

УДК 550.388

С. В. Панасенко, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

Результаты исследования динамических процессов в нижней ионосфере

Розглянуті основні статистичні характеристики огинаючих завади й суміші завади та частково відбитих сигналів, виміряні середньочастотним радаром часткових відбиттів. Описана методика й приведені результати дослідження динаміки мезосфери та нижньої термосфери (70—120 км) методом рознесеного прийому з малою (110—160 м) базою. Отримані результати адекватно описують фізичні процеси в нижній іоносфері, а також узгоджуються з результатами інших вимірювань.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из проблем, имеющих глобальное значение, является изучение, моделирование и прогнозирование космической погоды. Поскольку околоземное космическое пространство представляет собой единую сложную открытую физическую систему [4], для успешного решения поставленной задачи требуется большой массив данных, собранных наземными и базирующимися на космических аппаратах измерительными установками с применением ряда известных методов исследования.

Изучение динамики и электродинамики верхней атмосферы занимает центральное место в международных радиофизических, геофизических и космических программах. Планетарные и акустико-гравитационные волны, источники которых находятся в тропосфере, а также мигрирующие и немигрирующие солнечные приливы эффективно переносят энергию на термосферные высоты, существенным образом влияя на концентрацию нейтральных и ионизированных частиц, их температуру, состав и т. д. Условия распространения этих типов волн зависят от величины, направления и высотного градиента преобладающего ветра, причем зависимость сильнее всего проявляется на высотах мезосферы и нижней термосферы.

Эффективными методами исследования этой области атмосферы являются радиофизические мето-

ды (вертикального зондирования, частичных и метеорных отражений, некогерентного рассеяния и др.). Это обстоятельство связано с отсутствием летательных аппаратов для данных высот (они находятся в стадии разработки), нерегулярностью запуска и кратковременностью полета геофизических ракет.

В работе изложены методика и результаты исследования статистических характеристик радиосигналов и помехи, а также параметров дрейфа неоднородностей электронной концентрации D-области ионосферы, отражающих динамику нейтрального компонента. Измерения выполнены на радаре частичных отражений (ЧО), расположенном в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина.

СВЕДЕНИЯ О РАДАРЕ ЧАСТИЧНЫХ ОТРАЖЕНИЙ

Измерительная установка является единственным в Украине радаром ЧО, позволяющим измерять величину и направление скорости ветра методом разнесенного приема с малой базой [1, 3]. Координаты радара — 49.5° N, 36.4° E. Его рабочая частота $f_0 = 2.2...2.3$ МГц; частота повторения импульсов $F_p = 1...100$ Гц; ширина полосы пропускания радиоприемного устройства $\Delta f = 60$ кГц; импульсная мощность радиопередающего устройства $P = 100$ кВт; коэффициент усиления антенны $G \approx$

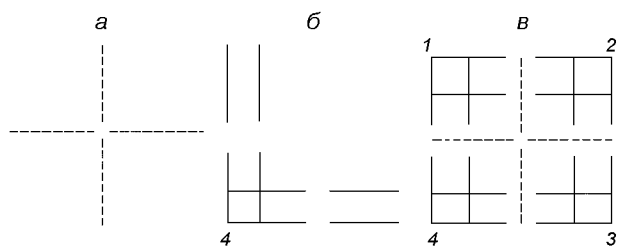


Рис. 1. Схематическое изображение передающей (а) и приемной (б) антенн и общий вид антенного поля (в). Сплошными и пунктирными линиями показаны соответственно приемные и передающие вертикальные двойные ромбические антенны Айзенберга

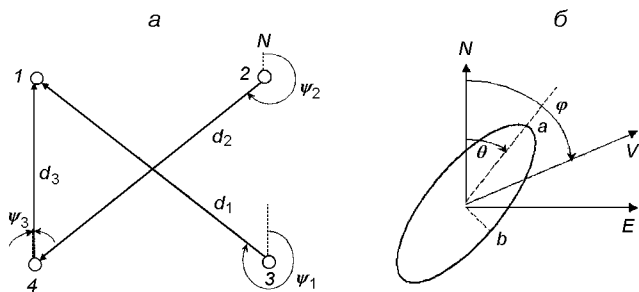


Рис. 2. Расположение приемных антенн (стрелки показывают знак \$I_{\max}\$) (а) и основные параметры неоднородностей (б). Здесь \$d_i\$ и \$\psi_i\$ (\$i = 1, 2, 3\$) — расстояния между антеннами и углы между направлениями на север и отрезками, соединяющими антенны, соответственно; \$a\$ и \$b\$ — оси характеристического эллипса, \$\theta\$ — угол между большей полуосью эллипса и направлением на север, \$V\$ — истинная скорость дрейфа, \$\varphi\$ — угол между направлением скорости дрейфа и направлением на север; N и E — север и восток соответственно

\$\approx 100\$; разрешение по высоте \$\Delta h = 3\$ км; диапазон исследуемых высот \$h = 60...123\$ км. Передающая антенна представляет собой систему из четырех вертикальных двойных ромбических антенн и имеет крестообразную форму (рис. 1, а). Каждая из четырех приемных антенн также состоит из антенн Айзенберга и имеет уголковую форму (рис. 1, б). Общий вид антенного поля представлен на рис. 1, в. Фазовые центры приемных антенн расположены на углах квадрата, сторона которого составляет 112 м, а диагональ — 158 м (рис. 2, а). В наблюдениях частота опроса, или дискретизации уровня сигнала, на выходе каждой из антенн составляла \$F_d = 6.25\$ Гц. Цифровые значения огибающих помехи и ЧО сигнала сохранялись на магнитном носителе.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕХ И ЧАСТИЧНО-ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

Необходимость исследования помех в ходе эксперимента связана с сильной зависимостью их параметров от географического положения измерительного пункта и геофизической обстановки. Статистические характеристики радиопомех используются при оценке погрешностей определения параметров дрейфа неоднородностей электронной концентрации. Величина погрешностей позволяет судить о достоверности полученных результатов и их адекватности состоянию космической погоды. Знание статистических характеристик ЧО сигналов необходимо для выбора адекватной модели описания исследуемых ионосферных процессов. В качестве основных статистических характеристик использовались распределения огибающих помехи и сигнала, а также авто- и кросс-корреляционные функции интенсивностей помех и огибающих сигналов. Анализ показал, что огибающая помехи \$A_n(t)\$, как правило, распределена по закону Пуассона (рис. 3, а, б), который имеет вид

$$w(A_n, \mu) = A_n \int_0^\infty \lambda J_0(\lambda A_n) J_0(\lambda A_{n0}) f(\lambda) d\lambda,$$

$$f(\lambda) = 2^\mu \left(1 + \sqrt{1 + 2\sigma_n^2 \lambda^2 \mu^{-1}} \right)^{-\mu},$$

где \$J_0\$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка, \$f(\lambda)\$ — характеристическая функция; \$\sigma_n^2\$ — дисперсия процесса \$A_n(t)\$, \$\mu\$ — параметр распределения. Это обусловлено приемом помеховых сигналов от небольшого числа радиостанций, работающих, как правило, в импульсных режимах. Автокорреляционные функции интенсивности помехи имели резкий спад уже при единичном временном сдвиге \$\Delta t = 0.16\$ с, что указывает на широкополосность помехи. Не обнаруживались четко выраженные пространственная и межполяризационная корреляции помеховых сигналов, что, скорее всего, связано с их приемом с различных направлений боковыми лепестками диаграмм направленности.

Огибающая смеси ЧО сигнала и помехи в одни временные интервалы лучше аппроксимировалась распределением Рэля—Райса (рис. 3, в), а в другие — распределением Пуассона (рис. 3, г). Последнее переходит в распределение Рэля — Райса при \$\mu \to \infty\$ (на практике при \$\mu > 30\$). Продолжительность интервалов, которым соответствовало одно или другое распределение, зависела от высоты ЧО, сезона и времени суток. Это говорит о том, что в пределах рассеивающего объема, по-видимому, содержится сравнительно небольшое (около 10—

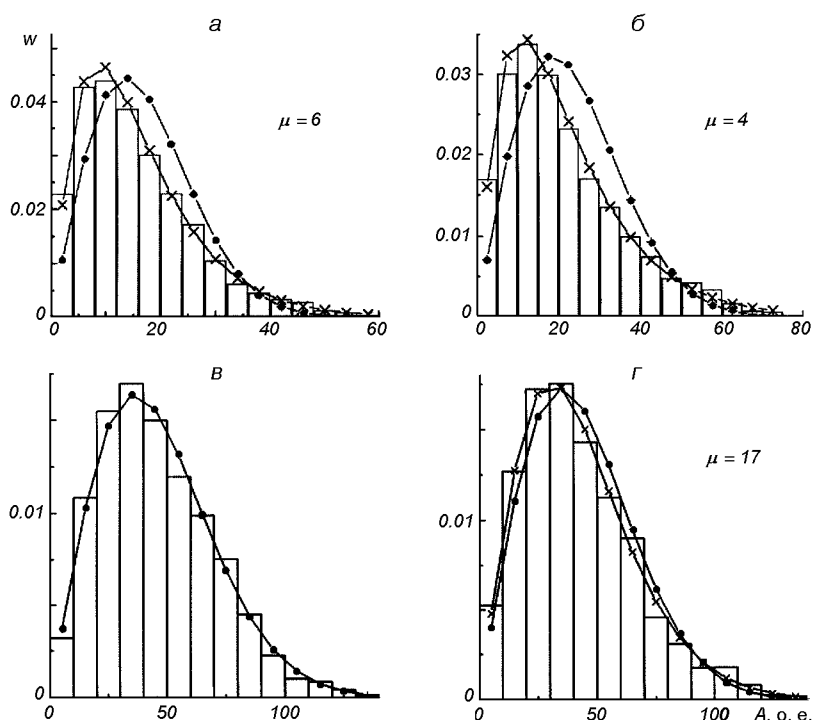


Рис. 3. Примеры гистограмм огибающих помехи для 05.10.02 г., $K_p = 5$ (а) и 08.10.02 г., $K_p = 3$ (б), а также смеси ЧО сигнала и помехи для 01.10.02 г., $K_p = 7$ (в, г) совместно с аппроксимирующими функциями плотности вероятности Пуассона (крестики) и Рэлея (точки). Высота 84 км, отношение сигнал/помеха $q \approx 10$

100), непрерывно изменяющееся число неоднородностей электронной концентрации, размеры которых сравнимы с длиной радиоволны $\lambda_0 = c/f_0$. Однако значения огибающих смеси сигнала и помехи могут быть искажены из-за нелинейности динамической характеристики радиоприемного устройства. Для исключения возможного влияния этой характеристики требуется проведение специальных измерений.

Пространственные кросс-корреляционные функции имели четко выраженные максимумы, коэффициент корреляции огибающих обыкновенной и необыкновенной составляющих изменялся в пределах 0.5—0.9. Интервал автокорреляции огибающих составлял 1—3 с.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В основе методики определения величины и направления скорости ветра лежит модифицированный метод полного корреляционного анализа, разработанный в Саскачеванском университете (г. Саскатун, Канада) [6]. Ионосферные неоднородности D-области, образующиеся за счет турбулентности, моделируются облаками с отличной от фоновой электронной концентрацией и эллиптическим гори-

зонтальным сечением (см. рис. 2, б). Их непрерывное возникновение и исчезновение, хаотические и направленные движения приводят к образованию у поверхности Земли сложной дифракционной картины поля. По изменениям этой картины во времени и пространстве судят о динамических процессах в рассматриваемом ионосферном слое.

В общем случае корреляция амплитуд, измеренных на выходе двух антенн, при наличии перемещающейся дифракционной картины является функцией расстояний между антеннами и временного сдвига. Методика основывается на аппроксимации авто- и кросс-корреляционных функций, вычисленных из экспериментальных данных, выражениями вида:

$$\begin{aligned} \rho(d_1, \psi_1, t) = & \\ = \exp & \left[-0.5 \left(\frac{(d_1 \cos(\psi_1 - \theta) - Vt \cos(\varphi - \theta))^2}{a^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{(d_1 \sin(\psi_1 - \theta) - Vt \sin(\varphi - \theta))^2}{b^2} + \frac{t^2}{\tau_c^2} \right) \right], \end{aligned}$$

где τ_c — время расплывания дифракционной картины. Для определения всех параметров неоднородностей используются временные сдвиги $t_{\max i}$, соответствующие максимумам трех кросс-корреляционных функций $\rho_i(t)$; значения этих максимумов

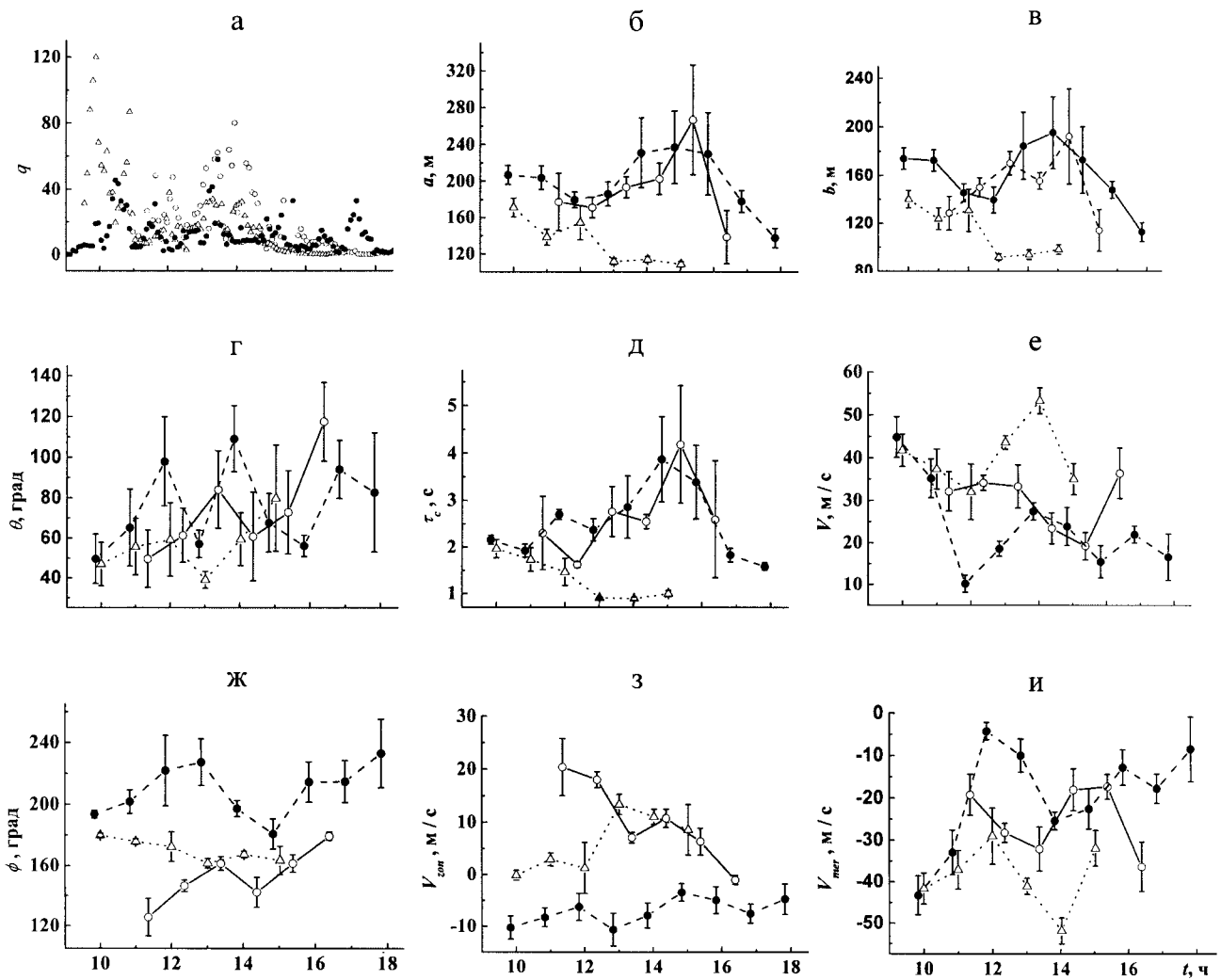


Рис. 4. Примеры временных зависимостей отношений сигнал/помеха (а), а также среднесуточных значений большой (б) и малой (в) полуосей, угла ориентации эллипса (з), характерного времени расплывания дифракционной картины (д), величины (е) и направления (ж) скорости дрейфа неоднородностей, а также ее зональной (з) и меридиональной (и) составляющих (кружки — 01.10.02 г., треугольники — 22.01.03 г., точки — 14.04.03 г.). Время киевское. Положительные значения компонентов скорости указывают на восток и север соответственно

$\rho_{\max i}$; интервал автокорреляции t_a средней для четырех антенн автокорреляционной функции $\rho_m(t)$ при заданном уровне ρ_a .

Система уравнений имеет вид

$$d\rho_i(t_{\max i})/dt = 0,$$

$$\rho_{\max i} = \rho_i(t_{\max i}),$$

$$\rho_a = \rho_m(t_a).$$

Эта система является переопределенной (семь уравнений при шести неизвестных). Для уточнения значений $t_{\max i}$ используется метод наименьших

квадратов с учетом значений $\rho_{\max i}$ (большому значению максимума присваивается больший вес).

В случае получения не имеющих физического смысла результатов (полуоси эллипса и время расплывания — комплексные числа) либо обладающих низкой достоверностью (значение $\rho_{\max i}$ не превышает 0.3; разность между начальным и уточненным значением для хотя бы одного $t_{\max i}$ превышает единичный временной сдвиг Δt и др.), они исключаются из последующей обработки, а параметрам неоднородностей присваиваются нулевые значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Измерения были проведены в октябре 2002 г., а также в январе и апреле — мае 2003 г. в дни с различным уровнем магнитной активности (индекс K_p изменялся от 1 до 7). Непрерывные регистрации огибающих помехи и ЧО сигналов в течение каждого из дней составляли не менее 5 ч. Отношение сигнал/шум по мощности превышало 3 (дневное время, высоты 80—90 км).

На рис. 4 приведены примеры временных зависимостей q , среднечасовых значений параметров неоднородностей и их средних квадратичных отклонений $\sigma = \sigma_x / \sqrt{N}$, где X — исследуемая величина, угловые скобки означают усреднение, N — количество усредняемых значений, для высоты 87 км. Большинство значений полуосей a и b лежали в пределах 100—200 м, что составляет $(0.8\text{--}1.5)\lambda_0$. Анизотропия выражена слабо ($a/b \approx 1.1\text{--}1.3$). 22 января наблюдалось уменьшение размеров неоднородностей в послеполуденные часы. Угол θ в течение дня изменялся от 40 до 140°. В исследуемые дни наблюдались большой относительный разброс его значений в течение часа и отсутствие четко выраженной ориентации большой полуоси. Время расплывания τ_c на протяжении измерений составляло 0.8—4 с. Абсолютная величина скорости лежала в пределах 10—60 м/с. Угол φ изменялся от 120 до 240°. Величина зональной составляющей скорости (восток — запад) варьировалась от -10 до 20 м/с. Меридиональная составляющая истинной скорости дрейфа (север — юг) в большинстве случаев превышала зональную и имела четко выраженное южное направление. Значение меридиональной составляющей изменялось от -5 до -55 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты согласуются с результатами измерений других авторов [2, 5, 7]. Слабая анизотропия облаков с отличной от фоновой электронной концентрацией, а также отсутствие четко выраженной ориентации подтверждает теоретические представления о почти изотропном характере амбиполярной диффузии (на высотах 70—90 км частота соударений ионов с нейтралами существенно больше гирочастоты ионов). Характерные времена расплывания облаков в результате диффузии и рекомбинации порядка 10^2 с, поэтому τ_c , по-видимому, в большей степени связано с хаотическими движениями неоднородностей. Оцененное значение стандартного отклонения хаотической скорости

движения $\sigma_v = \lambda_0 / (4\sqrt{2}\pi\tau_c)$ для определенных из эксперимента времен расплывания дифракционной картины составило около 2—9 м/с. Величина и направление скорости дрейфа определяются географией места измерения, временем года и суток, а также зависят от характеристик крупномасштабных волновых процессов. Нами отмечены некоторые суточные и сезонные вариации параметров неоднородностей. Величина скорости дрейфа меньше в дневные часы (12—15 ч), чем в утренние (9—11 ч), замечено некоторое увеличение направленной на юг меридиональной составляющей скорости дрейфа зимой и др. Зависимость параметров дрейфа от уровня магнитной активности, по-видимому, выражена слабо. Однако для адекватной количественной оценки суточных и сезонных зависимостей параметров неоднородностей необходимо проведение продолжительных и систематических измерений, охватывающих все сезоны года, и их анализ совместно с результатами, полученными мировой сетью радаров.

Работа выполнена при поддержке НТЦ Украины, проектное соглашение № 1773.

1. Гритчин А. И., Дорохов В. Л., Концевая Л. Г. и др. Стационарный комплекс аппаратуры для исследования нижней ионосферы методом частичных отражений // Вестник Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника.—1988.—№ 318.—С. 21—24.
2. Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Движения в ионосфере. — Новосибирск: Наука, 1979.—344 с.
3. Концевая Л. Г., Пивень Л. А. Установка для регистрации дрейфов ионосферной плазмы // Вестник Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника.—1988.—№ 318.—С. 27—28.
4. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8.—С. 59—106.
5. Manson A. H., Meek C. E., Hall G., McMurray R. Winds and waves from the Canadian prairies (CNSR) triple-MF radar system // Geophys. Res. Lett.—1993.—20.—P. 1375—1378.
6. Meek C. E. An efficient method for analyzing ionospheric drifts data // J. Atmos. Terr. Phys.—1981.—42.—P. 835—839.
7. Philips A., Manson A. H., Meek C. E., Llewellyn E. J. A long term comparison of middle atmosphere winds measured at Saskatoon 52° N 107° W by a medium frequency radar and a Fabry—Perot interferometer // J. Geophys. Res.—1994.—99.—P. 12.923—12.935.

DYNAMICAL PROCESSES IN THE LOWER IONOSPHERE

S. V. Panasenko, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov,
L. F. Chernogor

We consider the statistics on the envelopes of interference and signal plus interference in the output voltage of the demodulator in the MF radar receiver. The spaced antenna drift radar technique for dynamic studies of the mesosphere and lower thermosphere in a region of 70 to 120 km are described and the results are presented. Our results adequately represent physical processes in the lower ionosphere and are in agreement with other observational data.