

MODEL OF HEIGHT-TEMPORAL VARIATIONS OF THE ELECTRON DENSITY IN THE UNDISTURBED MIDLATITUDE D-REGION OF THE IONOSPHERE

Gokov A. M.², Tyrnov O. F.¹

¹Kharkiv V. N. Karazin National University
4, Svoboda sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

²Kharkiv S. Kuznets National University of Economic
Ph: (057) 7051251, e-mail: amg_1955@mail.ru

Abstract — On the basis of long-term systematic experimental studies near Kharkov and episodic purposeful observation near Volgograd using the method of partial reflections there were analyzed the main features and modeled height-time distribution of the electron density in the undisturbed midlatitude D-region of the ionosphere.

МОДЕЛЬ ВЫСОТНО-ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В НЕВОЗМУЩЕННОЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Гоков А. М.², Тырнов О. Ф.¹

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
пл. Свободы 4, Харьков, 61022, Украина

²Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнецца
тел.: (057) 7051251, e-mail: amg_1955@mail.ru

Аннотация — На основе длительных систематических экспериментальных исследований вблизи г. Харькова и эпизодических целенаправленных наблюдений вблизи г. Волгограда с помощью метода частичных отражений проанализированы основные особенности и выполнено моделирование высотно-временного распределения концентрации электронов в невозмущенной среднеширотной D-области ионосферы.

I. Введение

Моделирование высотно-временных вариаций концентраций электронов $N(z, t)$ в среднеширотной D-области важно в теоретическом и в прикладном плане для решения задач радиосвязи, радионавигации и др. Надежной и адекватной модели все еще не существует. Поэтому в работе на основе банка экспериментальных данных ХНУ имени В. Н. Каразина для построения модели $N(z, t)$ среднеширотной D-области использовано 5400 профилей $N(z)$ с равномерным распределением по сезонам, полученных в невозмущенных условиях вблизи Харькова в течение последних 22 лет только с помощью метода частичных отражений (ЧО) [1], что является важным отличием от известных в литературе моделей. Для минимизации погрешности получения профилей $N(z)$ одновременно применялись две и более методик [2, 3].

II. Основные результаты

Для получения сезонных среднесуточных профилей $\langle N(z) \rangle$ (получены вычислением медианных значений $\langle N \rangle$ в интервале $z = 70\text{—}95$ км с шагом $\Delta z = 2,5$ км) использованы одинаковые по количеству для каждого сезона массивы $N(z)$ с примерно равномерным распределением в светлое время суток и для каждой высоты выполнена оценка вклада в отклонение N от среднего значения различных физических процессов. Известно, что в каждый момент времени значение N можно представить как $N = \langle N \rangle \pm N^*$, где N^* — отклонение от среднего, вызванное различными физическими процессами (суточные и сезонные изменения ионизации, циклические изменения солнечной активности, синоптические процессы и гидродинамическая турбулентность) и погрешностями измерений. Для сравнения выполнен расчет $\langle N \rangle$ и вклада физических

механизмов для данных каталогов профилей $N(z)$ разных регионов планеты [4—6].

На основе банка данных построены усредненные региональные модельные зависимости концентрации электронов от зенитного угла Солнца $N_M(z, \chi)$ для различных высот ($z = 75, 80, 85$ км). Они аппроксимировались зависимостью:

$$N_M(z, \chi) = N_0 \cos^n \chi_{ef},$$

где N_0 — профиль при $\chi = 0$; $\chi_{ef}(t) = \chi_{ef}(t + \Delta t)$; $\Delta t(z)$ — сдвиг суточного хода $N(z, t)$ относительно местного полудня; $\cos \chi_{ef} = \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cos[(t - \Delta t - 12)360^\circ/24]$; t — время наблюдения в часах; $\varphi_0 = 23,45^\circ \sin(m 360^\circ/365)$; φ — географическая широта пункта наблюдений в градусах; m — число дней, начиная с 21 марта. Полученные значения показателя степени n были аппроксимированы в интервале $z = 70\text{—}90$ км функцией:

$$n(z) = 0,98 \cos(360^\circ (80 - z)/132).$$

Анализ данных в этой модели показал, что вариации $N_M(z, \chi)$ имеют как высотные, так и сезонные различия. Наиболее вероятные значения коэффициента n составляют $0,95 \pm 0,15$.

Анализ данных показал, что изменения $N(z)$ в зависимости от солнечной активности сравнительно невелики, согласуются с изменениями числа солнечных пятен R и хорошо описываются выражением:

$$N_m(z, R) = N_{R0}(z) \exp(\alpha R), \alpha(z) = 0,02[1 - (11,333(z - 50))],$$

где N_{R0} — зависимость $N_m(z, R)$ при $R = 0$; $\alpha(z)$ — экспериментальная аппроксимация коэффициента α .

Сезонные вариации профиля $N(z)$ изучались по измерениям методом ЧО при постоянных зенитных углах Солнца и вблизи местного полудня [3] в двух

среднеширотных регионах: в районе г. Харькова и г. Волгограда. При моделировании сезонных изменений концентрации электронов за основу взята модель НИРФИ [6], в которой сезонные вариации высотного профиля $N(z)$ описывают эмпирическим выражением:

$$\lg N(M, z) = \left\{ \begin{array}{l} 0,7 \cdot \cos k \cdot \left[1 + \frac{8 \cdot 10^5 (z - 75)}{5 \cdot 10^5 + (z - 75)^6} \right] + \\ + 0,086 \cdot \cos 2k \cdot \left[1 + \frac{3040 \cdot (z - 72,5)}{9500 + (z - 72,5)^4} \right] + \\ + 0,0022 \cdot \cos 3k \cdot \left[1 - \frac{900 \cdot (z - 80)}{5 \cdot 10^5 + (z - 80)^2} \right] \end{array} \right\},$$

где M — день года, начиная с 1 января.

Была выполнена проверка этих эмпирических параметров для данных, полученных методом ЧО в двух указанных среднеширотных регионах. Оказалось, что эта зависимость одинаково точно описывает экспериментальные данные для этих двух различных среднеширотных регионов — погрешность, в основном, составила менее 30 %. Это может указывать на ее правильность и универсальность.

Известно, что геомагнитные возмущения возникают достаточно часто и многократно экспериментально установлено, что они способствуют значительным изменениям высотного профиля концентрации электронов $N(z)$ в нижней ионосфере. Важно, что такие возмущения в разных регионах приводят к возмущениям $N(z)$ различных временных масштабов — от десятка секунд до часов-суток и более. Отклик нижней ионосферы средних широт на геомагнитные возмущения в разных регионах может запаздывать на часы - сутки и не совпадать с ними по продолжительности [7]. Поэтому моделирование таких вариаций $N(z)$ в наше время, вероятно, не представляется возможным. Для характеристики общих закономерностей (особенностей) возможно построение зависимости величины N в нижней ионосфере, например, от среднесуточной величины индекса геомагнитной активности $\langle Kp \rangle$, как это попытались сделать авторы работы [6]. Однако сравнение отдельных экспериментальных данных, полученных методом ЧО в ХНУ имени В. Н. Каразина, с результатами расчетов по эмпирической зависимости из работы [6] показало, что почти во всех случаях между ними есть существенные различия.

Изменения концентрации электронов, обусловленные геомагнитной широтой многократно экспериментально подтверждены (см., например, [6—8]). Однако моделирование этих вариаций $N(z)$ представляется очень трудной задачей из-за большой сложности экспериментальных исследований. Для характеристики общих закономерностей (или особенностей) возможно построение эмпирической зависимости величины концентрации электронов в нижней ионосфере от геомагнитной широты. Однако попытки построения подобных моделей с использованием разнородных массивов экспериментальных данных, полученных разными методами в разных регионах, приводят к противоречивым результатам. Например, в работе [6] на основе банка данных НИРФИ и известных литературных данных, полученных разными методами в разных регионах, получена определенная предварительная зависимость электронной концентрации в нижней ионосфере от гео-

магнитной широты. Однако выполненное нами сравнение этой модельной зависимости с индивидуальными экспериментальными профилями $N(z)$, полученными на аппаратуре ХНУ имени В. Н. Каразина методом ЧО в разных широтных пунктах (в районе г. Харькова, г. Волгограда и г. Мурманска) для различных сезонов года, выявило существенные различия. Вероятнее всего они могут быть вызваны несовершенством этой модели, обусловленной разнородностью данных, а также региональными особенностями.

III. Заключение

На основе обработки и анализа данных многолетних систематических измерений методом ЧО разработана статистическая эмпирическая модель высотно-временных вариаций концентрации электронов в невозмущенной среднеширотной D-области ионосферы. С использованием параметров этой модели промоделированы характеристики ВЧ и ОВЧ радиоволн в среднеширотной нижней ионосфере при наклонном распространении. Установлено, что основной вклад в общую изменчивость высотного профиля $N(z)$ в среднеширотной D-области в невозмущенных условиях вносят синоптические процессы и суточные изменения ионизации. Впервые выполнены расчеты среднесуточных сезонных профилей $\langle N(z) \rangle$ и их высотных градиентов с использованием банков экспериментальных данных для различных среднеширотных регионов, полученных разными методами, и установлены заметные различия в сезонных профилях $\langle N(z) \rangle$ и $d\langle N \rangle/dz$, которые вероятнее всего обусловлены региональными особенностями.

IV. References

- [1] Tyrnov, O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., Gritchin A. I., Dorohov V. L., Kontzevaya L. G., Kostrov L. S., Leus S. G., Martynenko S. I., Misyura V. A., Podnos V. A., Pokhilko S. N., Rozumenko V. T., Somov V. G., Tsybmal A. M., Chernogor L. F., Shemet A. S. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere. *Turkish Journal of Physics*, 1994, Vol. 18, No. 11, pp. 1260–1265.
- [2] Garmash K. P. Regularizatsiya obratnoi zadachi v metode chastichnyh otrazhenii [Regularization of the inverse problem in the differential absorption experiment]. *Vestnik Kharkovskogo Universiteta. Radiofizika i elektronika*, 1991, No. 355, pp. 61–64.
- [3] Gokov A.M. *Doslidzhennya osoblyvostey nezburanoi serednjoshirinoi D-oblasti ionosfery* [Studies of the undisturbed mid-latitude ionospheric D-region]. Monograph. Kharkiv, KNUE, 2013. 156 p.
- [4] Danilov A.D., Ledomskaia S.Yu. Empiricheskaja model oblasti D. Printsipy postroenija s bank dannykh [Empirical model of the D region. Principles and database]. *Trudy IEM*, 1983. Vyp. 13(102), pp. 28–51.
- [5] Nesterova I.I., Ginsburg E.I. *Katalog profiley elektronnoy koncentracii oblasti D ionosfery* [Catalogue of the electron density profiles of the ionospheric D region]. Novosibirsk, IG&I, 1985. 210 p.
- [6] Belikivich V.V., Benediktov E.A., Vjakhirev V.D., Lerner A.M. Empiricheskaja model raspredelenija elektronnoy koncentracii sredneshirotnoy D oblasti ionosfery [Empirical model of the electron density distribution of the midlatitude D-region of the ionosphere]. *Geomagnetizm i aeronomija*, 1992, Vol. 32, No 6, pp. 95–103.
- [7] Gokov A.M. *Zburennja v nizkotemperaturnij plasmi seredn'oshirotnoi nszhn'oi ionosfery, obumovleni prirodnyimi dzherelamy* [The perturbation in the low-temperature plasma of the mid-latitude lower ionosphere caused by natural sources]. Monograph. Kharkiv, KNUE, 2010. 176 p.
- [8] McNamara L. F. Staisyical model of the D-region. *Radio Sci.*, 1979, Vol. 14, No 6, pp. 1165–1173.