

УДК 551.510.536

ВЫСОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В *E*-СЛОЕ ИОНОСФЕРЫ

А. В. Толмачёва, Н. В. Бахметьева, В. Д. Вяхирев, В. Н. Бубукина, Е. Е. Калинина

Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

В работе приведены результаты измерений электронной концентрации в *E*-области ионосферы методом, основанным на создании искусственных периодических неоднородностей ионосферной плазмы с двумя разными пространственными масштабами. Искусственные периодические неоднородности создавались излучением нагревного стенда «Сура» на частотах 4,7 и 5,6 МГц. Электронная концентрация определялась по отношению времён релаксации сигналов, обратно рассеянных искусственными периодическими неоднородностями при их зондировании пробными радиоволнами указанных частот. Обсуждаются особенности профилей электронной концентрации, полученных в 2006 и 2007 годах, в интервале высот 95÷115 км и анализируются их высотно-временные вариации.

ВВЕДЕНИЕ

Высотное распределение электронной концентрации в *E*-области ионосферы достаточно хорошо изучено. В дневные часы поведение *E*-области, как правило, весьма регулярно и контролируется зенитным углом Солнца [1]. Электронную концентрацию измеряют различными методами, в том числе «классическим» методом вертикального зондирования, методом некогерентного рассеяния и с помощью приборов, установленных на ракетах. На основании эмпирических данных и теоретических расчётов созданы глобальные модели электронной концентрации, например, IRI, СМИ-88, MSIS и др. [2–4], которые учитывают высотные, суточные, сезонные и широтно-долготные изменения, обусловленные как ионизирующим солнечным излучением, так и вариациями солнечной и магнитной активности. Эти модели отражают основные закономерности поведения *E*-области ионосферы.

Однако область мезосферы и нижней термосферы, частью которой является регулярный *E*-слой, характеризуется развитой динамикой, проявляющейся в высотно-временных вариациях атмосферных и ионосферных параметров. Распространение внутренних гравитационных и приливных волн, существование крупномасштабных неоднородностей ионосферной плазмы и спорадических слоёв ионизации, например, спорадического слоя *E*, расслоения регулярного *E*-слоя, — все эти явления приводят к значительным высотно-временным вариациям электронной концентрации.

Для исследования динамических явлений в *E*-слое результативным является метод резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. Метод был разработан в процессе исследования эффектов воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением и его взаимодействия с ионосферной плазмой, когда были экспериментально обнаружены искусственные периодические неоднородности электронной концентрации [5]. Они создаются полем мощной стоячей радиоволны, возникающей при интерференции падающей на ионосферу и отражённой волн. Метод резонансного рассеяния радиоволн основан на создании периодической структуры и последующем зондировании её короткими радиоимпульсами. При зондировании измеряются амплитуды и фазы сигналов, обратно рассеянных периодической структурой. Теоретическое изучение процессов развития и релаксации искусственных периодических неоднородностей позволило практически применить этот метод для диагностики ионосферных и

атмосферных параметров [6]. На его основе были разработаны способы и проведены измерения электронной концентрации в E - и F -областях ионосферы, температуры и плотности нейтральной атмосферы на высотах E -области, скоростей вертикальных движений на высотах $60 \div 120$ км, турбулентных скоростей до высоты турбопаузы, параметров внутренних гравитационных волн и характеристик спорадического слоя E . Основные результаты этих исследований представлены в работах [7–10]. Применение метода резонансного рассеяния позволяет осуществить комплексные измерения ионосферных и атмосферных характеристик этой области, а их совместный анализ позволяет исследовать как кратковременные, так и долговременные динамические процессы в верхней атмосфере.

Целью данной работы является обсуждение результатов экспериментальных исследований высотно-временных вариаций электронной концентрации в E -области ионосферы на высотах $95 \div 115$ км. Электронная концентрация определялась методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы по отношению времени релаксации сигналов, рассеянных периодическими структурами с двумя разными пространственными масштабами [11–13].

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДЕ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ИСКУССТВЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ

Искусственные периодические неоднородности формируются в поле стоячей волны в высотном интервале от нижней границы ионосферы (примерно 60 км) до высоты отражения от неё мощной радиоволны. В пучностях стоячей волны происходит нагрев электронного газа, и в результате возникают температурные неоднородности. Температурные неоднородности, в свою очередь, за время от десятых долей секунды до нескольких секунд формируют неоднородности электронной концентрации, в результате чего образуется периодическая структура с пространственным периодом, равным половине длины мощной радиоволны. Образование искусственных периодических неоднородностей в разных областях ионосферы обусловлено разными физическими процессами, преобладающими в той или иной области высот [6].

Искусственные периодические неоднородности можно обнаружить с помощью зондирования их короткими радиоимпульсами и измерения характеристик рассеянного ими сигнала. Рассеяние на периодических структурах (брегговское рассеяние) обладает резонансными свойствами: принимаемый обратно рассеянный сигнал максимален, когда сигналы от отдельных неоднородностей складываются синфазно. Условием резонансного рассеяния является соотношение $\lambda_2 = 2\Lambda \cos \theta$, где Λ — пространственный период неоднородностей, λ_2 — длина зондирующей волны, θ — угол падения волны на неоднородную структуру. Учитывая, что в случае обратного рассеяния $\theta = 0$ и $\Lambda = \lambda_1/2$ (λ_1 — длина возмущающей или нагревной волны), условием резонансного рассеяния будет равенство длин нагревной и зондирующей волн $\lambda_1 = \lambda_2$. Здесь λ_1 и λ_2 — длины волн в плазме, зависящие от показателя её преломления.

В настоящее время в НИРФИ большое внимание уделяется исследованиям физических процессов на высотах E -области ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях. Формирование и диагностика искусственных периодических неоднородностей, осуществляется мощными радиоволнами с одной и той же частотой и поляризацией. После прекращения воздействия на ионосферу величина возмущения электронной концентрации ΔN в периодических неоднородностях уменьшается вследствие разрушения неоднородностей в процессе амбиполярной диффузии [6]. Это приводит к последующему уменьшению амплитуды рассеянного сигнала на каждой высоте. Диффузионное время релаксации (время ис-

чезновения) неоднородностей

$$\tau = (K^2 D_a)^{-1} = \frac{M \nu_{\text{im}}}{K^2 \kappa (T_{e0} - T_{i0})}, \quad (1)$$

где $K = 2\pi/\Lambda$ — волновое число стоячей волны, D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, κ — постоянная Больцмана. Как видно из (1), на время релаксации искусственных неоднородностей влияет их пространственный масштаб Λ и коэффициент амбиполярной диффузии, который определяется характеристиками окружающей среды: электронной T_e и ионной T_i температурами, массой нейтральных молекул M и частотой соударений ионов с молекулами ν_{im} .

Исследование периодической структуры проводится на стадии её релаксации путём импульсного зондирования пробными волнами. При этом регистрируются амплитуды A и фазы φ рассеянных сигналов, приходящих с разных высот. По изменению амплитуды сигнала со временем определяется время релаксации τ рассеянного сигнала, характеризующее время жизни искусственных периодических неоднородностей после прекращения воздействия на ионосферу. Величина τ на каждой высоте определяется из соотношения $\ln A(t) = \ln A_0(t) - t/\tau$, т. е. соответствует времени уменьшения амплитуды принимаемого сигнала в e раз. По фазе рассеянного сигнала φ , временные вариации которой аппроксимируют зависимостью $\varphi(t) = \varphi_0 + bt$, где $b = 4\pi V/\lambda_1$, определяется скорость вертикального движения плазмы V , которая в нижней ионосфере равна скорости движения нейтральной компоненты [14].

Для определения профиля электронной концентрации на высотах 95–125 км используется способ, экспериментально реализованный в последние годы [11–13]. Для этого практически одновременно (каждые 15 с) создаются периодические структуры с двумя разными пространственными масштабами, что обеспечивается мощным воздействием на ионосферу радиоволнами с разными частотами. Зондирование каждой из этих периодических структур осуществляется также на «своей» частоте, т. е. на той, на которой она создана. В работе [11] подробно описана двухчастотная методика определения электронной концентрации. Показано, что отношение времён релаксации искусственных периодических неоднородностей, создаваемых при работе стенда «Сура» на двух разных частотах, зависит только от соотношения этих частот и плазменной частоты, что и позволяет определить электронную концентрацию. Приведены результаты расчётов отношения времён релаксации для частот 4,7 и 5,6 МГц, используемых в эксперименте, и найдено, что для этих частот электронная концентрация может быть определена, начиная со значений порядка $4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$. В [12, 13] приведены первые результаты реализации в эксперименте двухчастотного метода определения электронной концентрации. Приведены примеры полученных профилей $N(z)$ для измерений 6 октября 2006 года и показано, что двухчастотный метод позволяет с достаточно высокой точностью регистрировать тонкую структуру расслоений E -области, в том числе и спорадический слой E . Эксперименты были продолжены в 2007 году.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА. ИОНОСФЕРНЫЕ УСЛОВИЯ

В данной работе представлены и обсуждаются результаты определения электронной концентрации в E -области ионосферы в дневное время суток 4 октября 2006 года, 30 марта, 24 и 26 сентября 2007 года. Методика эксперимента подробно описана в [11, 15]. Формирование искусственных периодических неоднородностей проводилось радиоволнами, излучаемыми мощными передатчиками стенда «Сура» ФГНУ НИРФИ (55,1° с. ш., 46,1° в. д.) поочередно на двух частотах: 4,7 и 5,6 МГц. Воздействие на ионосферу осуществлялось радиоизлучением необыкновенной поляризации. Передатчики работали попеременно на каждой из двух частот в течение 15 секунд. Каждый 15-секундный период включал непрерывную работу передатчиков в течение

3 секунд для создания искусственной периодической структуры и последующую паузу продолжительностью 12 секунд. Во время паузы передатчиками стенда «Сура» синфазно излучались зондирующие импульсы длительностью 30 мкс с частотой повторения 50 Гц. В одном цикле нагрева излучались радиоволны на частоте 4,7 МГц, в другом — на частоте 5,6 МГц. Приём обратно рассеянных сигналов осуществлялся на тех же частотах с помощью установки для исследования ионосферы методом частичных отражений. Амплитуды A и фазы φ обратно рассеянных сигналов регистрировались с шагом по высоте 1,4 км.

Эксперименты проводились в спокойных гео-гелиофизических условиях. Самое большое число солнечных пятен, равное 16, зафиксировано 4 октября 2006 года, трёхчасовые K_p -индексы в периоды наблюдений были менее 3. Состояние ионосферы контролировалось автоматической ионосферной станцией «Базис», ионограммы снимались каждые 6÷10 минут. Критические частоты слоя F_2 , как правило, были выше, чем вторая рабочая частота 5,6 МГц, что обеспечивало отражение нагревной и пробной радиоволн от ионосферы и создание искусственных периодических неоднородностей на обеих частотах. В период времени 14:10÷14:30 MSK 24 сентября 2007 года критическая частота для необыкновенной волны f_{xF_2} была меньше рабочей частоты 5,6 МГц, и создать периодическую структуру мощным радиоизлучением на частоте 5,6 МГц было невозможно¹. В этот период времени электронная концентрация не была определена. В течение почти половины времени наблюдений 26 сентября 2007 года частота мощного передатчика 5,6 МГц была близка к критической частоте слоя F_2 или превышала её. Это ухудшало условия отражения мощной волны, и, в конечном итоге, приводило к уменьшению уровня рассеянного сигнала на частоте 5,6 МГц и уменьшению отношения сигнал/шум, что затрудняло или делало невозможным использование двухчастотного метода определения профиля $N(z)$.

Во время осенних экспериментов на высотах 98÷100 км часто наблюдался спорадический слой E_s . Например, 4 октября 2006 года слабый полупрозрачный спорадический слой E появился вскоре после полудня, его предельная частота отражения в предвечерние часы составила 2,8÷3,0 МГц. 24 сентября 2007 года спорадический слой E начал формироваться после 13 часов и фиксировался далее в течение всего периода наблюдений. Его предельная частота отражения превышала 3 МГц, а 26 сентября 2007 года предельная частота отражения слоя E_s превышала в отдельные часы 4 МГц. Кроме того, в этот день около 14 часов в течение 25 минут регистрировался полупрозрачный спорадический слой E с предельной частотой отражения до 7 МГц, образовавшийся не непосредственно над пунктом наблюдения, а пересекавший диаграмму направленности приёмной антенны. В работе [15] оценена эффективная горизонтальная скорость этого слоя, которая составила 20÷25 м/с. В результате отражения мощной волны от этого слоя амплитуда обратно рассеянного искусственными периодическими неоднородностями сигнала выросла до максимальной величины, регистрируемой приёмной аппаратурой. Соответственно увеличилось время релаксации рассеянного сигнала. Таким образом, во время экспериментов наблюдалась в целом спокойная ионосферная ситуация с не очень интенсивными (как правило, полупрозрачными) спорадическими слоями ионизации.

3. ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОТНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В E -ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

По характеру высотной зависимости полученные профили $N(z)$ можно разделить на несколько типов.

- 1) «Классические» профили $N(z)$, чаще всего наблюдавшиеся в околополуденные часы. Для

¹ Здесь и далее указывается московское время.

них характерна плавная высотная зависимость $N(z)$, близкая к моделям регулярного E -слоя. Величина электронной концентрации в максимуме слоя, который находился в интервале высот $104 \div 112$ км, составляла $N \sim (1,1 \div 1,2) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ (соответствующая ей критическая частота E -области $f_{0E} \sim 3,0 \div 3,1$ МГц). Такие профили показаны на рис. 1а для 30 марта 2007 года. Гладкие профили со слабо выраженными спорадическими слоями для сеансов 13:30 и 13:40 24 сентября 2007 года показаны на рис. 1б (слабый слой E_s на высоте 101 км).

2) Профили $N(z)$ с ярко выраженными спорадическими слоями E . На рис. 2 приведены такие профили для 4 октября 2006 года в сеансе 12:35 и 26 сентября 2007 года в сеансе 13:55. На профиле $N(z)$ в 13:55 на рис. 2б виден спорадический слой на высоте 101 км с концентрацией в максимуме слоя $N = 1,39 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. После 15 часов, когда спорадический слой был унесён горизонтальным ветром из диаграммы направленности приёмно-регистрирующей установки [15], электронная концентрация на высоте 100 км уменьшилась и профиль приобрёл типичный вид для E -области.

3) Профили $N(z)$ с нерегулярными изменениями электронной концентрации («возмущённые»). К ним можно отнести показанные на рис. 3а профили с расслоениями в максимуме слоя 4 октября 2006 года в сеансах 12:45 \div 13:05 и профили с волнообразным характером изменения $N(z)$, приведённые на рис. 3б для сеансов 14:10 и 14:45 24 сентября 2007 года.

4) Профили с незначительными вариациями электронной концентрации на высотах $95 \div 105$ км, пример которых для трёх сеансов наблюдений 24 сентября 2007 года приведён на рис. 3в.

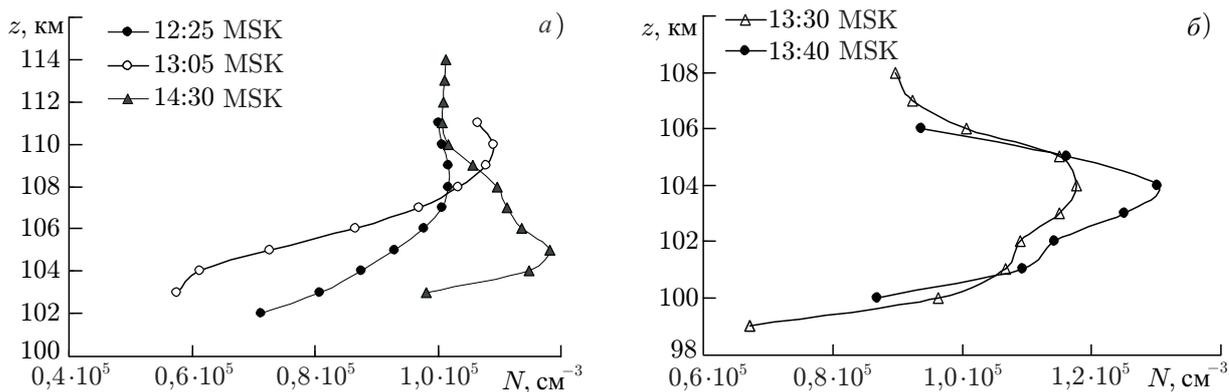


Рис. 1. Примеры профилей с регулярными изменениями электронной концентрации по высоте от 30.03.2007 (а) и 24.09.2007 (б)

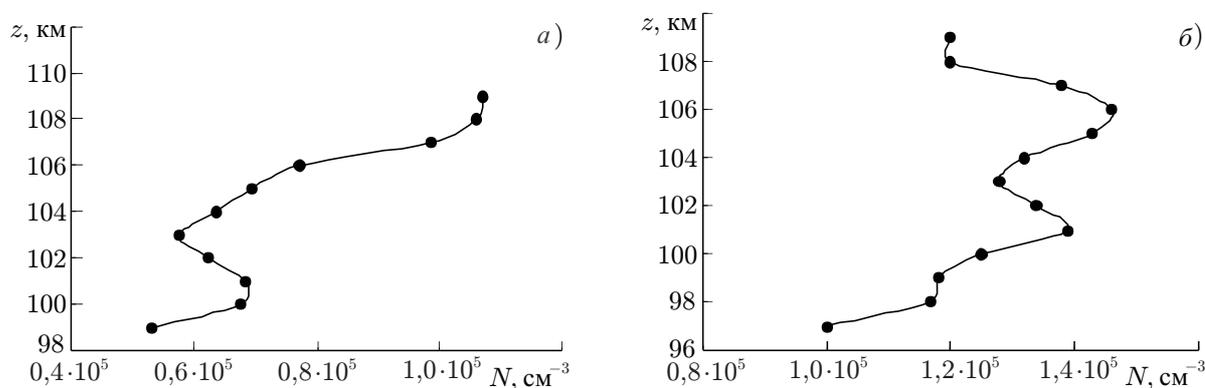


Рис. 2. Примеры профилей электронной концентрации с ярко выраженными спорадическими слоями E от 12:35 MSK 04.10.2006 (а) и 13:55 MSK 26.09.2007 (б)

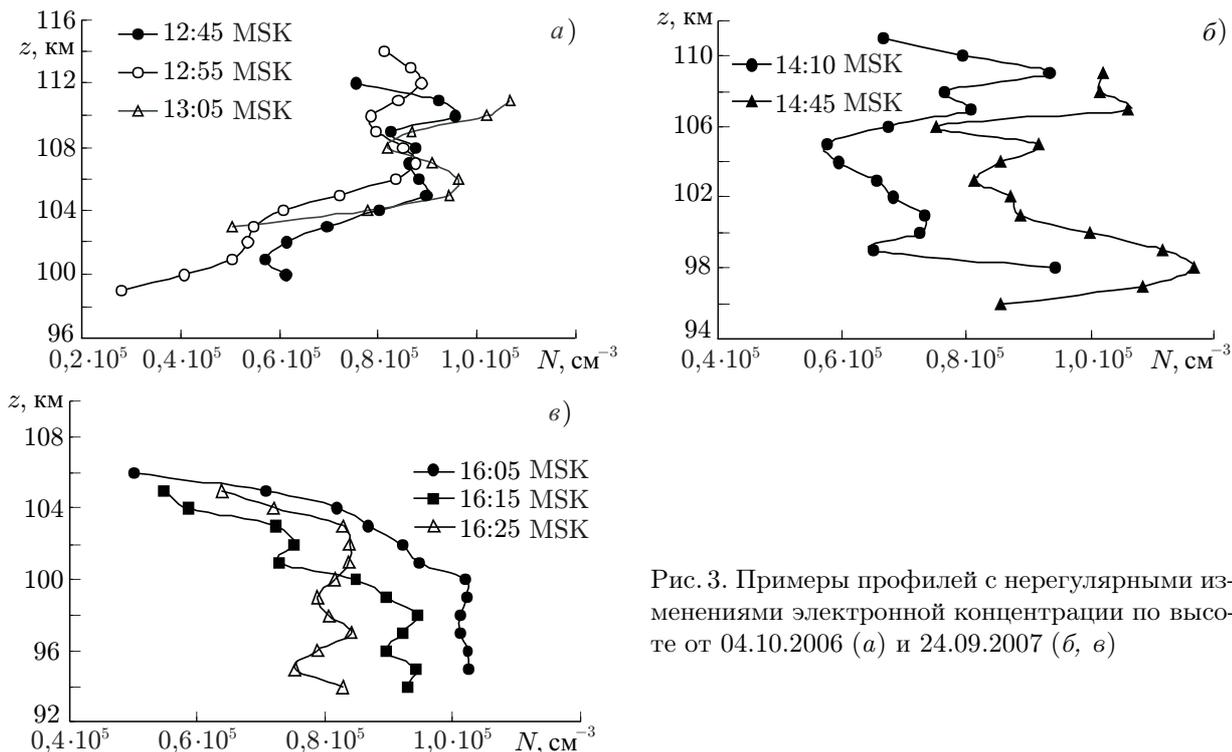


Рис. 3. Примеры профилей с нерегулярными изменениями электронной концентрации по высоте от 04.10.2006 (а) и 24.09.2007 (б, в)

Отметим, что в наблюдениях 24 сентября 2007 года, которые проводились непрерывно более 4 часов, начиная с полудня, были видны все перечисленные выше особенности профилей электронной концентрации. К группе «гладких» профилей относятся близкие к полудню данные (между 13 и 14 часами), приведённые на рис. 1. Отметим плавную высотную зависимость $N(z)$ с максимумом на высоте $102 \div 104$ км. Величина электронной концентрации в максимуме E -слоя составила $N = (1,1 \div 1,3) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, что соответствует плазменной частоте $f_{0E} = 3,0 \div 3,2$ МГц. Близкие значения $f_{0E} = 3,0 \div 3,1$ МГц получены и при вертикальном зондировании с помощью автоматической ионосферной станции. «Ступенька» на высоте 101 км на рис. 1б соответствует спорадическому слою E с электронной концентрацией $(1,1 \div 1,15) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, расположенному ниже высоты максимума E -области. После 14 часов высотная зависимость электронной концентрации изменилась и плавный характер изменений $N(z)$ сменился нерегулярными вариациями (см. рис. 3б). В этот период максимальная концентрация электронов достигалась на высоте около 98 км, и в сеансе 14:45 была равна $N = 1,15 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.

Высотные зависимости для предвечерних часов 24 сентября 2007 года в интервале 16:00 ÷ 16:30 показаны на рис 3в. Видно, что концентрация электронов на высоте 100 км постепенно снижалась: от величины порядка $1,04 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ в сеансе 16:05 до $8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ в сеансе 16:25. Уменьшение N по сравнению с околополуденными часами связано с естественной суточной вариацией электронной концентрации. В конце периода наблюдений в 16:35 косинус зенитного угла Солнца увеличился по сравнению с полуденным периодом в 1,62 раза, максимальная концентрация электронов на высоте 100 км уменьшилась приблизительно в 1,65 раза, а на высоте 106 км — в 1,67 раза². При этом в предвечерние часы (после 16:00) толщина слоя E несколько увеличилась.

В сеансе 16:25 концентрация электронов ниже 100 км менялась мало: в интервале высот $94 \div 102$ км она была близка к величине $8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, а соответствующая ей плазменная частота $f_{0E} = 2,5$ МГц. По данным автоматической ионосферной станции зарегистрировано близкое

² Как известно, вариации электронной концентрации в E -области следуют зенитному углу Солнца [1].

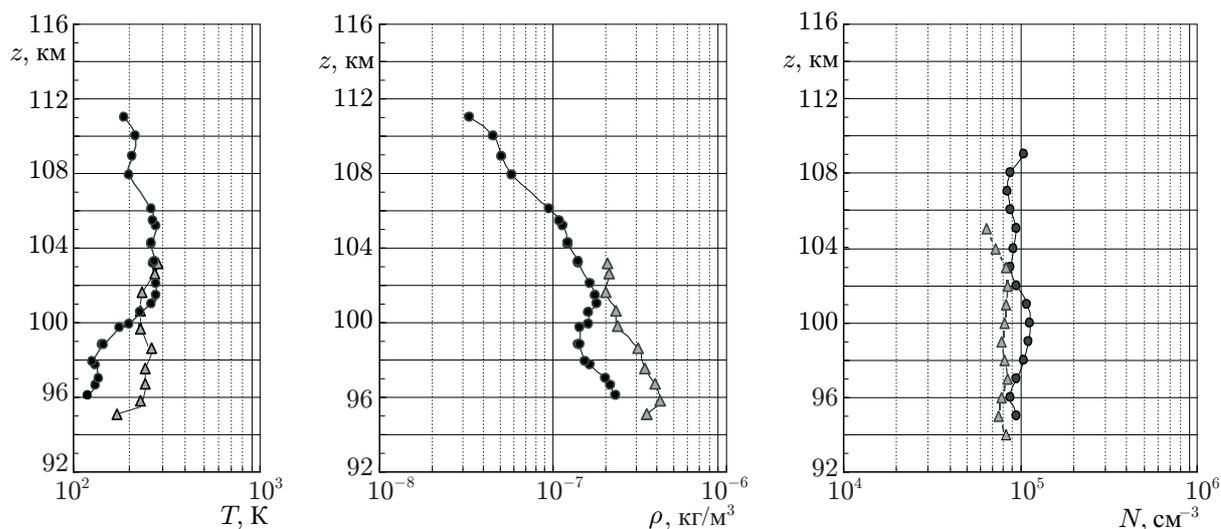


Рис. 4. Высотные профили температуры нейтральной компоненты T (слева), плотности атмосферы ρ (в центре) и электронной концентрации N (справа) для двух сеансов 24 сентября 2007 года: 15:05 MSK (точки) и 16:25 MSK (треугольники)

к этому значению 2,4 МГц. Таким образом, динамика электронной концентрации в E -области обусловлена её естественным суточным ходом и более кратковременными вариациями.

Процессы, происходящие в вечерние часы, отразились также и на поведении атмосферных параметров, что иллюстрирует рис. 4. На рис. 4 в логарифмическом масштабе показаны высотные изменения электронной концентрации, температуры и плотности нейтральной атмосферы за период времени 15:00÷16:30. По горизонтальной оси отложены: температура атмосферы T (кривые слева), плотность атмосферы ρ (кривые в центре) и электронная концентрация N (кривые справа).

Обращает на себя внимание, во-первых, тенденция к смещению вниз всех профилей ионосферных и атмосферных параметров после 15 часов, во-вторых, значительное возрастание температуры и плотности ниже 100 км и, в-третьих, волнообразный характер приведённых высотных зависимостей.

4. ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Временные вариации характеристик сигналов, рассеянных искусственными периодическими неоднородностями, для осени 2007 года подробно обсуждались в [15]. Зафиксировано влияние на амплитуду и время релаксации рассеянного сигнала спорадического слоя E и атмосферных волн. В данной работе рассмотрим временные вариации электронной концентрации, определённой по результатам измерений времён релаксации рассеянных сигналов на двух частотах в этом же эксперименте.

Практически непрерывный ряд данных по электронной концентрации за более чем трёхчасовой интервал получен 24 октября 2007 года. Наиболее отчётливо вариации $N(t)$ проявлялись на высоте 100 км, т. е. приблизительно на высоте максимума слоя E_s . На рис. 5а показаны зависимости от времени электронной концентрации N на этой высоте (левая шкала) и времени релаксации τ на частоте 4,7 МГц (правая шкала). Для удобства время отложено по оси абсцисс в минутах, начиная с 13:00. Пропуск данных обусловлен уменьшением критической частоты слоя F_2 и отсутствием в связи с этим данных на второй частоте 5,6 МГц. Даже без специальной обработки на графике хорошо заметны получасовые вариации электронной концентрации на высоте

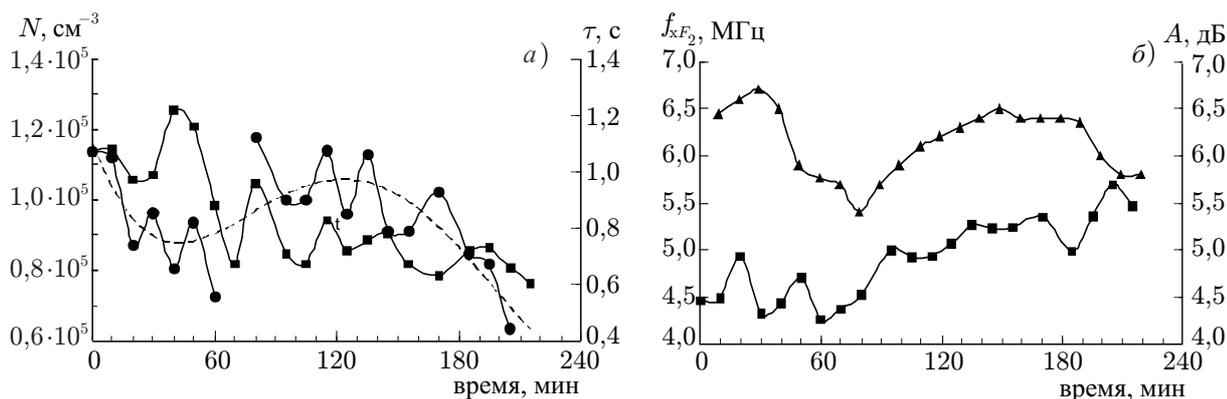


Рис. 5. Временные вариации электронной концентрации (точки) и времени релаксации рассеянного сигнала (квадраты) на высоте 100 км (а); амплитуды рассеянного сигнала (квадраты) и критической частоты слоя F_2 (треугольники) для необыкновенной компоненты мощной волны (б) для 24 сентября 2007 года. Пунктиром показана аппроксимирующая кривая для электронной концентрации

100 км. Амплитуда этих вариаций изменяется в пределах $8 \div 10$ %. Хорошо видны также получасовые колебания времён релаксации искусственных периодических неоднородностей. Таким образом, изменения концентрации ионосферной плазмы вносят значительный, если не определяющий, вклад в изменения времени релаксации сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями. Различия в характере вариаций электронной концентрации N и времени релаксации τ обусловлены, по нашему мнению, изменениями атмосферных параметров — плотности нейтральной компоненты ρ и температуры нейтралов T (см. соотношение (1)). На рис. 5а пунктиром на зависимости $N(t)$ показана линия полиномиального тренда шестого порядка, на ней видна двухчасовая вариация электронной концентрации, обусловленная, вероятно, изменениями в слое F_2 . Это видно из сравнения временной зависимости электронной концентрации с зависимостью от времени максимальной частоты отражения необыкновенной волны f_{xF_2} от слоя F_2 и амплитуды рассеянного сигнала A на частоте 4,7 МГц³, показанной на рис. 5б. Двухчасовая вариация значительно слабее выражена во временном ходе $\tau(t)$, и скорее всего, связана не с концентрацией электронов, а с изменениями полного содержания электронов в столбе.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

Приведённые выше экспериментальные результаты измерения электронной концентрации для 24 сентября 2007 года отражают выраженную динамику E -области.

Методом резонансного рассеяния радиоволн наблюдались высотные профили электронной концентрации, которые можно отнести к «спокойным», а также профили, имеющие неоднородную структуру и волновую компоненту. Как и следовало ожидать, существуют регулярные изменения электронной концентрации, связанные с высотой Солнца над горизонтом, и нерегулярные временные и высотные вариации. Выделены получасовые колебания $N(z)$, наиболее наглядно проявляющиеся на высоте порядка 100 км. Существует также более длительная (около двух часов) вариация, соответствующая, по-видимому, изменениям концентрации в вышележащем слое F_2 .

Рассмотрим факторы, которые могут влиять на состояние ионосферы и атмосферы в высотном интервале $95 \div 125$ км. К ним относятся: спорадические слои и их неоднородная структура, горизонтальные движения плазменных неоднородностей со скоростью нейтрального ветра,

³ Здесь амплитуда дана в единицах $A_{\text{дБ}}/10$.

распространение внутренних гравитационных волн различных масштабов, изменение скоростей химических реакций и, как следствие, например, коэффициента рекомбинации.

Предположим, что временные вариации $N(t)$ на высоте 100 км 24 сентября 2007 года связаны с движениями в нижней ионосфере, как это наблюдалось, например, 26 сентября 2007 года для перемещавшегося через диаграмму направленности приёмной антенны спорадического слоя E . Если слой E_s является полупрозрачным (т. е. пространственно неоднородным) и движется с некоторой горизонтальной скоростью, то сигналы, обратно рассеянные искусственными периодическими неоднородностями, будут формироваться областями с разной ионизацией вследствие облачной (пэтчевой) структуры слоя. В этом случае амплитуды обратно рассеянных сигналов от областей с повышенной ионизацией должны быть больше. Обратно рассеянные сигналы принимаются из области, по размеру близкой к радиусу первой зоны Френеля. Он составляет $2,5 \div 4$ км на частотах 5,6 и 4,7 МГц. Если спорадический слой E движется с горизонтальной скоростью около 25 м/с (как наблюдалось, например, 26 сентября 2007 года [15]), то за 10 минут — а высотные зависимости параметров определялись при усреднении τ за такой интервал времени — неоднородный спорадический слой переместится на 15 км, а величина электронной концентрации в области формирования рассеянного сигнала изменится. Если есть движение таких неоднородностей на уровне 100 км, то на данной высоте должны наблюдаться временные вариации амплитуд обратно рассеянных сигналов $A(t)$ с таким же периодом. На графике представленной на рис. 5б временной зависимости амплитуды рассеянного сигнала от времени на частоте 4,7 МГц на высоте 100 км видны вариации амплитуды порядка 10 % от средней величины, но они не соответствуют по времени вариациям $N(t)$. Это может означать, что размеры крупных облаков ионизации в слое E_s (пэтчей) были по крайней мере не меньше 15 км. Более продолжительные изменения скорее соответствует изменениям критической частоте слоя F_2 для необыкновенной компоненты $f_{x F_2}$.

Вариации $A(t)$, заметные на рис. 5б, по-видимому, могут быть обусловлены другими причинами. Интенсивность (и амплитуда) принимаемого сигнала зависит не только от фоновой концентрации электронов в области рассеяния, но и в значительной степени от величины изменения концентрации ΔN в искусственных периодических неоднородностях. Величина ΔN определяется интенсивностью стоячей волны, в частности, условиями отражения мощной волны от F -области ионосферы. Эти условия могут изменяться со временем, например, из-за изменений концентрации плазмы на уровне отражения вследствие пространственных градиентов и/или естественных неоднородностей на этой высоте.

Получасовые вариации $N(z)$ и времени релаксации τ , наблюдавшиеся 24 и 26 сентября 2007 года, с наибольшей вероятностью связаны с распространением внутренних гравитационных волн через исследуемую область ионосферы. Наличие распространяющихся гравитационных волн в исследуемом интервале было установлено путём анализа спектров временных вариаций скорости вертикального движения, амплитуды и времени релаксации рассеянных сигналов [15, 16]. Спектральный анализ показал, что наибольшую интенсивность (в зависимости от условий распространения) имели волны с получасовым и часовым периодами, и такие волны стабильно регистрируются. Спектральным анализом выявлены также и волны меньших периодов, но при усреднении данных по интервалу $10 \div 15$ минут, которое использовалось для определения электронной концентрации, эти периоды исчезают. Сделанные на основе теории сдвиговой гидродинамической неустойчивости [16] оценки, приводят к выводу об устойчивом распространении внутренних гравитационных волн с такими периодами в горизонтально стратифицированной среде.

Возникновение высотно-временных вариаций электронной концентрации, таких, как, например, на профилях $N(z)$ с нерегулярным изменением по высоте (рис. 3б), возможно, связано с развитием гидродинамических неустойчивостей непосредственно в исследуемой области высот.

Этот вопрос подробно обсуждается в работе [16]. Поскольку в рассматриваемом высотном интервале плазма является пассивной примесью, то вариации плотности нейтральной атмосферы должны приводить и к изменениям электронной концентрации.

Теоретически вариации электронной концентрации могут быть также вызваны изменениями коэффициента рекомбинации вследствие естественных изменений температуры нейтральной атмосферы. Как показано в работе [17], коэффициент рекомбинации электронов с ионами зависит от температуры нейтральной атмосферы, что вызывает изменение концентрации электронов. При этом $f_{oE} \propto T^{-1/8}$ и, соответственно, $N \propto T^{-1/4}$. В этом случае справедливо соотношение $N_1/N_2 = (T_1/T_2)^{-1/4}$. Однако временные вариации атмосферных параметров на высоте 100 км не коррелировали с изменениями электронной концентрации и проведённые оценки отношений температур и электронных концентраций не дают приведённого соответствия между ними. На наш взгляд, наблюдаемые вариации N связаны скорее с процессами переноса, в первую очередь, с распространением атмосферных волн. В этом случае в уравнении ионизационно-рекомбинационного баланса необходимо учитывать член, характеризующий движения.

Таким образом, по результатам измерения электронной концентрации на высотах E -области ионосферы в осенний и весенний периоды можно сформулировать следующие выводы.

1) В спокойных условиях (в отсутствие атмосферных возмущений) наблюдается «классический» профиль электронной концентрации в E -области ионосферы.

2) Как и следовало ожидать, уменьшение средней электронной концентрации от полудня к вечеру происходит в соответствии с изменениями уровня ионизирующей солнечной радиации (с изменением косинуса зенитного угла Солнца).

3) Получасовые временные вариации $N(t)$ и $\tau(t)$, наблюдавшиеся в сентябре 2007 года в течение более 3 часов, по-видимому, связаны с устойчивым распространением внутренних гравитационных волн.

4) Профили с «неоднородной» структурой могут быть результатом развития неустойчивости среды.

6. ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ И НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Погрешность измерений электронной концентрации двухчастотным методом оценивалась нами в [11]. Напомним, что на её величину влияют два фактора. Первый связан с особенностями регистрации амплитуды принимаемого сигнала и её предварительной обработкой для определения времени релаксации рассеянных сигналов. Второй фактор относится к условиям измерений, таким как уровень помех, турбулентность, естественные вариации ионосферных и атмосферных параметров.

Для уменьшения влияния естественного фактора применялось усреднение данных, как правило, за 10 мин (это $15 \div 20$ реализаций). Это позволяло уменьшить погрешность определения времени релаксации до $3 \div 5$ %. На краях высотного интервала измерений погрешность возрастала до 8 %. Как показано в [11], с учётом обоих факторов, ошибки измерений электронной концентрации не превышали 10 %.

Электронная концентрация определялась в высотном интервале $95 \div 125$ км. Ограничение по высоте сверху не является принципиальным, т. к. обусловлено параметрами оборудования: эффективной мощностью нагревного стенда, коэффициентом усиления приёмной антенны и т. п. При улучшении этих параметров верхняя граница определения N в принципе может быть увеличена за счёт увеличения отношения сигнал/шум, что позволит измерить электронную концентрацию в области межслоевой $E-F$ впадины. Ограничение по высоте снизу является принципиальным. Оно обусловлено ионосферными явлениями, в частности, турбулентностью. По мере

приближения к высоте турбопаузы, т. е. границе турбулентной области, ошибка определения N нарастает. Это является следствием уменьшения времени релаксации в турбулентной зоне по отношению к диффузионному времени [6, 11]. Обычно реализации с явным влиянием турбулентности из дальнейшего анализа исключались.

Косвенным критерием достоверности определения N в нижней части высотного интервала может служить результат определения атмосферных параметров, например, температуры нейтральной атмосферы $T(z)$ [9]. Для её определения необходимо знание профиля электронной концентрации и высотной зависимости времени релаксации. При двухчастотных измерениях температура может быть определена по высотным зависимостям $\tau(z)$ как на одной, так и на второй частоте и, естественно, на данной высоте должна быть одной и той же. Если имеется расхождение значений T , полученных на частотах 5,6 и 4,7 МГц на высотах 95÷100 км, то оно связано с погрешностью определения N . Ниже высоты турбопаузы, где турбулентная диффузия преобладает над амбиполярной, предложенная процедура нахождения профиля $N(z)$ не применима.

Некоторое влияние на точность определения электронной концентрации может оказать задание начального профиля $N(z)$ в методе последовательных приближений при расчёте профиля по отношению времён релаксации на двух частотах и пересчёте действующих высот в истинные.⁴ Моделирование, проведённое с использованием нескольких различных начальных профилей концентрации, показало, что вид начального профиля мало влияет на конечный результат по сравнению с факторами, рассмотренными выше.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод создания искусственных периодических неоднородностей на двух частотах позволяет определять профиль электронной концентрации в E -области ионосферы. Измерения этим методом позволяют получать как гладкие стандартные профили, так и наблюдать тонкую структуру (расслоения) E -области, с достаточно высокой точностью определять концентрацию спорадического слоя E и E -области. Погрешность определения $N(z)$ не превышает 10 %. Знание реального профиля $N(z)$ позволяет изучать вариации времён релаксации искусственных периодических неоднородностей, связанные как с изменениями электронной концентрации, так и обусловленные атмосферной динамикой. И, наконец, знание реального профиля электронной концентрации способствует более качественному решению задачи определения атмосферных параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-02-97036, 09-05-00450 и 11-02-97028).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М. Солнце и ионосфера. М.: Наука, 1969. 455 с.
2. International Reference Ionosphere IRI-2007. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html.
3. Справочная модель ионосферы СМИИ-88. Комитет по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Министерства экологии и природных ресурсов РФ. ИЭМ, 1990.
4. MSIS-E-90 Atmosphere Model. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html.
5. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 22, вып. 10. С. 497.

⁴ При измерениях характеристик рассеянного сигнала регистрируется его действующая высота, а расчёты электронной концентрации проводятся для истинных высот отражения от ионосферы.

6. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Толмачёва А. В., Бахметьева Н. В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999. 156 с.
7. Бенедиктов Е. А., Вяхирев В. Д., Толмачёва А. В. // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37, № 5. С. 79.
8. Бенедиктов Е. А., Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Толмачёва А. В. // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37, № 5. С. 88.
9. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Толмачёва А. В. // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 1. С. 102.
10. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Григорьев Г. И., Толмачёва А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 3. С. 233.
11. Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Калинина Е. Е., Толмачёва А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 9. С. 744.
12. Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Бубукина В. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 6. С. 477.
13. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Толмачёва А. В. // Тр. 22 Всероссийской конф. по распространению радиоволн, 2008, Ростов-на-Дону. Т. 2. С. 129.
14. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974. 257 с.
15. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Егерев М. Н., Толмачёва А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 2. С. 77.
16. Бахметьева Н. В., Григорьев Г. И., Толмачёва А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 11. С. 695.
17. Гивишвили Г. В., Лещенко Л. Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т. 35, № 3. С. 166.

Поступила в редакцию 7 июля 2011 г.; принята в печать 27 июля 2011 г.

ALTITUDE–TIME VARIATIONS IN THE ELECTRON NUMBER DENSITY IN THE IONOSPHERIC *E* LAYER

A. V. Tolmacheva, N. V. Bakhmet'eva, V. D. Vyakhirev, V. N. Bubukina, and E. E. Kalinina

We present the results of measuring the electron number density in the ionospheric *E* layer by a method based on the creation of artificial periodic irregularities of the ionospheric plasma with two different spatial scales. Artificial periodic irregularities were created by the radiation of the Sura heating facility at frequencies 4.7 and 5.6 MHz. The electron number density was determined by the ratio of relaxation times of the signals backscattered by artificial periodic irregularities during their sounding by probing radio waves at the mentioned frequencies. Features of the electron-density profiles obtained in 2006 and 2007 in the altitude range 95–115 km are discussed and their altitude–time variations are analyzed.