличением освещенности уменьшалась. В контрольный день в это же время подобного изменения  $h_m F2$  не наблюдалось.

По мере затенения диска Солнца абсолютная величина плотности нисходящего потока  $\Pi$  на высоте 200 км уменьшилась заметно – на  $1.0 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  (значение  $\Pi$  изменилось от  $-2.1 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в начале СЗ до экстремума  $-1.1 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  примерно через 15 мин после наступления главной фазы СЗ, см. рис. 6), что объясняется превышением скорости потерь ионов над скоростью поступления плазмы на высотах вблизи и ниже максимума ионизации. К окончанию СЗ плотность потока приняла значение, близкое к первоначальному (в начале СЗ), что свидетельствует о восстановлении баланса между процессами в нижней части слоя F2. На больших высотах (внешняя ионосфера) во время СЗ плотность потока изменяла знак (сначала восходящее направление потока сменилось нисходящим, а затем к окончанию СЗ направление стало опять восходящим, а величина плотности потока приняла значение, близкое к исходному). На высоте 400 км наибольшее отклонение плотности потока (относительно значения в начале и конце СЗ) также наблюдалось через 15 мин после наступления главной фазы СЗ и составило около  $2.8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Такое поведение плотности по-

тока объясняется притоком новых частиц плазмы из протоносферы, восполняющим потери, которые вызваны в основном уменьшением интенсивности солнечного излучения.

Сравнение эффектов в ионосферной плазме, сопровождавших СЗ 11 августа 1999 г. (максимальное покрытие площади солнечного диска около 73 %), 31 мая 2003 г. (64 %), 29 марта 2006 г. (70 %), 1 августа 2008 г. (31 %) и 4 января 2011 г. (70.8 %) показало, что они качественно подобны. Затмение сначала вызывало переходные процессы, подобные тем, которые имеют место в вечернее время, а затем процессы, свойственные утреннему времени. Однако в вариациях параметров среды во время сходных по своим характеристикам СЗ наблюдались количественные различия. Эти различия были вызваны разным состоянием геокосмической среды на разных фазах цикла солнечной активности. В случае СЗ 4 января 2011 г. отличие состояло в том, что оно происходило зимой при относительно низкой солнечной активности, началось утром на фазе завершения перестройки ионосферы к дневным условиям и длилось около трех часов, тогда как предыдущие наблюдения за СЗ с помощью радара НР осуществлялись в основном в условиях квазистационарного (околополуденного) состояния ионосферы (за исключением СЗ 31 мая 2003 г.), а продолжительность затмений составляла примерно 2 ч.

Эти результаты подтверждают тезис о том, что каждое СЗ обладает своими индивидуальными особенностями.

## 7. Выводы

1. СЗ 4 января 2011 г. вызвало в геокосмосе ряд сложных динамических процессов, существенно повлиявших на взаимодействие подсистем в системе ЗАИМ. Вариации параметров среды качественно напоминали кратковременную перестройку среды к ночным условиям и обратно к дневным. Продолжительность вызванных СЗ вариаций параметров ионосферы составляла около 5 часов.

2. Выявлена асимметрия временных вариаций скорости  $V_z$ , концентрации электронов  $N_e$ , плотности потока плазмы  $\Pi$  и высоты максимума ионизации  $h_m F_2$  относительно момента наступления главной фазы СЗ, что объясняется тем, что СЗ происходило на фазе завершения утренней перестройки ионосферы к дневным условиям.

3. Во время главной фазы СЗ характер переноса ионосферной плазмы подобен ночному. СЗ привело к увеличению абсолютного значения скорости нисходящего движения плазмы.

4. Установлено, что максимальное изменение вертикальной составляющей скорости движения плазмы достигалось через 15 мин после наступления главной фазы затмения Солнца и увеличивалось с высотой. На высотах 253, 308, 363, 418 км наибольшее отклонение значений скорости во время затмения 4 января от значений, имевших место в такое же время в контрольный день 5 января, составляло 10, 19, 28, 36 м/с соответственно.

5. СЗ сопровождалось заметным уменьшением концентрации электронов, которое на разных высотах было различным. В частности, на высотах 200 и 250 км (вблизи максимума ионизации) максимальное относительное уменьшение концентрации электронов равнялось соответственно 49 и 41 %, а время запаздывания относительно момента главной фазы СЗ составляло около 15 мин, тогда как на высоте 400 км максимальное относительное уменьшение концентрации электронов составляло  $\approx 38\%$  и минимум  $N_e$  наблюдался в конце СЗ с запаздыванием 75 мин.

6. Обнаружено уменьшение концентрации электронов в максимуме слоя F2 на 48 % с запаздыванием около 15 мин по отношению к главной фазе СЗ и увеличение высоты максимума ионизации  $h_m F_2$  на 13 км относительно значения  $h_m F_2$  в начале и в конце СЗ и близкого к нему значения  $h_m F_2$  в такое же время в контрольный день.

7. Показано, что изменения плотности потока  $\Pi$  ионосферной плазмы во время СЗ на разных высотах имели значительные отличия: на высоте 200 км плотность потока изменялась от  $-2.1 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в 07:30 до  $-1.1 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  (экстремум) в 09:15, а затем до значения  $-2.1 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в 10:30. На высоте 400 км значения  $\Pi$  составляли  $-0.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в 07:30,  $-2.8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в 09:15 и  $0.16 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в 10:30. На высотах  $h \geq 450$  км во время СЗ поток изменял направление с восходящего на нисходящее, а затем наоборот, а экстремум наблюдался также через 15 мин после момента максимального покрытия диска Солнца. На высоте 250 км вариации плотности потока по характеру были сходны с вариациями  $\Pi$  на высоте 200 км, но абсолютные значения  $\Pi$  – меньше.

Авторы благодарны И. Б. Склярору, С. В. Черняеву и А. Ф. Кононенко за помощь в проведении измерений на радаре НР Института ионосферы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59–106.
2. Черногор Л. Ф. “Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера” как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 1) // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, № 12. – С. 655–697.
3. Черногор Л. Ф. “Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера” как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 2) // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198–231.
4. Акимов А. Л., Акимов Л. А., Черногор Л. Ф. Параметры турбулентных процессов в атмосфере, сопровождавших затмения Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, № 2. – С. 117–134.
5. Jones T. B., Wright D. M., Milner J., Yeoman T. K., Reid T., Senior A., and Martinez P. The detection of atmospheric waves produced by the total solar eclipse 11 August 1999 // J. Atmos. Sol.–Terr. Phys. – 2004. – Vol. 66, No. 5. – P. 363–374.
6. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, № 4. – С. 361–370.
7. Salah J. F., Oliver V. L., Foster J. C., and Holt J. M. Observations of the May 30, 1984, annual solar eclipse at Millstone Hill // J. Geophys. Res. – 1986. – Vol. 91, No. A2. – P. 1651–1660.
8. Taran V. I., Bogovsky V. K., Lysenko V. N., Grigorenko Ye. I., and Emelyanov L. Ya. Investigation of circumterrestrial space by means of incoherent scatter radar // Космічна наука і технологія, Space Plasma Physics (додаток до журналу). – 2001. – Т. 7, № 2. – С. 36–41.
9. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Тьринов О. Ф., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2002. – № 2. – С. 25–63.
10. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года // Космічна наука і технологія. – 2004. – Т. 10, № 1. – С. 12–25.
11. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 55–70.
12. 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. – 2007. – Т. 13, № 6. – С. 74–86.
13. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Результаты расчетов и обсуждение // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 57–64.
14. 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. – 2007. – № 3. – С. 38–53.
15. Дзюбанов Д. А., Емельянов Л. Я., Черногор Л. Ф. Динамика плазмы ионосферы над Харьковом в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 62–69.
16. Емельянов Л. Я., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 70–81.
17. Емельянов Л. Я. Оптимизация обработки некогерентно рассеянного сигнала для определения скорости дрейфа ионосферной плазмы // Вестн. нац. техн. ун-та “Харьковский политехнический институт”: Сб. научн. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. – № 4. – С. 81–84.
18. Емельянов Л. Я. Измерение высотных профилей электронной концентрации методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия. – 2002. – Т. 42, № 1. – С. 116–120.
19. Holt J. M., Rhoda D. A., Tetenbaum D., and van Eyken A. P. Optimal analysis of incoherent scatter radar data // Radio Sci. – 1992. – Vol. 27, No. 3. – P. 435–447.
20. Григоренко Е. И., Боговский В. К., Емельянов Л. Я., Кияшко Г. А., Пуляев В. А., Смагло Н. А. Вариации параметров ионосферы в периоды высокой и низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. – 2001. – Т. 41, № 2. – С. 199–203.
21. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период максимума солнечной активности // Космічна наука і технологія. – 2006. – Т. 12, № 4. – С. 56–70.
22. Иванов–Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 190 с.
23. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
24. Matsushita S. Dynamo currents, winds and electric fields // Radio Sci. – 1969. – Vol. 4. – P. 771–780.
25. Evans J. V. Ionospheric movements measured by incoherent scatter: A review // J. Atmos. Terr. Phys. – 1972. – Vol. 34. – P. 175–209.
26. 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 аэрномия. – 1999. – Т. 39, № 6. – С. 52–60.

*I. Ф. Домнін<sup>1</sup>, Л. Я. Ємельянов<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Інститут іоносфери НАН і МОНМС України,  
вул. Червонопрапорна, 16, м. Харків, 61002, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна,  
пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ДИНАМІКА ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ  
НАД ХАРКОВОМ ПІД ЧАС СОНЯЧНОГО  
ЗАТЕМНЕННЯ 4 СІЧНЯ 2011 Р.

Наведено результати спостережень за допомогою радара некогерентного розсіяння за динамічними процесами на висотах поблизу максимуму іонізації області F і в зовнішній іоносфері, викликаними частковим (з максимальним покриттям діаметра диска Сонця близько 0.78) сонячним затемненням 4 січня 2011 р. поблизу м. Харкова. Показано, що затемнення викликало процеси перебудови іоносфери, подібні настанню короткочасної ночі. Експеримент виконано взимку за умов низької сонячної активності.

*I. F. Domnin<sup>1</sup>, L. Ya. Emelyanov<sup>1</sup>, and L. F. Chernogor<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Ionosphere, National Academy  
of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science,  
Youth and Sports of Ukraine,  
16, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup>V. Karazin National University of Kharkiv,  
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

THE DYNAMICS OF IONOSPHERE PLASMA  
OVER KHARKIV DURING THE SOLAR ECLIPSE  
OF JANUARY 4, 2011

The results of incoherent scatter radar observations of dynamic processes at altitudes close to the F-region maximum and in the topside ionosphere, which were caused by the partial (about 0.78 magnitude) solar eclipse on January 4, 2011 near Kharkiv, are presented. It is shown that the eclipse caused ionosphere restructuring processes which are similar to a short-term nightfall. The experiment has been carried out in winter under low solar activity conditions.

*Статья поступила в редакцию 21.02.2012*