

Определение эффективной частоты столкновений электронов в нижней ионосфере Земли по данным анализа радиозатменных измерений

В.Н. Губенко¹, В.Е. Андреев¹, И.А. Кириллович¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН 141190, г. Фрязино, Московская область, пл. Введенского, 1
E-mail: gubenko@fireras.su, vngubenko@gmail.com

Изучение столкновений между электронами и нейтральными молекулами представляет особый интерес для физики ионосферы Земли. В частности, важно выяснить роль, которую они играют в ослаблении радиоволн при распространении внутри D- и E-областей ионосферы, а также определить токовые системы и ионосферную проводимость. Нами разработан метод восстановления вертикальных профилей коэффициента поглощения дециметровых (длина волны ~19 см) радиоволн, базирующийся на решении обратной задачи о поглощении сигнала в ионосфере планеты. По результатам анализа радиозатменных измерений спутников FORMOSAT-3/COSMIC были определены высотные профили коэффициента поглощения дециметровых (ДМ) радиоволн в ионосфере Земли во время магнитной бури 22–23 июня 2015 года. Известно, что величина коэффициента поглощения на данной фиксированной частоте прямо пропорциональна произведению электронной плотности и частоты столкновений электронов с ионами и нейтральными частицами. Используя полученные данные о вертикальных профилях коэффициента поглощения ДМ-сигнала и электронной плотности, восстановленных из анализа радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC, была оценена эффективная частота столкновений электронов в D- и E-областях высокоширотной ионосферы Земли. Проведенные исследования в ионосфере планеты представляют большой практический интерес для радиосвязи и навигации, а также важны для анализа динамики космической погоды.

Ключевые слова: радиозатменные измерения, поглощение радиоволн, ионосфера Земли, эффективная частота столкновений электронов

Determination of the effective collision frequency of electrons in the Earth's lower ionosphere according to analysis of radio occultation measurements

V.N. Gubenko¹, V.E. Andreev¹, I.A. Kirillovich¹

¹ Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Fryazino branch)

The study of collisions between electrons and neutral molecules is of particular interest for the physics of the Earth's ionosphere. In particular, it is important to clarify the role they play in attenuating radio waves propagating within the D- and E-regions of the ionosphere, as well as to determine current systems and ionospheric conductivity. Based on solving the inverse problem of signal absorption in the planet's ionosphere, we have developed a method for reconstructing vertical profiles of the absorption coefficient of decimeter (wavelength ~19 cm) radio waves. Using the results of the analysis of radio occultation measurements from the FORMOSAT-3/COSMIC satellites, the altitude profiles of the absorption coefficient of decimeter (DM) radio waves in the Earth's ionosphere during the magnetic storm on June 22–23, 2015 were determined. It is known that the value of the absorption coefficient at a given fixed frequency is directly proportional to the product of the electron density and collision frequency of electrons with ions and neutral particles. Using obtained data on the vertical profiles of the DM signal absorption coefficient and electron density, reconstructed from the analysis of radio occultation measurements by FORMOSAT-3/COSMIC satellites, the effective collision frequency of electrons in the D- and E-regions of the Earth's high-latitude ionosphere was estimated. These studies

in the planet's ionosphere are of great practical interest for radio communications and navigation, and they are also important for analyzing the dynamics of space weather.

Keywords: radio occultation measurements, radio wave absorption, Earth's ionosphere, effective collision frequency of electrons

Введение

Радиозондирование ионосферы Земли может быть осуществлено с использованием как искусственных, так и естественных источников радиоизлучения, расположенных за пределами ионосферы. Дециметровые радиоволны достаточно высокой частоты, посланные с борта навигационного спутника, проходят через ионосферу насквозь и могут быть приняты на поверхности Земли или на борту другого (низкоорбитального) спутника. Интегральное содержание электронов вдоль траектории радиолуча можно определить по измерениям фазового пути (эйконала) принятого сигнала. Наблюдения за вариациями интенсивности спутникового сигнала или космического радишума, прошедшего через ионосферу, указывают на вариации поглощения радиоволн и, следовательно, на вариации содержания электронов и их частоты соударений в нижней ионосфере планеты [1–4]. При радиозатменном зондировании ионосферы применяются рабочие GPS-частоты, значительно превышающие собственные частоты ионосферы, что делает радиозатменный метод не зависящим от состояния ионосферы. Это обстоятельство выгодно отличает его от традиционных методов исследования ионосферы отражёнными радиоволнами, где применяются волны с частотами, близкими к плазменной, на распространение которых ионосфера оказывает сильное влияние. Вторжение энергичных частиц в периоды геомагнитных возмущений приводит к увеличению электронной плотности в нижних слоях ионосферы и возрастанию поглощения радиоволн, что делает невозможным применение указанных традиционных методов при интенсивных возмущениях [5]. Предлагаемый нами метод зондирования является эффективным как раз тогда, когда надобность в исследованиях ионосферы ощущается особенно остро, например, во время сильных магнитных бурь. Изучение столкновений свободных электронов с нейтралами и ионами важно для анализа различных макроскопических явлений. В интервале высот E -области эти столкновения определяют тепловую и электрическую проводимость плазмы и токовых систем, которые порождают геомагнитные возмущения [6].

До настоящего времени радиозатменные измерения не использовались для исследования поглощения радиоволн на GPS-частотах и определения частоты столкновений электронов в нижней ионосфере Земли. Это было обусловлено тем, что в спокойной геомагнитной обстановке, по данным анализа радиозатменных измерений, имели место только слабые возмущения в E - и D -областях ионосферы без каких-либо признаков поглощения радиоволн [1]. Анализ радиозатменных измерений продемонстрировал слои повышенного поглощения ДМ-сигнала в ионосфере, которые были обусловлены сильными изменениями геомагнитных условий во время бури в июне 2015 года и мощными всплесками рентгеновского излучения, наблюдающимися в это время [3]. Поскольку рабочие GPS-частоты существенно превышают критическую частоту ионосферы, то в радиозатменных измерениях регистрируется неотклоняющее поглощение [5]. Существенное превышение над критической частотой важно для обеспечения надёжных измерений в условиях повышенного поглощения радиоволн во время сильных магнитных бурь.

Цель настоящей работы заключается в восстановлении и анализе вертикальных профилей эффективной частоты столкновений электронов в D - и E -областях высокоширотной ионосферы Земли по результатам обработки радиозатменных спутниковых измерений *FORMOSAT-3/COSMIC* во время магнитной бури 22–23 июня 2015 года.

Метод определения эффективной частоты соударений электронов в ионосфере

Предыдущие наши работы [1–3] посвящены анализу радиозатменных измерений, проведённых с помощью навигационных *GPS* и низкоорбитальных *FORMOSAT-3/COSMIC* спутников в ионосфере Земли во время магнитной бури 22–23 июня 2015 года. Анализируемые сеансы (~100 сеансов) измерений были выполнены на широтах от ~65° до ~88° с.ш. и охватывали интервал высот от ~50 до ~110 км. Каждый из этих сеансов содержал зависимости эйконала (фазового пути) и мощности сигнала (диапазон L_1 , длина волны ~19 см) от высоты перигея луча, а также имел вертикальный профиль электронной плотности. Погрешность восстановления электронной плотности N_e из данных об эйконале составляла $\delta N_e \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$, а её значения давались с шагом по вертикали 2.5 км [1]. Было найдено, что мощные всплески рентгеновского излучения и геомагнитные условия во время главной фазы шторма обуславливают возмущения и повышенные уровни электронной плотности в D - и E -областях ионосферы планеты. Поиск поглощения ДМ-радиоволн на несущей *GPS*-частоте $f_1 = 1545.42 \text{ МГц}$ показал, что величина интегрального поглощения на трассах радиозатменного зондирования (навигационный *GPS* – низкоорбитальный *FORMOSAT-3/COSMIC* спутники) составляет ~3 дБ в интервале высот ~50–90 км, а в отдельных случаях достигает ~10 дБ на уровнях от ~90 до ~95 км [1, 2]. В работах [3, 4] предложен общий метод восстановления вертикальных профилей коэффициента поглощения Z , базирующийся на решении обратной задачи о поглощении радиоволн в нижней ионосфере Земли. Здесь также представлены результаты определения высотных профилей коэффициента поглощения $Z(h)$ ДМ-сигнала в ионосфере планеты и погрешности δZ их восстановления на высотах ниже ~100 км во время магнитной бури 22–23 июня 2015 года. В качестве оценки погрешности δZ для анализируемого профиля $Z(h)$ мы использовали абсолютную величину максимальной невязки при решении обратной задачи о поглощении радиоволн (см. табл. 1 работы [3]).

Если частота $\omega = 2\pi f$ радиоволны удовлетворяет неравенству $\omega^2 \gg \nu^2$, то коэффициент поглощения Z прямо пропорционален произведению νN_e и обратно пропорционален квадрату частоты (f^2) волны [5], и эффективную частоту столкновений ν электронов можно определить из следующего выражения:

$$Z(h) \approx 1.15 \cdot 10^3 \cdot \frac{N_e(h)\nu(h)}{f^2} \quad (1)$$

где N_e — электронная плотность (в см^{-3});

f — частота (в Гц);

Z — коэффициент поглощения (в дБ/км).

Таким образом, согласно выражению (1), формула для восстановления профиля $\nu(h)$ из данных о коэффициенте поглощения $Z(h)$ на несущей *GPS*-частоте $f_1 = 1.54542 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ и о профиле электронной плотности $N_e(h)$ имеет вид:

$$\nu(h) \approx \frac{z(h)f_1^2}{1.15 \cdot 10^3} \quad (2)$$

Учитывая относительные ошибки $\delta Z/Z$ и $\delta N_e/N_e$ определения коэффициента поглощения Z и электронной плотности N_e и полагая их независимыми, можно найти погрешность восстановления $\delta\nu/\nu$ эффективной частоты столкновений ν электронов:

$$\delta\nu/\nu = \sqrt{(\delta Z/Z)^2 + (\delta N_e/N_e)^2}. \quad (3)$$

Критерий отбора вертикального профиля $Z(h)$ для расчёта эффективной частоты столкновений электронов с нейтралами и ионами состоял в следующем:

а) отбирались профили $Z(h)$, у которых локальные максимумы коэффициента поглощения были восстановлены с относительной погрешностью не более $\delta Z/Z \approx 50 \%$ (см. табл. 1 работы [3]);

б) для рассматриваемого сеанса радиозатменных измерений должны были иметься данные об электронной плотности в анализируемом интервале высот.

Что касается применимости радиозатменного метода при определении ν , то ответ здесь заключается в том, насколько хорошо и с какими погрешностями восстанавливаются значения локальных максимумов Z_{\max} в высотных профилях коэффициента поглощения $Z(h)$. Именно от этих погрешностей, главным образом, зависят ошибки определения ν , поскольку влиянием погрешностей восстановления электронной плотности ($\sim 10\%$) можно в данном случае пренебречь.

Экспериментальные данные и анализ полученных результатов

Частота столкновений между электронами и нейтральными молекулами в нижней ионосфере Земли определяет сопротивление среды, испытываемое электроном при его движении. Эффективная частота столкновений — это сумма частот электрон-ионных столкновений и столкновений с нейтральными частицами [6]. Важно выяснить роль, которую играют указанные столкновения в ослаблении радиоволн, распространяющихся внутри D - и E -областей ионосферы планеты. Рассмотрим примеры восстановления вертикальных профилей эффективной частоты столкновений электронов, которые используют анализ радиозатменных данных спутников *FORMOSAT-3/COSMIC*.

На рис. 1 представлен пример такого восстановления (данные *FORMOSAT-3/COSMIC-6 GPS-22* от 22 июня 2015 года). Экспериментальные значения N_e восстанавливались с погрешностью $\delta N_e \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$, они показаны на рис. 1 белыми кружками. Треугольниками представлены значения коэффициента поглощения Z , которые были определены с погрешностью $\delta Z \approx 0.7 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км}$ [3]. С помощью формулы (2) и указанных выше экспериментальных данных вычислена эффективная частота столкновений ν электронов (черные кружки). Относительная погрешность $\delta\nu/\nu$ восстановления указанных значений найдена с помощью выражения (3). Наиболее надёжные результаты, полученные при восстановлении профиля $\nu(h)$ с относительной погрешностью меньше $\sim 100\%$, обозначены буквами на рис. 1. Величины погрешности для выделенных экспериментальных точек приведены в подрисуночной подписи. Отметим, что анализируемые радиозатменные измерения были проведены сразу после начала мощных всплесков рентгеновских лучей ($\sim 16.30 \text{ UT}$ 22 июня 2015 года) и до прихода (18.36 UT 22 июня 2015 года) основного КВМ (коронального выброса массы) в магнитосферу планеты, поэтому они подвержены влиянию всплесков рентгеновского излучения, а воздействие геомагнитных условий основной фазы шторма здесь отсутствует [1, 3].

На рис. 2 показаны профили коэффициента поглощения $Z(h)$, электронной плотности $N_e(h)$ и эффективной частоты столкновений $\nu(h)$ в ионосфере планеты (данные *FORMOSAT-3/COSMIC-6 GPS-16* от 22 июня 2015 года). В этом профиле погрешность восстановления значений Z составляет $\pm 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км}$ [3]. Два чётких максимума коэффициента поглощения $(1.6 \pm 1.3) \cdot 10^{-3}$ и $(3.3 \pm 1.3) \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км}$ зафиксированы в данном сеансе на высотах 67.8 и 63.8 км, соответственно (см. табл. 1 работы [3]). К сожалению, на указанных высотах отсутствуют данные об электронной плотности, что не позволяет определить значения ν . Рассмотрение рис. 2 показывает, что значения коэффициента поглощения на высотах более 90 км, где имеются сведения об электронной плотности, не превышают 10^{-3} дБ/км . При этом относительная погрешность восстановления значений коэффициента поглощения на указанных высотах, очевидно, оказывается больше 100%. Поэтому точность восстановления вертикального профиля $\nu(h)$ в данном сеансе измерений недостаточно высока ($\delta\nu/\nu > 100\%$).

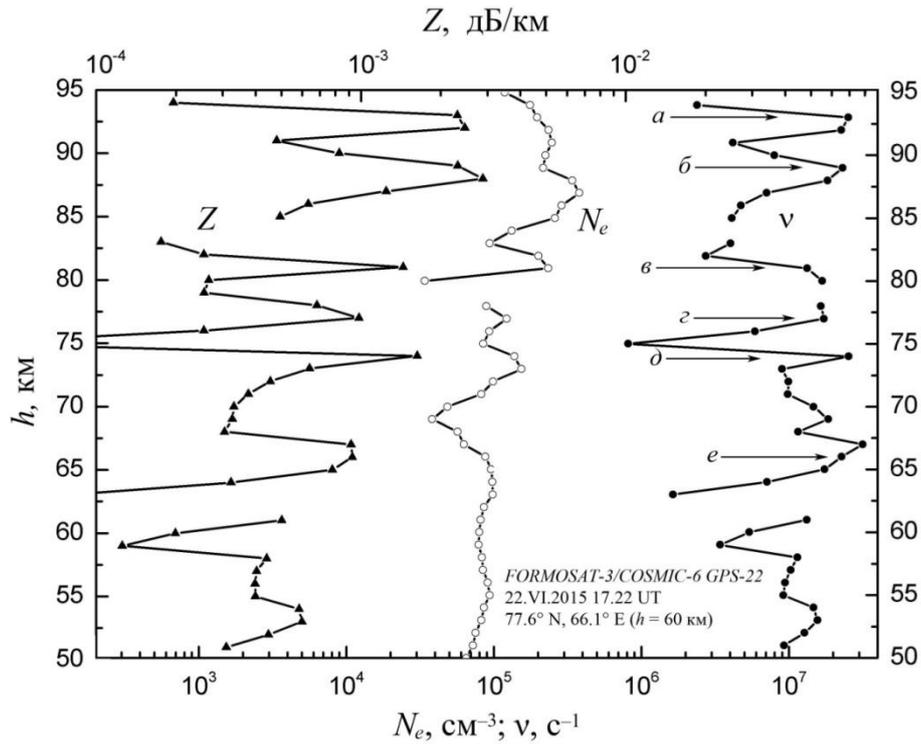


Рис. 1. Вертикальные профили коэффициента поглощения $Z(h)$ радиоволн, электронной плотности $N_e(h)$ и эффективной частоты столкновений электронов $\nu(h)$ в ионосфере Земли, полученные из анализа сеанса радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-6 GPS-22* (22 июня 2015 года). Величины относительной погрешности $\Delta\nu/\nu$ для выделенных экспериментальных точек: $\sim 28\%$ (a); $\sim 25\%$ (б); $\sim 50\%$ (в); $\sim 71\%$ (г); $\sim 45\%$ (д); $\sim 75\%$ (е)

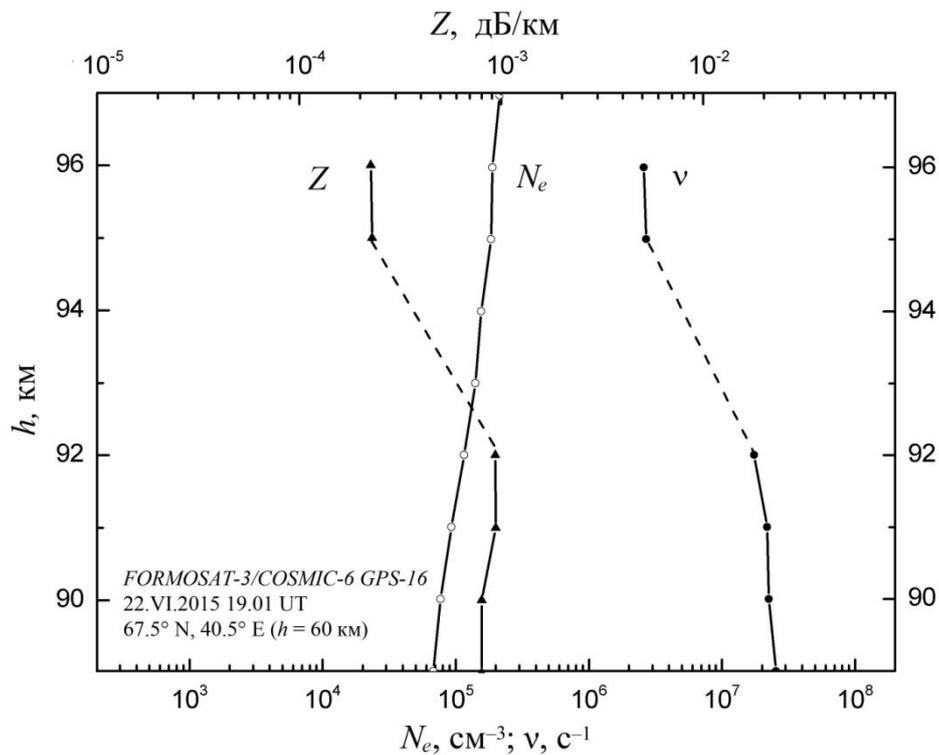


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для сеанса измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-6 GPS-16* (22 июня 2015 года)

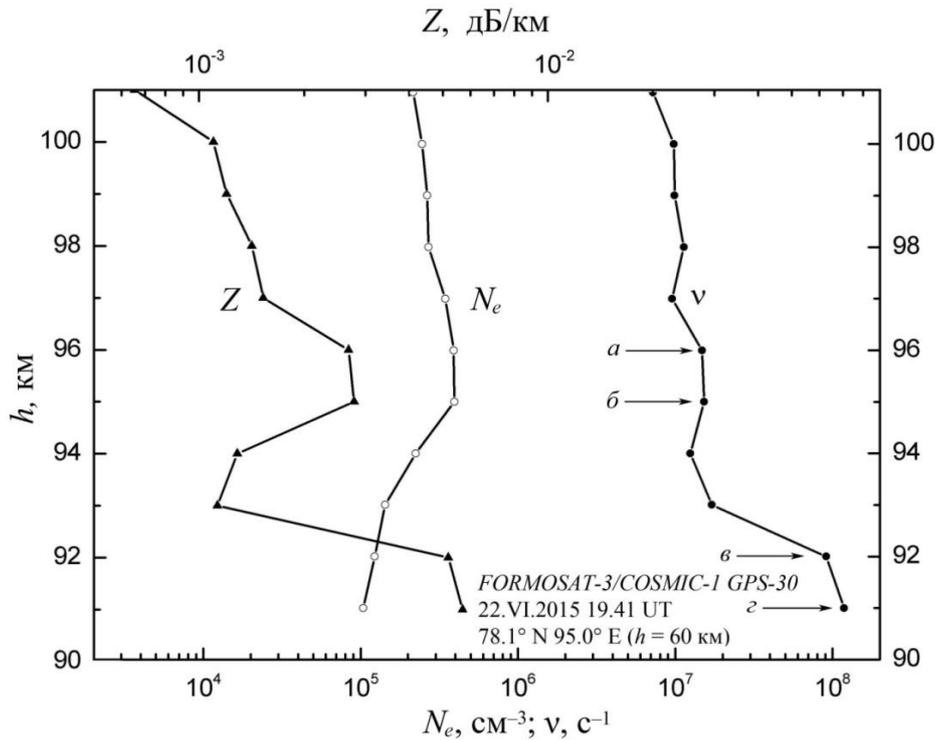


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но для сеанса измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-1 GPS-30* (22 июня 2015 года). Величины относительной погрешности $\delta\nu/\nu$ для выделенных экспериментальных точек: $\sim 50\%$ (a); $\sim 50\%$ (b); $\sim 27\%$ (v); $\sim 26\%$ (z)

На рис. 3 представлены наиболее качественные результаты восстановления вертикального профиля $\nu(h)$ в сеансе радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-1 GPS-30*, где поглощение сигналов ДМ-диапазона было надёжно зарегистрировано. Измерения были проведены в 19.41 UT 22 июня 2015 года и демонстрируют самые сильные возмущения, обусловленные как мощными всплесками рентгеновского излучения, так и изменением геомагнитных условий во время главной фазы шторма. Значения коэффициента поглощения Z в этом сеансе измерений определялись с погрешностью $\delta Z \approx 1.4 \cdot 10^{-3}$ дБ/км. Локальный максимум коэффициента поглощения здесь расположен на высоте 91.8 км и достигает наибольшего значения $(5.7 \pm 1.4) \cdot 10^{-3}$ дБ/км для всех анализируемых сеансов [3, 4]. Наиболее надёжные результаты, полученные при восстановлении вертикального профиля $\nu(h)$, обозначены буквами, величины погрешности для выделенных экспериментальных точек приведены в подрисуночной подписи. Результаты восстановления профиля $\nu(h)$ демонстрируют повышенные значения эффективной частоты столкновений $\nu \approx 10^8$ с⁻¹ электронов на высотах ~ 91 – 92 км, которые получены из анализа данных в этом сеансе измерений с достаточно высокой точностью ~ 26 – 27% .

На рис. 4 и 5 представлены данные об эффективной частоте столкновений ν электронов, полученные 23 июня 2015 года во время измерений в ионосфере Земли в 05.06 UT (рис. 4) и 07.28 UT (рис. 5). Указанное время измерений соответствует концу главной фазы магнитной бури (~ 03.00 – 05.00 UT) [1, 3]. Как видно из представленных данных, поглощение радиоволн наблюдается довольно чётко в указанных двух сеансах. При этом погрешность определения коэффициента поглощения радиоволн Z составила $\delta Z \approx 1.7 \cdot 10^{-3}$ и $\sim 1.1 \cdot 10^{-3}$ дБ/км, соответственно. Наиболее надёжные результаты при восстановлении вертикального профиля $\nu(h)$ обозначены буквами, значения погрешности для выделенных экспериментальных точек даны в подрисуночных подписях.

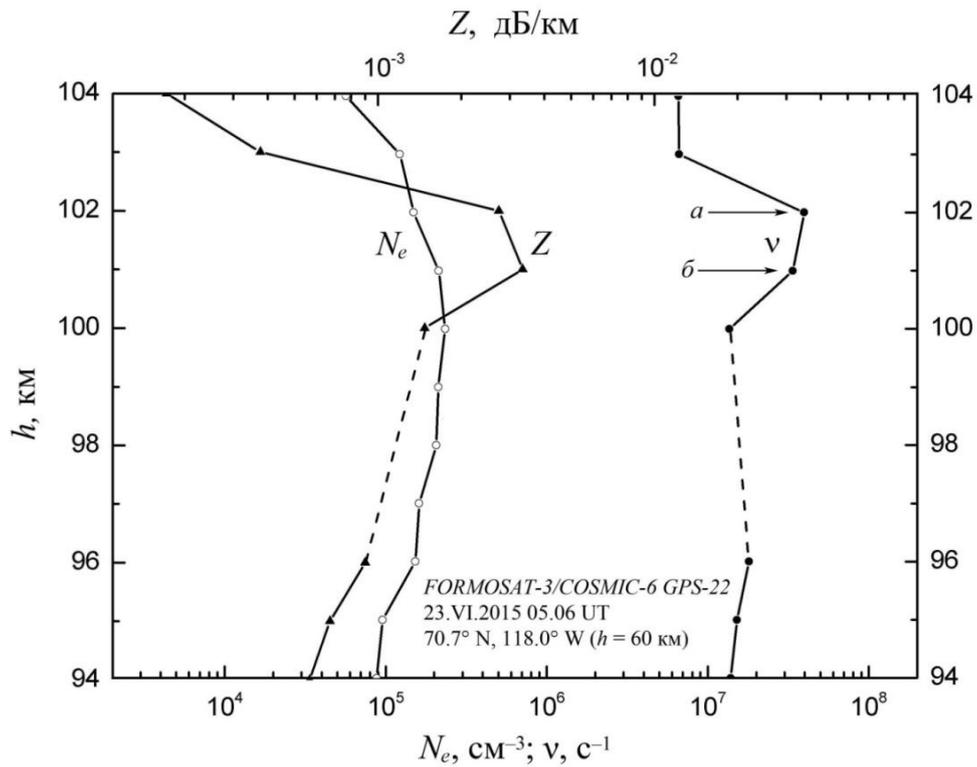


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, но для сеанса измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-6 GPS-22* (23 июня 2015 года). Величины $\delta v/v$ для выделенных экспериментальных точек: $\sim 53\%$ (a); $\sim 52\%$ (б)

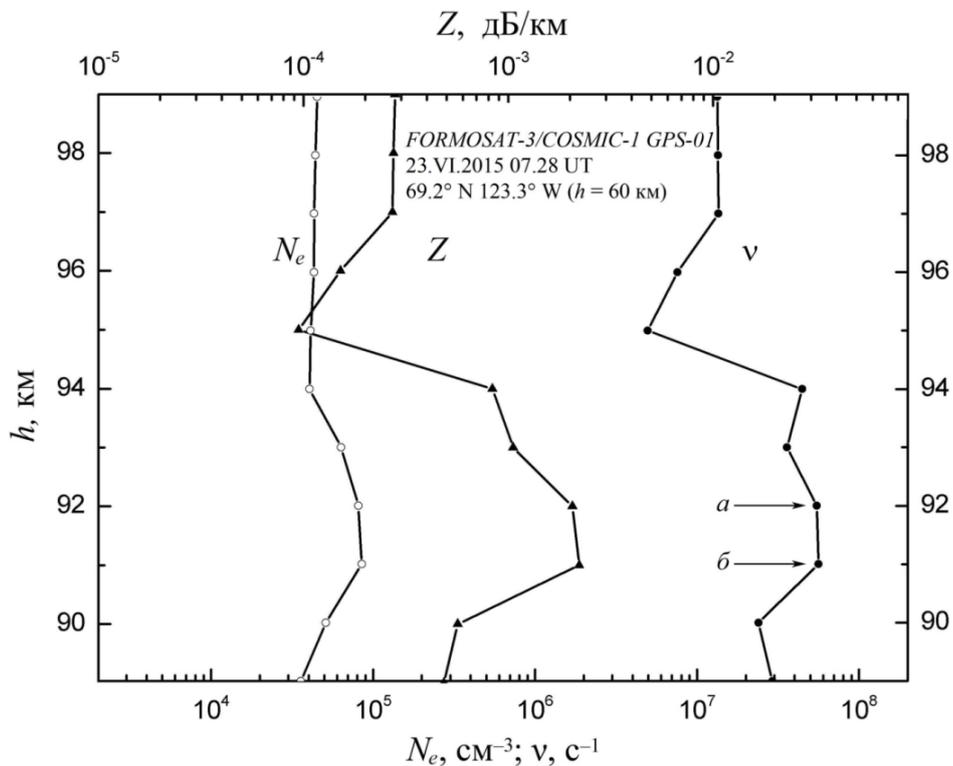


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, но для сеанса измерений *FORMOSAT-3/COSMIC-1 GPS-01* (23 июня 2015 года). Величины $\delta v/v$ для выделенных экспериментальных точек: $\sim 52\%$ (a); $\sim 52\%$ (б)

Сравним полученные нами результаты с данными о частоте столкновений ν_m моноэнергетических электронов, приведёнными в работе [7, Fig. 1]. Авторы указанной работы утверждают, что представленные в ней результаты обобщают наиболее надёжные данные, полученные разными исследователями. К сожалению, эти результаты не содержат информации по интервалу высот $\sim 88\text{--}106$ км, что затрудняет возможность сравнения наших данных и результатов работы [7]. В области пересечения данных, на высоте ~ 70 км, частота столкновений ν_m моноэнергетических электронов равна $\sim 7 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ и совпадает по модулю с ларморовской частотой электронов [7, 8]. Согласно нашим данным (рис. 1), значения эффективной частоты столкновений электронов на высотах ~ 74 и ~ 66 км составляют $(\sim 2.5 \pm 1.1) \cdot 10^7$ и $(\sim 2.0 \pm 1.5) \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$, соответственно. Таким образом, мы видим, что наши данные отличаются от результатов работы [7] примерно в три раза. Эти отличия могут быть связаны с тем, что наши измерения проводились во время сильной магнитной бури, а данные, приведённые в работе [7], относятся к спокойному геомагнитному периоду в ионосфере Земли.

В работе [9] приведены и проанализированы модельные представления особенностей высотно-временных изменений частоты столкновений электронов с молекулами в невозмущённой среднеширотной D -области ионосферы, выполненных методом частичных отражений (ЧО) и ракетными методами. Результаты экспериментов показали, что изменение $\nu(h)$ в среднеширотной D -области ионосферы в течение светлого времени суток не превышают погрешностей измерений методом ЧО ($\leq 30\%$), что свидетельствует об отсутствии зависимости частот столкновений электронов с молекулами от зенитного угла Солнца. На основе многочисленных экспериментов была установлена сезонная зависимость $\nu(h)$. Так, было найдено, что на высоте 66 км, средние значения частоты столкновений для летних и зимних условий составляют $1.74 \cdot 10^7$ и $1.64 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$, соответственно. Приведённые значения хорошо согласуются с результатами, полученными нами на указанной высоте (рис. 1).

В работе [10, Fig. 7] профиль эффективной частоты столкновений электронов в D -области определялся на основе измерений радара некогерентного рассеяния и совмещённых с ними риометрических измерений. Значение эффективной частоты столкновений ν на высоте ~ 65 км составляет $\sim 10^7 \text{ с}^{-1}$, что также соответствует нашим данным, учитывая погрешности восстановления ν .

Заключение

По результатам анализа радиозатменных измерений разработан метод восстановления вертикальных профилей эффективной частоты столкновения электронов в D - и E -областях ионосферы Земли. Используя данные о вертикальных профилях коэффициента поглощения ДМ-радиоволн и электронной плотности, восстановленных из измерений *FORMOSAT-3/COSMIC*, была оценена эффективная частота столкновений электронов в D - и E -областях высокоширотной ионосферы Земли во время магнитной бури 22–23 июня 2015 года. Проведенные исследования в ионосфере планеты представляют большой практический интерес для радиосвязи и навигации, а также важны для анализа динамики космической погоды.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А., Губенко Д.В. Радиозатменные исследования возмущений в ионосфере Земли во время магнитной

- бури 22–23 июня 2015 года // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 6. С. 713–722, <https://doi.org/10.31857/S0016794021060067>.
2. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А. Вариации параметров радиоволн в высокоширотной ионосфере Земли на трассах спутник–спутник во время геомагнитной бури 22–23.VI.2015 // Космические исследования. 2021. Т. 59. № 3. С. 191–195, <https://doi.org/10.31857/S0023420621030055>.
 3. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А., Губенко Д.В. Коэффициент поглощения дециметровых радиоволн (~19 см) в ионосфере Земли по результатам решения обратной задачи в радиозатменных спутниковых исследованиях во время магнитной бури в июне 2015 г. // Космические исследования. 2022. Т. 60. № 6. С. 471–478, <https://doi.org/10.31857/S0023420622060036>.
 4. Andreev V.E., Gubenko V.N., Kirillovich I.A. GPS L1 signals absorption in high-latitude lower ionosphere during severe geomagnetic storm in June 2015 // J. Physics: Conference Series. 2021. V. 1991. Iss. 1. Art. ID. 012006, <https://doi.org/10.1S088/1742-6596/1991/1/012006>.
 5. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 518 с.
 6. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А., Губенко Д.В. Определение эффективной частоты столкновения электронов в области E и D ионосферы высоких широт по данным анализа радиозатменных измерений // Космические исследования. 2023. Т. 61. № 6. С. 454–460, <https://doi.org/10.31857/S0023420623600137>.
 7. Belrose J.S., Hewitt L.W. Variation of Collision Frequency in the Lowest Ionosphere with Solar Activity // Nature. 1964. V. 202. Art. ID. 4929. P. 267–269.
 8. Fejer J.A. Motions of Ionization // Physics of the Earth's Upper Atmosphere / eds. Hines C.O., Paghis I., Hartz T.R., Fejer J.A. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1965. P. 157–175.
 9. Gokov A.M., Tyrnov O.F. Modeling of the electron-molecule collision frequency variations in the undisturbed midlatitude D-region on the experimental basis // 24th Intern. Crimean Conf. “Microwave and Telecommunication Technology. 2014” (CriMiCo’2014). P. 1099–1100.
 10. Beharrell M., Honary F. A new method for deducing the effective collision frequency profile in the D-region // J. Geophysical Research. 2008. V. 113. Iss. A05. Art. ID. A05303, <https://doi.org/10.1029/2007JA012650>.