

## РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ МАКСИМУМА 24-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

### Введение

Движение ионосферной плазмы играет фундаментальную роль в динамике ионосферы и формировании ее области F (наряду с процессами ионизации и рекомбинации) [1 – 3]. Для среднеширотной области F преобладающей является вертикальная составляющая скорости движения плазмы  $V_z$ , которая является результатом воздействия трех механизмов: амбиполярной диффузии вдоль геомагнитных силовых линий, увлечением плазмы нейтральным ветром также вдоль силовых линий геомагнитного поля Земли и электромагнитного дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Особый интерес представляет измерение скорости плазмы одновременно с другими ионосферными параметрами, что позволяет осуществлять наиболее информативный радиофизический метод исследования ионосферы – метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн [2, 4].

Исследованию движений в ионосфере методом НР посвящено значительное количество работ. К ранним из них относятся, например, [5 – 9]. Динамика ионосферы продолжает представлять научный интерес (см., например, [10 – 16]).

В связи с различным механизмом движения ионосферной плазмы в разных широтах, данные о скорости плазмы, получаемые в этих широтах, значительно отличаются [5 – 6, 8 – 16]. Исследования движения ионосферной плазмы на харьковском радаре, который является единственной установкой НР в средних широтах европейского региона, дают ценную информацию, поскольку ионосфера Земли не имеет сферичной симметрии из-за несовпадения географических и геомагнитных полюсов, и данные, полученные в других географических регионах, не могут адекватно описывать состояние ионосферы над Украиной.

Измерения скорости  $V_z$  с помощью радара НР Института ионосферы (г. Харьков) проводятся как при отсутствии возмущений в ионосфере, так и в условиях природных возмущений, вызванных, в частности, солнечным затмением и геомагнитными бурями (см., например, [17 – 22]).

Измеряемая вертикальная составляющая скорости движения плазмы используется для расчета параметров ионосферы и уточнения ее региональной модели [23, 24]. В частности, она используется для вычисления плотности потока ионосферной плазмы  $\Pi = N_e \cdot V_z$  и определения скорости нейтрального ветра и электрических полей в ионосфере ( $N_e$  – концентрация электронов) (см., например, [25]).

Актуальной задачей является получение экспериментальных данных о скорости движения плазмы среднеширотной ионосферы центральноевропейского региона при различном состоянии космической погоды.

Цель работы – исследование вариаций вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы  $V_z$  при отсутствии возмущений ионосферы в период вблизи максимума 24-го цикла солнечной активности (СА) и сравнение с данными, полученными при низкой СА.

В настоящей работе рассмотрены результаты определения скорости плазмы для характерных геофизических периодов вблизи летнего и зимнего солнцестояний, весеннего и осеннего равноденствий при умеренной и (для сравнения) низкой СА, полученные с помощью радара НР Института ионосферы.

## Состояние космической погоды

Особенностью 24-го цикла СА (начало в январе 2009 г.) является то, что он отличается от предыдущих циклов задержкой возрастания активности Солнца и умеренной активностью в его максимуме. Из рис. 1, где представлены временные вариации индекса СА  $F_{10.7}$  для дней проведения измерений на харьковском радаре НР, видно, что вблизи максимума 24-го цикла СА величина индекса  $F_{10.7}$  в среднем в 1.5 раза была ниже значения  $F_{10.7}$  в максимуме 23-го цикла СА (май 1996 г.–январь 2009 г.).

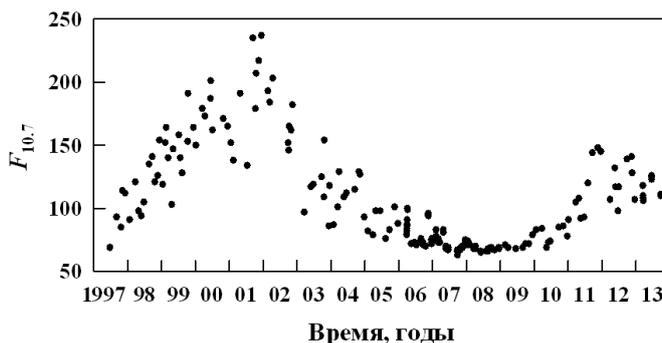


Рис. 1. Вариации индекса  $F_{10.7}$  в период 23 и 24 циклов СА

В табл. 1 и 2 приведены значения индексов солнечной  $F_{10.7}$  и магнитной  $A_p$  активности для рассматриваемых в данной работе периодов измерений параметров ионосферы (<http://www.swpc.noaa.gov/Data/index.html#indices>).

Таблица 1

Сезон	Низкая СА			Умеренная СА					
	Дата	$A_p$	$F_{10.7}$	Дата	$A_p$	$F_{10.7}$	Дата	$A_p$	$F_{10.7}$
Лето	22.06.2010	6	73	19.06.2012	5	110	18.06.2013	7	125
	23.06.2010	4	74	20.06.2012	4	94	19.06.2013	4	123
	24.06.2010	7	74	21.06.2012	3	88	20.06.2013	<b>12</b>	126
Зима	21.12.2010	1	78	18.12.2012	5	116	17.12.2013	3	159
	22.12.2010	0	78	19.12.2012	4	113	18.12.2013	3	156
	23.12.2010	0	80	20.12.2012	7	114	19.12.2013	4	153

Таблица 2

Сезон	Умеренная СА					
	Дата	$A_p$	$F_{10.7}$	Дата	$A_p$	$F_{10.7}$
Весна	27.03.2012	<b>15</b>	106	19.03.2013	4	110
	28.03.2012	10	107	20.03.2013	7	108
	29.03.2012	3	112	21.03.2013	<b>11</b>	106
Осень	25.09.2012	2	140	24.09.2013	9	110
	26.09.2012	6	139	25.09.2013	4	111
	27.09.2012	3	133	26.09.2013	2	110

Видно, что рассматриваемые периоды работы радара НР характеризуются относительно спокойным состоянием космической погоды за исключением 27 марта 2012 г., 21 марта и 20 июня 2013 г., когда имели место слабые геомагнитные возмущения (величина индекса  $K_p$  в эти дни не превышала 5, 4 и 4 соответственно).

## Средства и методика

*Радар НР.* Для исследования эффектов в ионосфере использовался радар НР Института ионосферы НАН и МОН Украины, который находится в 50 км от г. Харькова и является единственным и наиболее информативным источником сведений о параметрах и процессах, характеризующих поведение геокосмической плазмы в средних широтах центральноевропейского региона [26]. Географические координаты радара: 49.6° N, 36.3° E; геомагнитные:  $\Phi=45.7^\circ$ ,  $\Lambda=117.8^\circ$ ; наклонение геомагнитного поля – 66.4°, параметр Мак-Илвейна  $L \approx 1.9$ . Радар оснащен зенитной двухзеркальной параболической антенной диаметром 100 м. Рабочая частота радара – 158 МГц. 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 мощность радиопередающего устройства составляет 2 – 4 МВт. В рас-

сма­три­вае­мые пе­ри­оды из­ме­ре­ний ио­но­сфер­ных па­ра­мет­ров она рав­ня­лась 2 МВт. Час­тота сле­до­ва­ния зон­ди­ру­ю­щих ра­дио­им­пуль­сов со­став­ля­ет 24.4 Гц. Шу­мо­вая тем­пе­ра­тура ра­дио­при­ем­но­го ус­трой­ства (РП­рУ) рав­на 120 К, а по­ло­са про­пус­ка­ния на­и­бо­лее уз­ко­по­ло­сного тра­кта, оп­ре­де­ляе­мая филь­тра­ми ниж­них час­тот, со­став­ля­ет 5.5–9.5 кГц. Эф­фек­тив­ная шу­мо­вая тем­пе­ра­тура си­сте­мы 470 – 980 К.

Ра­дар НР по­зво­ля­ет из­ме­рять с при­ем­ле­мы­ми по­греш­но­стью и раз­ре­ше­нием по вы­со­те (10–100 км) сле­ду­ю­щие па­ра­мет­ры ио­но­сферы: кон­цен­тра­цию элек­тро­нов  $N_e$ , тем­пе­ра­туры ио­нов  $T_i$  и элек­тро­нов  $T_e$ , вер­ти­каль­ную со­став­ля­ю­щую ско­рости пе­ре­но­са пла­змы  $V_z$ , ион­ный со­став. По­греш­ность из­ме­ре­ния дан­ных оп­ре­де­ля­ет­ся от­но­ше­нием сиг­нал/шум и вре­ме­нем на­ко­пле­ния. По­греш­ность оп­ре­де­ле­ния па­ра­мет­ров ио­но­сферы ( $N_e$ ,  $T_i$  и  $T_e$ ) об­ыч­но не пре­вы­ша­ет 5 – 10 % в днев­ное вре­мя и 15 – 30 % в ноч­ное вре­мя.

Ра­дар ра­бо­тал в ре­жи­ме из­лу­че­ния двух­час­то­тно­го со­став­но­го сиг­нала, со­сто­я­ще­го из ра­дио­им­пуль­сов дли­тель­но­стью 660 и 130 мкс на час­тотах  $f_0$  и  $(f_0+0.1)$  МГц со­от­вет­ствен­но, где  $f_0=158$  МГц. В РП­рУ осу­ществ­ля­лась час­то­тная се­лек­ция неко­герент­но рас­се­ян­ных эхо­сиг­налов и вы­де­ле­ние квад­ратур­ных сиг­налов для каж­до­го из эле­ментов с по­мо­щью син­хрон­но­го де­тек­ти­ро­ва­ния. Для вы­де­ле­ния эхо­сиг­налов от пер­во­го эле­мента (с не­су­щей час­тотой  $f_0$ ) ис­поль­зо­ва­лись филь­тры ниж­них час­тот ти­па Кауэра 7-го по­ря­дка с ам­пли­тудно­-час­то­тной ха­рак­те­ри­стикой, близ­кой к пря­мо­уголь­ной, и ши­ри­ной по­ло­сы про­пус­ка­ния по по­ло­вин­ной мощ­ности  $\Delta F = 9.5$  кГц. Для вы­де­ле­ния сиг­налов от вто­ро­го эле­мента ис­поль­зо­ва­лись филь­тры ти­па Че­бы­шева 3-го по­ря­дка с  $\Delta F = 6.0$  кГц. В ре­зуль­та­те при­ема и об­ра­бот­ки рас­се­ян­но­го ио­но­сферой сиг­нала от пер­во­го эле­мента оп­ре­де­ля­лись кон­цен­тра­ция элек­тро­нов  $N_e$ , тем­пе­ра­туры ио­нов  $T_i$  и элек­тро­нов  $T_e$ , вер­ти­каль­ная со­став­ля­ю­щая ско­рости дви­же­ния пла­змы  $V_z$  и ион­ный со­став для ря­да зна­че­ний вы­сот в диа­па­зоне вы­сот 200 – 1000 км с раз­ре­ше­нием по вы­со­те око­ло 100 км. По от­кли­ку от вто­ро­го эле­мента оп­ре­де­ля­лись вы­сот­ные за­ви­си­мо­сти мощ­ности НР сиг­нала в диа­па­зоне вы­сот 100 – 550 км с раз­ре­ше­нием по вы­со­те 20 км для кор­рек­ции вы­сот­ных про­фи­лей  $N_e$ .

*Ионозонд.* Ионозонд «Базис» [27] используется для общего контроля состояния ионо­сферы и калибровки определяемого методом НР нормированного высотного профиля элек­тронной концентрации в его максимуме по измеренной критической частоте слоя F2 ионо­сферы. Основные параметры ионозонда следующие: импульсная мощность – 15 кВт, дли­тель­ность ра­дио­им­пуль­сов – 100 мкс, диа­па­зон час­тот в ре­жи­ме вер­ти­каль­но­го зон­ди­ро­ва­ния 1 – 20 МГц, чув­стви­тель­ность при­ем­ника – 15 мкВ. При­ем­ная и пе­ре­да­ю­щая ан­тен­ны – ром­би­че­ские с вер­ти­каль­ным из­лу­че­нием, рас­по­ло­же­ны ор­то­го­наль­но. Каж­дая ан­тен­на со­сто­ит из двух ромбов. Большой ромб работает в диапазоне 1 – 6 МГц, а малый – 6 – 20 МГц. 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 [28]

$$V_z(h_j) = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^n \left[ \arctg \frac{r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)}{r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)} - \arctg \frac{r_{\text{Im}}(t_j, 0)}{r_{\text{Re}}(t_j, 0)} \right] r^2(t_j, \tau_k) \tau_k}{\sum_{k=1}^n r^2(t_j, \tau_k) \tau_k^2}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны радара,  $n$  – количество используемых значений КФ с различными сдви­гами  $\tau_k$ ;  $r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$  и  $r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$  – 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;  $r^2(t_j, \tau_k) = r_{\text{Re}}^2(t_j, \tau_k) + r_{\text{Im}}^2(t_j, \tau_k)$ . В опи­сы­вае­мых из­ме­ре­ниях  $\Delta\tau = 61$  мкс,  $k = 1 - 9$  при ис­поль­зо­ва­нии од­но­го из ус­трой­ств кор­ре­ля­ци­он­ной об­ра­бот­ки ра­дара НР и  $\Delta\tau = 30.5$  мкс,  $k = 1-18$  – дру­го­го ус­трой­ства об­ра­

ботки с более широкими возможностями и высокой производительностью.

Для определения составляющих  $r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$  и  $r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$  осуществляется оценка взаимных  $R_{12sn}(t_j, \tau_k)$ ,  $R_{21sn}(t_j, \tau_k)$  и авто-  $R_{11sn}(t_j, \tau_k)$ ,  $R_{22sn}(t_j, \tau_k)$  корреляционных функций сигналов, выделенных квадратурными каналами радиоприемного тракта:

$$R_{\text{Im},sn}(t_j, \tau_k) = \frac{1}{2} [R_{12sn}(t_j, \tau_k) - R_{21sn}(t_j, \tau_k)], \quad R_{\text{Re},sn}(t_j, \tau_k) = \frac{1}{2} [R_{11sn}(t_j, \tau_k) + R_{22sn}(t_j, \tau_k)].$$

Вычисляются значения мощности и КФ НР сигнала (в виде разности оценок статистического параметра смеси сигнала и шума (индекс  $sn$ ) и соответствующего параметра шума ( $n$ ), усредненного по ряду замеров в конце радиолокационной развертки, где уровень НР сигнала пренебрежимо мал):

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

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

проводится коррекция результатов обработки и нормирование КФ. Индексы 1 и 2 обозначают канал приемника.

Учет веса значений огибающей КФ сигнала  $r(t_j, \tau_k)$  и величины сдвига  $\tau_k$  в выражении (1) способствует снижению статистической погрешности измерения скорости. Вместо нормированных значений  $r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$  и  $r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$  для определения  $V_z$  можно использовать ненормированные значения КФ  $R_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$  и  $R_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$  (например, при отсутствии необходимости измерять другие параметры ионосферы). При этом статистическая погрешность  $V_z$  практически не изменяется, поскольку погрешность измерения мощности, на которую нормируется КФ, на один-два порядка ниже погрешности КФ.

Скорость движения плазмы определяется одновременно с другими параметрами 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. Для определения концентрации электронов  $N_e$  вычисляется нормированный к максимуму высотный профиль  $N_e(h_j)_{\text{norm}} = \{q(h_j)h_j^2 [1 + T_e(h_j)/T_i(h_j)]\}_{\text{norm}}$  [29], 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  $\text{м}^{-3}$ ) определяются путем привязки нормированного профиля  $N_e(h_j)_{\text{norm}}$  в максимум к измеренному ионозондом значению критической частоты  $f_oF2$  (в МГц):  $N_e(h_j) = 1.24 \cdot 10^{10} N_e(h_j)_{\text{norm}} (f_oF2)^2$ .

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

Подробно методика определения скорости движения ионосферной плазмы совместно с другими ионосферными параметрами приведена в [18].

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 (для текущего контроля сеансов измерений с таким же временем накопления) высотные профили сечения рассеяния (в относительных единицах),  $T_i$ ,  $T_e$ ,  $V_z$ .

Основная (вторичная) обработка включает в себя отбраковку данных (одноминутных сеансов измерений), подверженных искажениям из-за помех; усреднение статистических характеристик НР сигнала по времени (объединение нескольких сеансов); определение КФ НР сигнала из разностей измеренных КФ смеси сигнал+шум (для ряда высот  $h_j$ ) и усред-

ненной КФ шума на участках радиолокационной развертки, где НР сигнал отсутствует; усреднение статистических характеристик НР сигнала по высоте (трапецеидальное усреднение, описанное в [30]); коррекцию результатов измерений с учетом характеристик радара; нормирование КФ и, наконец, вычисление параметров ионосферы, в том числе скорости  $V_z$  согласно выражению (1).

Специфика определения скорости движения плазмы заключается в том, что регистрируемые доплеровские сдвиги спектра НР сигнала, вызванные движением плазмы, составляют единицы-десятки герц при его ширине – единицы-десятки килогерц и на восемь порядков меньше значения несущей частоты радара; полезный сигнал представляет собой случайный процесс, его мощность соизмерима с мощностью космических и аппаратных шумов, а измеряемые статистические характеристики зависят от множества геофизических факторов.

При повышении СА возрастает концентрация электронов и, как следствие, повышается отношение сигнал/шум. При этом точность измерений выше, высотный диапазон измеряемых параметров ионосферы больше, чем при низкой СА

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

Среднеквадратическая погрешность  $\sigma_V$  измерения скорости  $V_z$  зависит от отношения сигнал/шум  $q$  и временного интервала накопления данных. В описываемые периоды измерений при 15-минутном накоплении и дополнительном временном усреднении скользящим средним по пяти значениям  $V_z$  она составляла 1 – 30 м/с для высот 200 – 600 км в зависимости от высоты, времени суток и состояния ионосферы. При  $q < q_{min} = 0.1$  оценка  $V_z$  становится нецелесообразной. Рис. 2 иллюстрирует высотные диапазоны с низким отношением мощности НР сигнала к мощности шума ( $q < 0.1$ , серый фон).

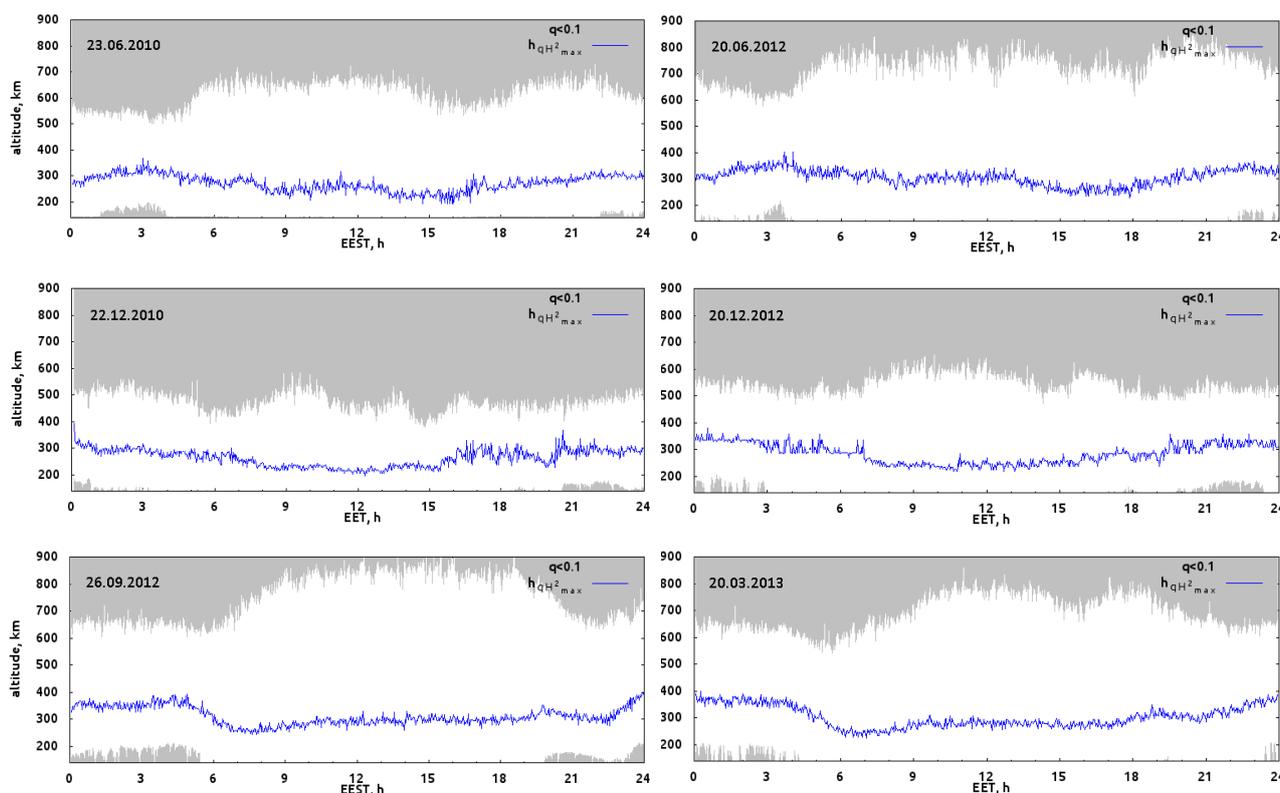


Рис. 2. Иллюстрация высотных диапазонов с низким отношением мощности НР сигнала к мощности шума ( $q < 0,1$ ) (серый фон) в периоды летнего (а, б) и зимнего (в, г) солнцестояний, осеннего (д) и весеннего (е) равноденствий при низкой (а, в) и умеренной (б, г, д, е) солнечных активностях.

Линия – суточные вариации высоты максимума слоя F2 ионосферы

Систематическая погрешность измерения скорости, которая может быть вызвана аппаратными факторами, в настоящее время меньше 1 – 3 м/с, т. е. ниже  $\sigma_V$ , благодаря когерентной структуре радара НР, обеспечения высокой стабильности параметров радиопередатчика (во время зондирования) и радиоприемника (на протяжении радиолокационной развертки) [31, 32].

Достоверность измерения скорости плазмы обеспечивается применением стандартных статистических методов обработки сигналов, калибровкой характеристик радара НР и контролем его функционирования. Радар тестируется с помощью контрольных сигналов (гармонического, «белого шума» или узкополосного шумового сигнала с известными параметрами). В периоды ионосферных измерений контролируются параметры шума, однозначно связанные с параметрами приемно-обрабатывающего тракта, в частности огибающая КФ шума и ее мнимая составляющая при нулевом сдвиге  $r_{\text{Im}(n)}(0)$ , характеризующие форму амплитудно-частотной характеристики приемного тракта и точность установки сдвига фазы между выходными квадратурными сигналами РПрУ.

### Результаты наблюдений вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы

*Высотные вариации скорости движения плазмы.* Высотные зависимости скорости  $V_z$  характеризуются тем, что днем на высотах вблизи и ниже максимума ионизации плазма движется вниз ( $V_z < 0$ ), и  $V_z$  принимает значения  $-50 - 0$  м/с, а выше –  $V_z > 0$ . Высота смены направления движения плазмы увеличивается с повышением солнечной активности. При низкой СА она обычно составляет величину 400 – 600 км, при повышенной СА изменение знака  $V_z$  имеет место на высотах 600 – 900 км. Из рис. 3, где представлены высотные вариации скорости  $V_z$  при 15-минутном временном накоплении и дополнительном временном усреднении скользящим средним по 5 значениям  $V_z$ , видно, что при умеренной СА околополуденный профиль  $V_z(h)$  заметно отличается от профиля при низкой СА.

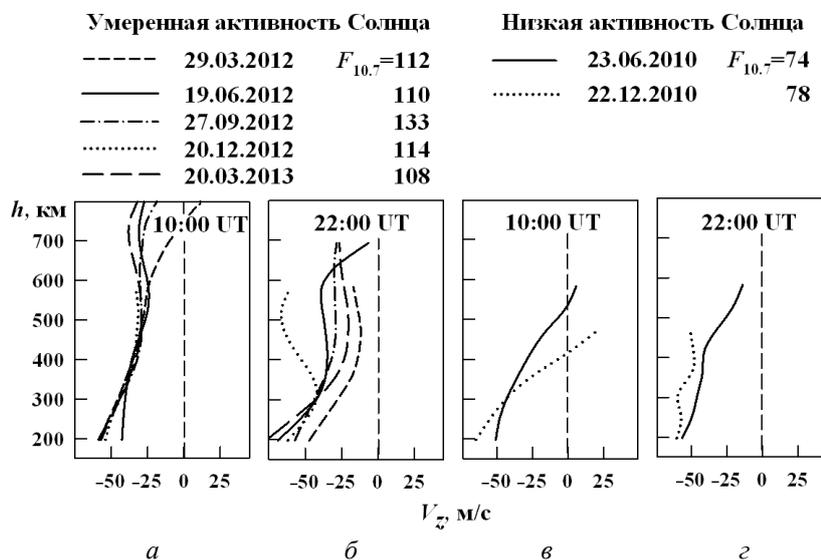


Рис. 3. Высотные зависимости вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы в периоды летнего и зимнего солнцестояний, весеннего и осеннего равноденствий при умеренной (а, б) и низкой (в, г) солнечных активностях днем (а, в) и ночью (б, г)

Ночью на всех исследуемых высотах  $V_z < 0$ , плазма движется вниз (рис. 3, б и г).

В высотном диапазоне 300–500 км при умеренной СА вариации  $V_z(h)$  вблизи местного полудня слабо зависели от сезона (рис. 3, а), в отличие от вариаций вблизи местной полуночи (рис. 3, б) и при низкой СА (рис. 3, в).

*Высотно-временные вариации скорости движения ионосферной плазмы.* На рис. 4 приведены временные вариации скорости  $V_z$  для ряда высот области F ионосферы, полученные в периоды летнего (а) и зимнего (б) солнцестояний 2012 г. (при умеренной активности Солнца), и, для сравнения, такие же вариации 2010 г. (при низкой активности Солнца).

Суточные вариации  $V_z$  отслеживают изменение положения Солнца относительно Харькова и магнитосопряженной точки (о. Мадагаскар). Утром наблюдается экстремум во временных вариациях  $V_z$ , связанный с усилением фотоионизации по отношению к процессу рекомбинации при восходе Солнца и переносом избытка плазмы вверх. Его величина растет при увеличении высоты. Также наблюдается вечерний экстремум (увеличение модуля скорости нисходящего движения плазмы с последующим уменьшением).

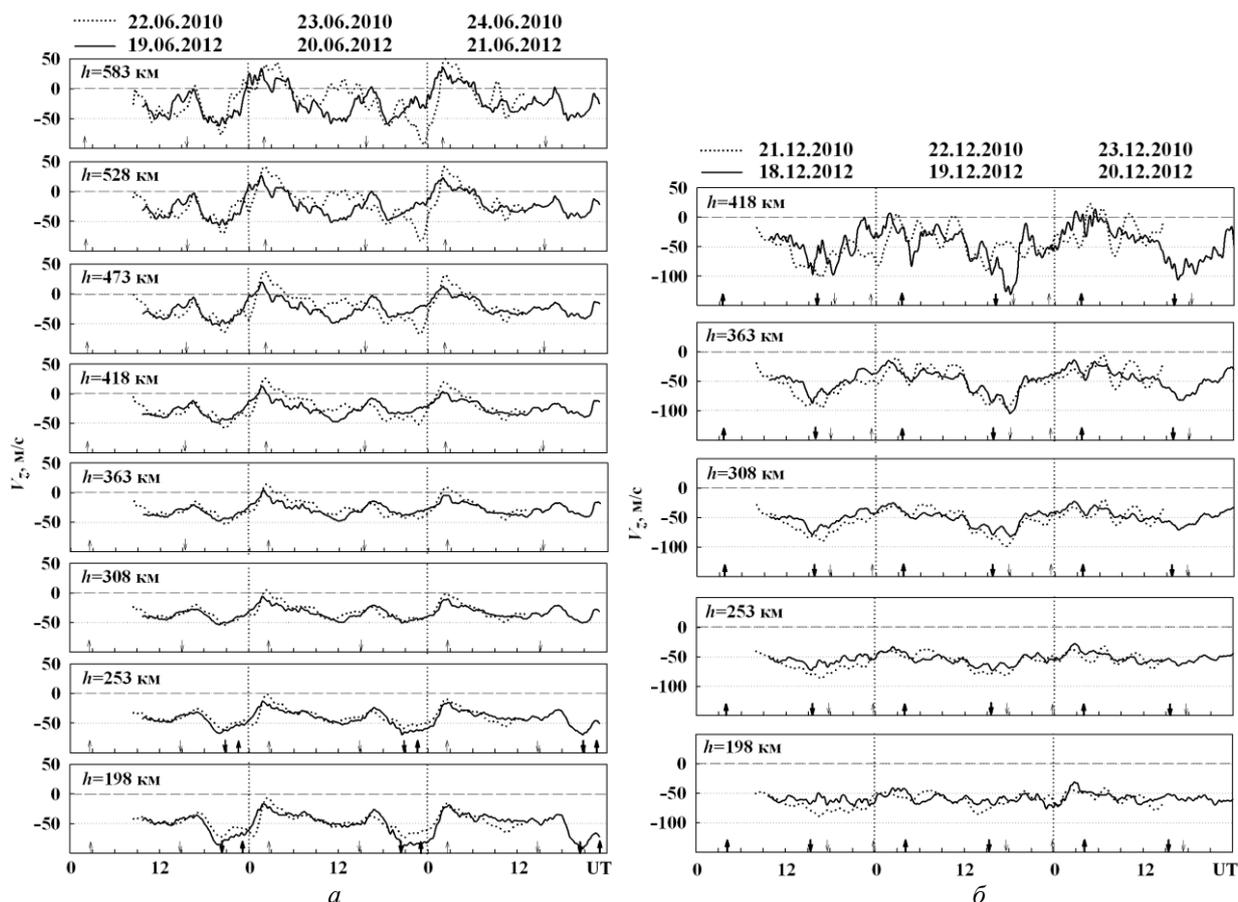


Рис. 4. Высотно-временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы, измеренные в периоды летнего (а) и зимнего (б) солнцестояний 2010 г. (при низкой активности Солнца) и 2012 г. (при умеренной активности Солнца)

*Стрелками показаны моменты восхода и захода Солнца на соответствующих высотах в Харькове (жирная стрелка) и магнитосопряженной точке (тонкая стрелка), расположенной вблизи острова Мадагаскар*

В период летнего солнцестояния на высотах ионосферы вблизи максимума слоя F2 ( $h=200-400$  км) временные зависимости  $V_z$  при пониженной и умеренной СА близки (рис. 4, а). При этом моменты утреннего и вечернего экстремумов при умеренной и низкой СА практически совпадают. Заметные отличия в вариациях  $V_z$  наблюдались на высотах, больших 418 км, в период с 10 до 14 UT и в ночное время, что, вероятно, связано с наличием слабых возмущений в ионосфере 20 июня 2012 г. С ростом высоты эти отличия усиливались.

Временные вариации, измеренные при различной СА в период зимнего солнцестояния (рис. 4, б), также отличались незначительно (за исключением вариаций на двух временных интервалах на высоте 418 км). При этом утренний максимум был слабо выражен. Вечерний экстремум просматривается на высотах, начиная с 253 км, и увеличивается с ростом высоты.

Суточно-сезонные вариации скорости движения ионосферной плазмы. Рис. 5 характеризует сезонные отличия во временных вариациях  $V_z$ , полученных при разной СА.

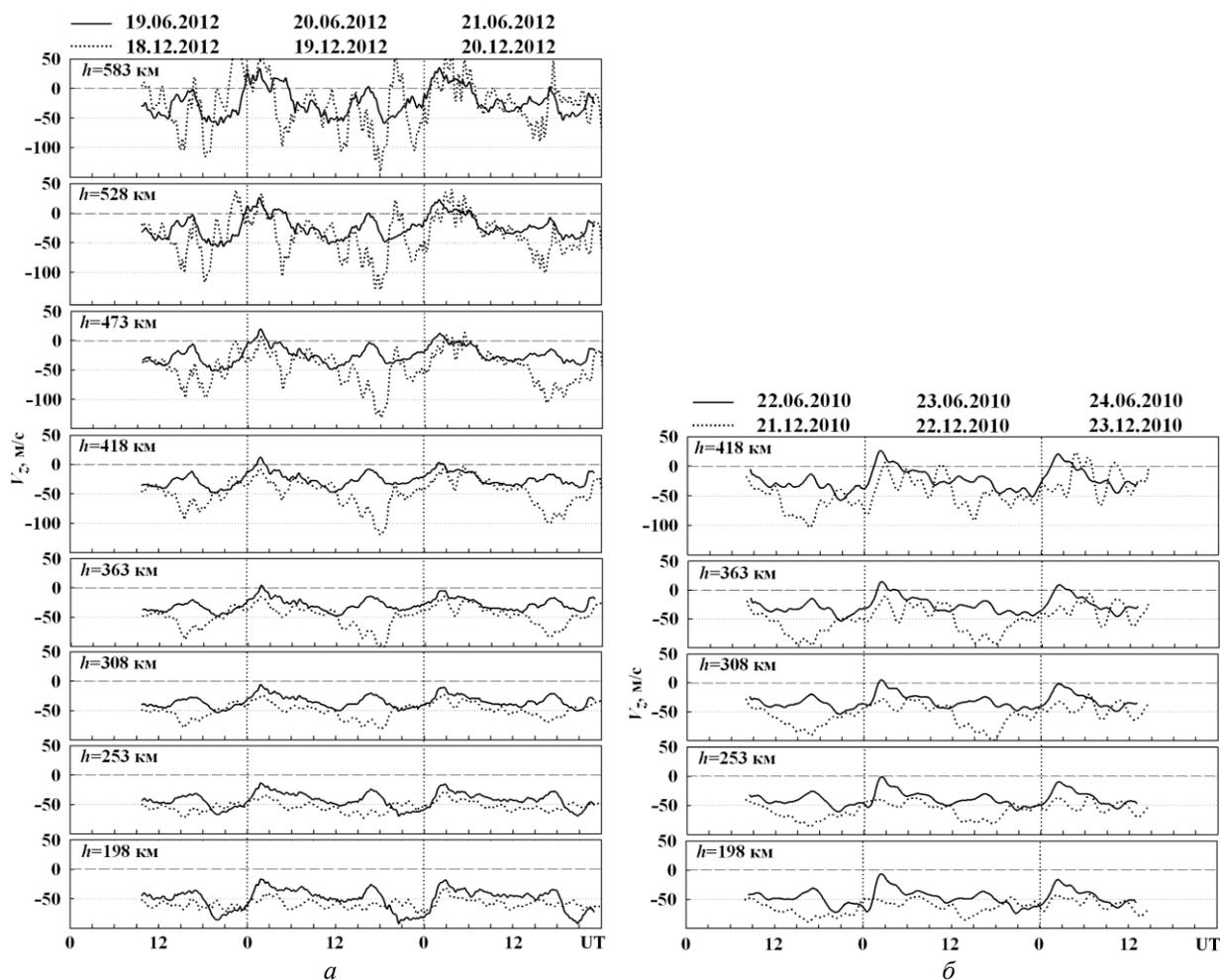


Рис. 5. Высотно-временные вариации вертикальной скорости плазмы в периоды летнего (сплошные линии) и зимнего (точки) солнцестояний при умеренной (а) и низкой (б) солнечных активностях

В обоих случаях (при низкой и умеренной СА) характер отличия летних и зимних вариаций скорости подобен. Утренний экстремум более выражен летом, а вечерний – зимой. Зимой днем на высотах в районе максимума ионизации значения модуля направленной вниз скорости на 5 – 15 м/с больше, чем летом, что в значительной степени связано с меридиональной составляющей термосферного ветра. В период с 12 до 19 часов (UT) отличия летних и зимних вариаций  $V_z$  наибольшие.

В периоды весеннего и осеннего равноденствий при умеренной СА высотные и временные вариации скорости  $V_z$  подобны (рис. 6). Некоторые отличия в вариациях наблюдались при прохождении утреннего и вечернего терминаторов.

В целом, следует отметить, что характер вариаций  $V_z$  и значения скорости, измеренные в разные дни в одинаковое время суток при близких гелиогеофизических условиях, подобны (см. рис. 4 – 6). Это дает возможность систематизировать данные и использовать их для уточнения моделей ионосферы и, в частности, модели CERIM ИОН [23, 24].

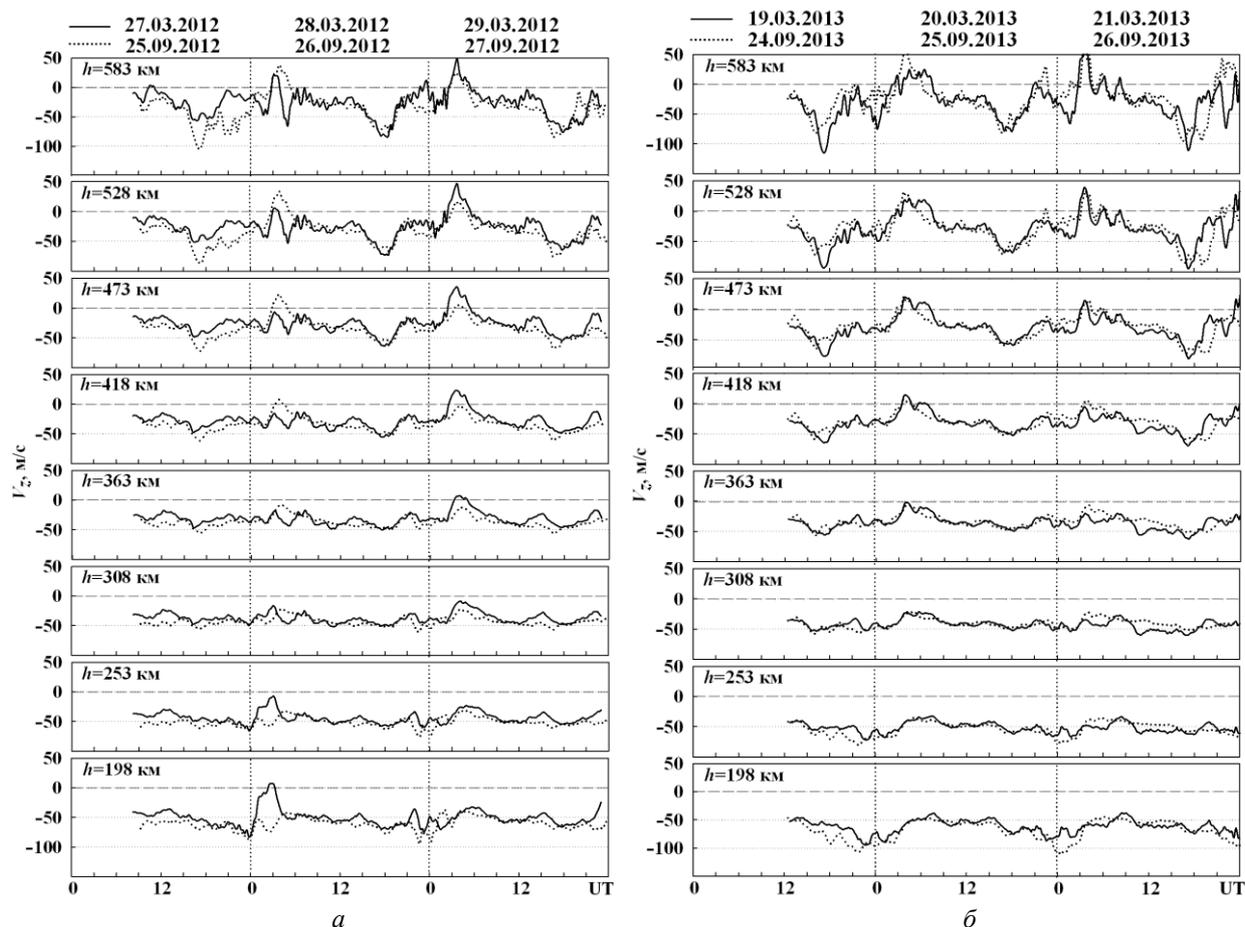


Рис. 6. Высотно-временные вариации вертикальной скорости плазмы в периоды вблизи весеннего (сплошные линии) и осеннего (точки) равноденствий при умеренной солнечной активности в 2012 г. (а) и 2013 г. (б)

### Выводы

1. При отсутствии возмущений в ионосфере временные вариации вертикальной составляющей скорости движения плазмы  $V_z$  имели устойчивый характер. Вблизи максимума 24-го цикла СА, характеризуемого умеренной солнечной активностью ( $F10.7=100 - 140$ ), величина скорости принимала значения в основном от  $-70$  до  $50$  м/с.

2. В дневное время на высотах вблизи и ниже максимума ионизации плазма двигалась вниз ( $V_z < 0$ ), и  $V_z$  принимала значения  $-50 - 0$  м/с, а на высотах выше максимума ионизации  $V_z > 0$ . Ночью на всех исследуемых высотах  $V_z < 0$ .

3. При повышенной СА высота перемены направления движения плазмы больше, чем при низкой СА.

4. Высотный профиль скорости  $V_z(h)$  на высотах  $200 - 600$  км в околополуденное время слабо зависел от сезона.

5. Характер ночного профиля  $V_z(h)$  в летнее время на больших высотах (выше  $450$  км при низкой СА и  $600$  км при умеренной СА) приближается к характеру дневного профиля, что объясняется воздействием солнечного излучения на этих высотах на протяжении всех суток.

6. Суточные вариации  $V_z$  отслеживали изменение положения Солнца относительно места расположения радара НР и магнитосопреженной области. Устойчивые восходящие потоки плазмы приходились на утренние часы, а нисходящие – на вечерние. Утренний экстремум в вариациях  $V_z$  более выражен летом, чем зимой, а вечерний – зимой. Величина изменения  $V_z$  увеличивалась с высотой.

7. При умеренной СА в околополуденное время величина скорости нисходящего движе-

ния плазмы на высотах вблизи максимума ионизации зимой была на 10 – 15 м/с больше, чем летом, как и при низкой СА.

8. Полученные результаты измерения скорости движения ионосферной плазмы при различном состоянии космической погоды используются для уточнения региональной модели ионосферы.

**Список литературы:** 1. *Казимировский, Э.С., Кокоуров, В.Д.* Движения в ионосфере. – М.: Наука, 1979. – 344 с. 2. *Брюнелли, Б.Е., Намгаладзе, А.А.* Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с. 3. *Иванов-Холодный, Г.С., Михайлов, А.В.* Прогнозирование состояния ионосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980.–190 с. 4. *Эванс, Дж.В.* Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139–175. 5. *Evans, J.V.* Ionospheric movements measured by incoherent scatter: A review // J. Atmos. Terr. Phys. –1972. – Vol. 34. – P. 175–209. 6. *Evans, J.V., Brockelman, R.A., Julian, R.F. et al.* Determination of F-region vertical drifts at Millstone Hill // Radio Sci. – 1970. – Vol. 5, No. 1, – P. 27–38. 7. *Woodman, R.F., Hagfors, T.* Methods for the measurement of vertical ionospheric motions near the magnetic equator by incoherent scattering // J. Geophys. Res.: Space Phys.– 1969.– Vol. 74, No. 5. – P. 1205–1212. 8. *Woodman, R.F.* Vertical drift velocities and east-west electric fields at the magnetic equator // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75. – P. 6249–6259. 9. *Amayenc, P., Vasseur, G.* Neutral winds deduced from incoherent scatter observations and their theoretical interpretation // J. Atmos. Terr. Phys. – 1972. – Vol. 34. – P. 351–364. 10. *Bertoni, F., Batista, I.S., Abdu, M.A., Reinisch, B.W., Kherani, E.A.* A comparison of ionospheric vertical drift velocities measured by Digisonde and Incoherent Scatter Radar at the magnetic equator // J. Atmos. Terr. Phys. – 2006. – Vol. 68. P. 669–678. 11. *Davies, J.A., Yeoman, T.K., Lester, M., Milan, S.E.* A comparison of F-region ion velocity observations from the EISCAT Svalbard and VHF radars with irregularity drift velocity measurements from the CUTLASS Finland HF radar // Annales Geophysicae. – 2000. – Vol. 18. – P. 589–594. 12. *Berkey, J.E., Richmond, A.D., Barnes, R.M., González, S., Tepley, C.A.* Solar cycle variations in F region electrodynamic drifts at Arecibo // J. Geophys. Res. – 1990. – Vol. 95. – P. 4303–4306. 13. *Scherliess, L., Fejer, B.G., Holt, J., Goncharenko, L., Amory-Mazaudier, C., Buonsanto, M. J.* Radar Studies of mid-latitude ionospheric plasma drifts // J. Geophys. Res. – 2001. – Vol. 106. – P. 1771–1783. 14. *Щербаков, А.А., Медведев, А.В., Кушнарев, Д.С.* Анализ состояния среднеширотной внешней ионосферы по данным наблюдений на иркутском радаре НР // Солнечно-земная физика. – 2010. – Вып. 16. – С. 3–8. 15. *Pingree, J.E., Fejer, B.G.* On the height variation of the equatorial F region vertical plasma drift, // J. Geophys. Res. – 1987. – Vol. 92, No. A5. – P. 4763–4766. 16. *Fejer, B.G., Scherliess, L.* On the variability of equatorial F-region vertical plasma drifts // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2001. – Vol. 63, No. 9.– P. 893–897. 17. *Yemelyanov, L.Ya., Dzyubanov, D.A.* The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – Vol. 66, No. 14, – P. 1313–1327. 18. *Domnin, I.F., Emelyanov, L.Ya., Chernogor, L.F.* Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2012. – Vol. 3, No. 4. – P. 311–324. 19. *Domnin, I.F., Yemel'yanov, L.Ya., Kotov, D.V., Lyashenko, M.V., Chernogor, L.F.* Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov:1. Results of Incoherent Scatter Observations // Geomagnetism and Aeronomy, – 2013, – Vol. 53, No. 1, – P. 113–123. 20. *Domnin, I.F., Emel'yanov, L.Ya., Lyashenko, M.V., Chernogor, L.F.* Partial Solar Eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and Simulations Results // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – Vol. 54, No. 5, – P. 583–592. 21. *Chernogor, L., Domnin, I., Emelyanov, L., Kharytonova, S., Lyashenko, M.* Ionospheric storm effects above Kharkov during the August 5–6, 2011 // EGU General Assembly 2012 (Vienna, Austria, 22 – 27 April 2012). Geophysical Research Abstract. 2012. Vol. 14, EGU2012-630-1. 22. *Домнин, И.Ф., Емельянов, Л.Я., Кацко, С.В., Черногор, Л.Ф.* Ионосферные эффекты геокосмической бури 13–14 ноября 2012 г. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 170–180. 23. *Chernogor, F., Domnin, I., Lyashenko, M.* Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ИОН) for Space Weather Forecasting // EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 02–07 May 2010). Geophysical Research Abstract. – 2010. – Vol. 12, EGU2010-316-2. 24. *Lyashenko, M., Domnin, I., Chernogor, L.* Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ИОН) based on Kharkov Incoherent Scatter Data // Workshop on Assessment and Validation of Space Weather Models (Alcala de Henares, Spain, 16–17 March, 2011). – 2011. – P. 23–24. 25. *Кацко, С.В., Домнин, И.Ф., Емельянов, Л.Я., Ляшенко, М.В., Черногор, Л.Ф.* Ионосферная буря 5–6 августа 2011 г.: результаты расчетов основных эффектов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 26–39. 26. *Таран, В.И.* Исследо-

вание ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 659 – 666. 27. Емельянов, Л.Я., Кононенко, А.А. Ионозонд “Базис” Института ионосферы как средство для мониторинга состояния ионосферы // Радиотехника. – 2011. – Вып. 167. – С. 30–33. 28. Емельянов, Л. Я. Оптимизация обработки некогерентно рассеянного сигнала для определения скорости дрейфа ионосферной плазмы // Вестн. нац. техн. ун-та “Харьковский политехнический институт”: Сб. науч. тр. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2001, № 4. – С. 81–84. 29. Emel'yanov, L.Ya. Incoherent Scatter Measurement of the Electron Density Altitude Profiles // Geomagnetism and Aeronomy. – 2002. – Vol. 42, No. 1. – P. 109–113). 30. Holt, J.M. , Rhoda, D.A., Tetenbaum, D., van Eyken, A.P. Optimal analysis of incoherent scatter radar data // Radio Sci. – 1992. – Vol. 27, No. 3. – P. 435–447. 31. Коваль, А.Д., Еремин, А.Н. Система стабилизации амплитуды зондирующего импульса передатчика // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Физические аспекты современных технологий. Сб. научн. тр. – Харьков : ХГПУ, 2000. – Вып. 103. – С. 48–50. 32. Емельянов, Л.Я., Скляр, И.Б. Минимизация погрешностей измерения скорости движения ионосферной плазмы // Вестн. нац. техн. ун-та “Харьковский политехнический институт”: Сб. научн. тр. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2002. – Т. 5, № 9. – С. 29–33.

*Институт ионосферы  
НАН и МОН Украины*

*Поступила в редколлегию 12.09.2014*