

УДК 550.388

Т. Г. Живолуп

Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

ВАРИАЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЯ F1 ИОНОСФЕРЫ

Розроблено теоретичну модель іоносфери для інтервалу висот 100–200 км та отримано дані про варіації відносної концентрації іонів атомарного кисню. Розраховано профілі електронної концентрації та отримано залежності висоти максимуму шару F1 і параметрів міжшарової западини F1–F2 від рівня сонячної активності.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач теории и моделирования нижней части области F ионосферы, состоящей из различных ионов, является разработка таких моделей, которые адекватно отражают ее поведение при разных гелиогеофизических условиях. Особый интерес представляет поведение слоя F1 и межслоевой впадины F1–F2. Четкие представления о механизмах образования слоя F1 и межслоевой впадины F1–F2 необходимы для успешного прогнозирования состояния нижней части области F ионосферы, которая играет важную роль в распространении радиоволн. Однако теория слоя F1 разработана еще недостаточно, а моделирование поведения высоты слоя F1 сталкивается с отдельными трудностями [8]. Из работы [5] следует, что слой F1 должен формироваться в области ионизационно-рекомбинационного равновесия вблизи максимума скорости ионообразования, но полного представления о характере изменения высоты максимума слоя F1 не имеется. Поэтому создание надежной теоретической модели нижней части области F ионосферы и изучение поведения слоя F1 при разных гелиогеофизических условиях, особенно в зависимости от относительной концентра-

ции атомарного кислорода, представляет интерес как для фундаментальных исследований, так и для решения прикладных задач геофизики и распространения радиоволн.

В работах [1, 2] исследовалось поведение слоя F1 и высоты его максимума с помощью однопараметрического семейства кривых, параметром которого является относительный ионный состав, характеризующийся величиной

$$X = ([O^+]/n_e) \times ([O^+]/[M^+]),$$

где $[M^+]$ — сумма концентраций молекулярных ионов, что позволило получить в аналитическом виде условия возникновения на профиле $n_e(h)$ максимума или перегиба.

Целью данной работы является исследование вариаций относительной концентрации ионов атомарного кислорода в зависимости от уровня солнечной активности и их связи с высотой максимума слоя F1 и параметрами межслоевой впадины F1–F2 с помощью разработанной теоретической модели ионосферы для высот 100–200 км, которая включает основные ионно-обменные реакции.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ ИНТЕРВАЛА ВЫСОТ 100–200 КМ

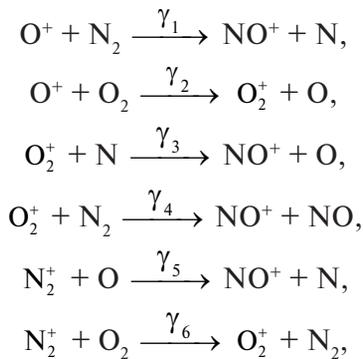
Разработанная теоретическая модель использует данные модели MSIS-86 для концентраций нейтральных частиц на высотах 100–200 км для кон-

кретного дня и уровней солнечной и магнитной активности. Эти данные берутся как входные для вычисления высотного распределения нейтральных частиц. Предлагаемая модель также может использовать соотношения модели нейтральной атмосферы Яккия-71 [7].

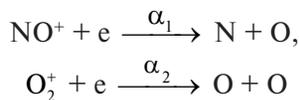
Модель включает основные ионно-обменные реакции и реакции диссоциативной рекомбинации и уточненные значения их скоростей, приведенные в работе [3]. Модель учитывает ионизацию нейтральной атмосферы солнечным излучением и определяет из условий ионизационно-рекомбинационного равновесия концентрацию электронов n_e и концентрации ионов NO^+ , O_2^+ , O^+ и N_2^+ .

Модель использует девятиинтервальный спектр коротковолнового солнечного излучения, приведенный в работе [9], и зависимость интенсивности коротковолнового излучения Солнца от значения индекса $F_{10.7}$ [4].

Обсуждаемая модель учитывает следующие основные ионно-обменные реакции:



и две реакции диссоциативной рекомбинации:



($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6, \alpha_1, \alpha_2$ — скорости реакций).

Система уравнений баланса ионизации в стационарном случае имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} 0 &= q_1 - [\text{N}_2^+]\{\gamma_3[\text{O}] + \gamma_6[\text{O}_2]\}, \\ 0 &= q_2 - [\text{O}^+]\{\gamma_1[\text{N}_2] + \gamma_2[\text{O}_2]\}, \\ 0 &= q_3 - [\text{O}_2^+]\{\gamma_3[\text{N}] + \gamma_4[\text{N}_2]\} - \\ &- \alpha_2[\text{O}_2^+]n_e + \gamma_2[\text{O}_2][\text{O}^+] + \gamma_6[\text{O}_2][\text{N}_2^+], \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} 0 &= [\text{O}_2^+]\{\gamma_3[\text{N}] + \gamma_4[\text{N}_2]\} - \alpha_1[\text{NO}^+]n_e + \\ &+ \gamma_1[\text{N}_2][\text{O}^+] + \gamma_5[\text{O}][\text{N}_2^+], \\ n_e &= [\text{NO}^+] + [\text{O}_2^+] + [\text{N}_2^+] + [\text{O}^+]. \end{aligned}$$

Скорости ионизации q_1, q_2, q_3 определяются путем ионизации $\text{N}_2, \text{O}, \text{O}_2$ коротковолновым солнечным излучением (использовался спектр [9]).

Система уравнений баланса ионизации сводится к кубическому уравнению относительно n_e :

$$n_e^3 + bn_e^2 + cn_e + d = 0, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} b &= A_2 - A_3, \\ c &= -(A_2A_3 + C_1 + C_2), \\ d &= -(A_1C_2 + A_2C_1), \\ A_1 &= \frac{\gamma_3[\text{N}] + \gamma_4[\text{N}_2]}{\alpha_1}, \\ A_2 &= \frac{\gamma_3[\text{N}] + \gamma_4[\text{N}_2]}{\alpha_2}, \\ A_3 &= [\text{O}^+] + [\text{N}_2^+], \\ C_1 &= \frac{\gamma_1[\text{N}_2][\text{O}^+] + \gamma_5[\text{O}][\text{N}_2^+]}{\alpha_1}, \\ C_2 &= \frac{q_3 + \gamma_2[\text{O}_2][\text{O}^+] + \gamma_6[\text{O}_2][\text{N}_2^+]}{\alpha_2}. \end{aligned}$$

Заменяя в уравнении (2) n_e новым неизвестным y , связанным с n_e равенством $n_e = y - b/3$, его можно записать в более простом (каноническом) виде:

$$y^3 + py + q = 0, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} p &= -\frac{b^2}{3} + c, \\ q &= \frac{2b^3}{27} - \frac{bc}{3} + d. \end{aligned}$$

Число действительных корней кубического уравнения (3) зависит от знака величины Q :

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2.$$

Поскольку оказалось, что $Q < 0$, то уравнение (3) имеет три действительных корня.

Так как коэффициенты p и q неполного кубического уравнения (3) действительны, то его корни могут быть выражены с помощью тригонометрических функций. В нашем случае $p < 0$ и $Q < 0$, тогда

$$y_1 = 2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos \frac{\alpha}{3},$$

$$y_{2,3} = -2\sqrt{\frac{p}{3}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} \pm \frac{\pi}{3} \right),$$

где

$$\cos \alpha = -\frac{q}{2\sqrt{-\frac{p^3}{27}}}.$$

Корень y_1 уравнения (3) — положительный, в то время как корни $y_{2,3} < 0$.

Корни уравнения (2) находятся из соотношения

$$n_{e(1,2,3)} = y_{1,2,3} - \frac{b}{3}.$$

Так как уравнение (2) имеет только один положительный корень, то он и будет решением уравнения (2):

$$n_e = y_1 - \frac{b}{3}.$$

В результате решения уравнения (2) были рассчитаны модельные профили $n_e(h)$, а из системы уравнений (1) — высотные профили концентрации ионов O^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2^+ в интервале высот 100—200 км для конкретных гелиогеофизических условий.

Таким образом, построенная теоретическая модель ионосферы для интервала высот 100—200 км позволяет рассчитывать высотный ход электронной концентрации и концентрации ионов O^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2^+ и исследовать поведение слоя F1 и межслоевой впадины F1—F2 в зависимости от гелиогеофизических условий.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ С МЕЖДУНАРОДНОЙ СПРАВОЧНОЙ МОДЕЛЬЮ

Данные ракетных измерений относительного ионного содержания, представленные в Международной справочной модели ионосферы IRI-2001 [6], представляют интерес как для уточне-

ния существующих эмпирических моделей (их относительная погрешность составляет всего 5—10 % [2]), так и для развития теории области F1 ионосферы, а также служат эталоном для проверки разработанных теоретических моделей ионосферы.

Для сравнения разработанной теоретической модели ионосферы с международной справочной моделью ионосферы IRI-2001 были выбраны конкретные дни 2001 г., относящиеся к весеннему и осеннему равноденствиям, а также к летнему и зимнему солнцестояниям: 22 марта (индекс солнечной активности $F_{10.7} = 145$), 22 сентября ($F_{10.7} = 132$), 22 июня ($F_{10.7} = 135$) и 22 декабря ($F_{10.7} = 127$). Сравнение было проведено для относительного содержания ионов атомарного кислорода O^+ в интервале высот 100—200 км (были взяты данные эмпирической модели относительного ионного содержания Данилова, входящей в модель IRI-2001).

Расчетные высотные профили относительной концентрации ионов O^+ были сопоставлены с высотными профилями $[O^+]/n_e$ Международной справочной модели ионосферы IRI-2001.

На рис. 1 показано сравнение расчетных высотных профилей $([O^+]/n_e)(h)$ с аналогичными, полученными из Международной справочной модели ионосферы IRI-2001. Как видно, для 22 марта расчетный и экспериментальный профили расходятся на 1—3 % в интервале высот 140—200 км и практически совпадают в интервале высот 100—130 км. Для 22 июня наблюдается расхождение расчетного и модельного профилей $([O^+]/n_e)(h)$ на 1—2 % в интервале высот 100—160 км и на 1—4 % — в интервале высот 170—200 км. Для 22 сентября наблюдается расхождение расчетного и модельного профилей на 1—2 % в интервале высот 100—150 км и на 1—4 % — в интервале высот 160—200 км. Для 22 декабря расхождение расчетного и модельного профилей $([O^+]/n_e)(h)$ составляет 1—2 % на высотах 100—150 км и на 1—7 % — в интервале высот 160—200 км.

Таким образом, экспериментальные высотные профили относительной концентрации ионов O^+ Международной справочной модели ионосферы IRI-2001 хорошо согласуются с теорети-

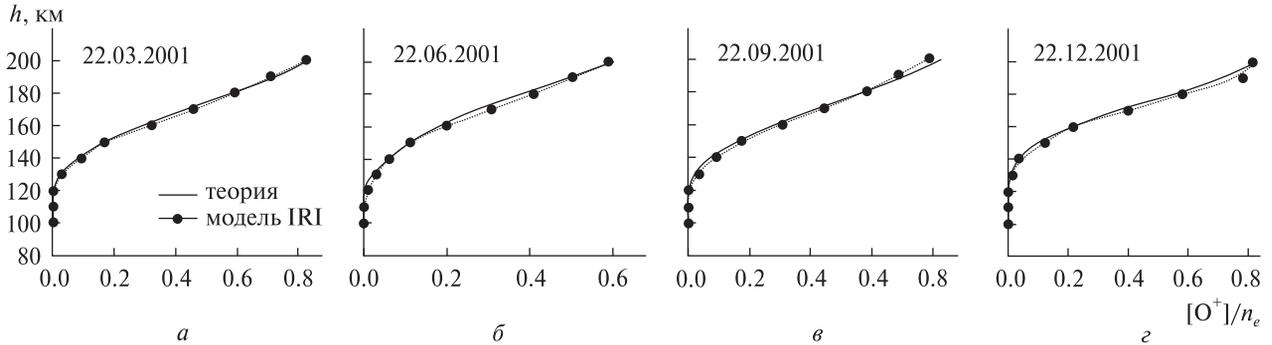


Рис. 1. Сравнение высотного профиля ($[O^+]/n_e(h)$), рассчитанного по разработанной теоретической модели (сплошная линия), и профиля относительного содержания иона атомарного кислорода Международной справочной модели ионосферы IRI-2001 (точки) для разных сезонов

ческими для 22 марта, 22 июня, 22 сентября и 22 декабря в области высот 100–200 км. В интервале высот 100–200 км расхождение модельных и теоретических профилей для 22 марта, 22 июня и 22 сентября не превышает 4 %, а для 22 декабря — не превышает 7 %.

Результаты сравнения модельных и теоретических высотных профилей O^+/n_e свидетельствуют о высоких точностных характеристиках разработанной теоретической модели ионосферы для интервала высот 100–200 км, так как относительная погрешность определения относительной концентрации иона атомарного кислорода в основном не превышает 4–7 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Были проведены расчеты относительной концентрации ионов атомарного кислорода в нижней части области F ионосферы в зависимости от уровня солнечной активности с использованием разработанной теоретической модели.

Для исследования влияния солнечной активности на поведение относительной концентрации ионов атомарного кислорода был выбран период летнего солнцестояния и уровни солнечной активности $F_{10.7} = 70, 100, 140, 170$ и 200 . Исследования были проведены для высот 140, 150, 160, 170, 180, 190 и 200 км.

Теоретические расчеты показали, что при увеличении уровня солнечной активности относительная концентрация ионов атомарного кислорода увеличивается на всех выбранных высотах.

Так, на высоте 140 км при возрастании уровня солнечной активности $F_{10.7}$ от 70 до 140 относительная концентрация ионов атомарного кислорода увеличилась в 2.03 раза, на высоте 150 км — в 1.92 раза, на высоте 160 км — в 1.77 раза, на высоте 170 км — в 1.63 раза, на высоте 180 км — в 1.50 раза, на высоте 190 км — в 1.37 раза, на высоте 200 км — в 1.25 раза (см. рис. 2). Видно, что при увеличении уровня солнечной активности $F_{10.7}$ от 70 до 140 увеличение относительной концентрации ионов атомарного кислорода замедляется с увеличением высоты. При увеличении уровня солнечной активности $F_{10.7}$ от 140 до 200 относительная концентрация ионов атомарного кислорода также увеличивается на всех выбранных высотах. Так, на высоте 140 км относительная концентрация ионов атомарного кислорода увеличилась в 1.2 раза, на высоте 150 км — в 1.18 раза, на высоте 160 км — в 1.15 раза, на высоте 170 км — в 1.11 раза, на высоте 180 км — в 1.08 раза, на высоте 190 км — в 1.05 раза, на высоте 200 км — в 1.01 раза (рис. 2). Как видно из приведенных значений, при увеличении уровня солнечной активности $F_{10.7}$ от 140 до 200 увеличение относительной концентрации ионов атомарного кислорода также замедляется с увеличением высоты.

Таким образом, увеличение относительной концентрации иона атомарного кислорода на высотах 140–200 км более существенное при увеличении уровня солнечной активности $F_{10.7}$ от 70 до 140.

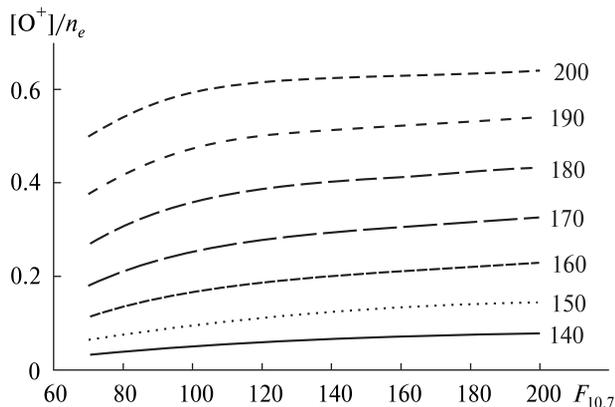


Рис. 2. Изменение относительной концентрации иона атомарного кислорода на высотах 140, 150, 160, 170, 180, 190 и 200 км с увеличением индекса солнечной активности $F_{10.7}$

Для исследования влияния солнечной активности на формирование слоя F1, поведение высоты его максимума, а также на параметры межслоевой впадины F1–F2 были проведены расчеты высотных профилей электронной концентрации.

Как видно из рис. 3, при увеличении солнечной активности увеличивается высота максимума слоя F1. При увеличении индекса солнечной активности $F_{10.7}$ от 70 до 130 высота максимума слоя F1 увеличивается от 144 до 161 км (на 17 км). Зависимость высоты максимума слоя F1 от индекса $F_{10.7}$ близка к линейной при изменении индекса $F_{10.7}$ от 70 до 130.

При дальнейшем увеличении индекса солнечной активности $F_{10.7}$ наблюдается медленный рост высоты максимума слоя F1. Так при изменении индекса солнечной активности $F_{10.7}$ от 140 до 200 высота максимума слоя F1 увеличивается от 165 до 167 км (на 2 км).

Расчеты показали, что при увеличении индекса солнечной активности $F_{10.7}$ от 70 до 130 высота минимума межслоевой впадины F1–F2 $h_v F1$ (рис. 4) и ее ширина D (рис. 5) быстро уменьшаются. Как видно, зависимости $h_v F1(F_{10.7})$ и $D(F_{10.7})$ близки к линейным.

Таким образом, на высотах 140–200 км более существенное и быстрое увеличение относительной концентрации иона атомарного

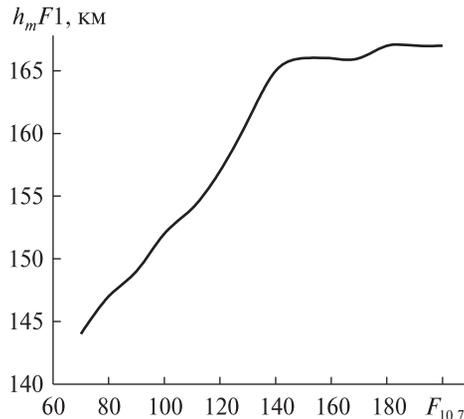


Рис. 3. Изменение высоты максимума слоя F1 с увеличением солнечной активности

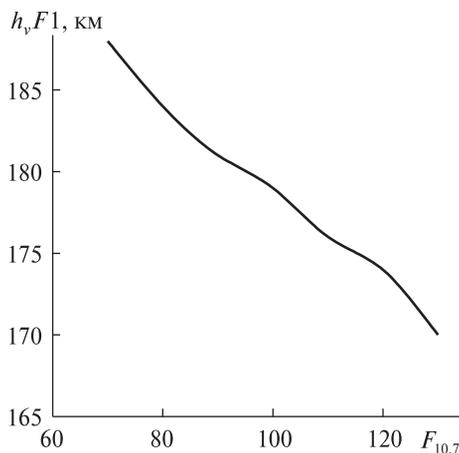


Рис. 4. Изменение высоты минимума межслоевой впадины F1–F2 с увеличением солнечной активности

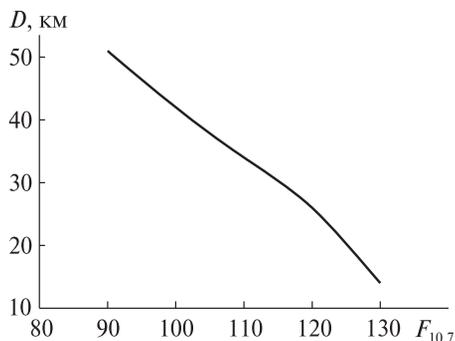


Рис. 5. Изменение ширины межслоевой впадины F1–F2 с увеличением солнечной активности

кислорода наблюдается при увеличении уровня солнечной активности $F_{10.7}$ от 70 до 140, что приводит к быстрому увеличению высоты максимума слоя F1 и к быстрому уменьшению высоты минимума и ширины межслоевой впадины F1–F2.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования влияния солнечной активности на поведение относительной концентрации иона атомарного кислорода в нижней части области F ионосферы и на формирование и поведение параметров слоя F1 ионосферы показали, что при увеличении солнечной активности увеличивается относительная концентрация ионов атомарного кислорода, что приводит к увеличению высоты максимума слоя F1. Особенно быстрое увеличение высоты максимума слоя F1 наблюдается при наиболее быстром увеличении относительной концентрации ионов атомарного кислорода, что происходит при увеличении индекса солнечной активности $F_{10.7}$ от 70 до 130. При этом зависимость высоты максимума слоя F1 от индекса $F_{10.7}$ близка к линейной.

При дальнейшем увеличении индекса солнечной активности $F_{10.7}$ наблюдается медленное увеличение относительной концентрации ионов атомарного кислорода. При этом и высота максимума слоя F1 слабо увеличивается. Поэтому следует отметить, что более быстрое увеличение высоты максимума слоя F1 наблюдается тогда, когда происходит наиболее быстрое увеличение относительной концентрации ионов атомарного кислорода, и при этом зависимость высоты максимума слоя F1 от индекса $F_{10.7}$ близка к линейной.

При наиболее быстром увеличении относительной концентрации ионов атомарного кислорода высота минимума межслоевой впадины F1–F2 и ее ширина также быстро уменьшаются. Оказалось, что зависимости $h_v F1(F_{10.7})$ и $D(F_{10.7})$ близки к линейным.

Таким образом, с помощью разработанной теоретической модели ионосферы для интервала высот 100–200 км установлено, что более существенное и быстрое увеличение относительной концентрации иона атомарного кислорода,

которое наблюдается на высотах 140–200 км при увеличении уровня солнечной активности $F_{10.7}$ от 70 до 140, приводит к быстрому увеличению высоты максимума слоя F1 и к быстрому уменьшению высоты минимума и ширины межслоевой впадины F1–F2.

ВЫВОДЫ

1. Разработана теоретическая модель ионосферы для интервала высот 100–200 км, которая позволяет рассчитывать высотное распределение электронной концентрации и относительной концентрации атомарного кислорода в интервале высот 100–200 км и исследовать поведение слоя F1 и межслоевой впадины F1–F2 в зависимости от гелиогеофизических условий.

2. Результаты сравнения эмпирической модели IRI-2001 и теоретических высотных профилей $[O^+]/n_e$ свидетельствуют о высоких точностных характеристиках разработанной теоретической модели ионосферы для интервала высот 100–200 км, так как относительная погрешность определения относительной концентрации иона атомарного кислорода не превышает 4–7 %.

3. При увеличении уровня солнечной активности на высотах 140–200 км относительная концентрация ионов атомарного кислорода увеличивается, что приводит к увеличению высоты максимума слоя F1 и к уменьшению высоты минимума и ширины межслоевой впадины F1–F2, причем более существенное и быстрое увеличение относительной концентрации ионов атомарного кислорода наблюдается при увеличении уровня солнечной активности $F_{10.7}$ от 70 до 140, что приводит к быстрому увеличению высоты максимума слоя F1 и к быстрому уменьшению высоты минимума и ширины межслоевой впадины F1–F2.

Автор благодарен доктору физ.-мат. наук, профессору Л. Ф. Черногору за обсуждение результатов работы.

1. Антонова Л. А., Иванов-Холодный Г. С. Слой F1. Условия появления и высота // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1988. — 28, № 6. — С. 940–944.
2. Антонова Л. А., Иванов-Холодный Г. С. Солнечная активность и ионосфера (на высотах 100–200 км). — М.: Наука, 1989. — 168 с.

3. Антонова Л. А., Иванов-Холодный Г. С., Чертопруд В. Е. Аэрономия слоя Е (учет вариаций УФ-излучения Солнца и геомагнитных возмущений). — М.: Янус, 1996. — 168 с.
4. Иванов-Холодный Г. С., Фирсов В. В. Спектр коротковолнового излучения Солнца при различных уровнях активности // Геомагнетизм и аэрономия. — 1974. — **14**, № 3. — С. 393—398.
5. Поляков В. М., Щепкин Л.Ф., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Ионосферные процессы. — Новосибирск: Наука, 1968. — 536 с.
6. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci. — 2001. — **36**, N 2. — P. 261—275.
7. Jacchia L. G. Revised static models of the thermosphere and exosphere with empirical temperature profiles // Spec. Rep. N 332. Smithsonian. Astrophys. Observ., Cambridge, Mass. — 1971.
8. Schunk R. W., Nagy A. F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. — Cambridge atmospheric and space science series, 2000. — 555 p.
9. Stubbe P. The thermosphere and the F-region: a reconciliation of theory with observations // Ionospheric Research Sci. Penn. State University. — 1973. — Rep. N 418. — 156 p.
Надійшла до редакції 16.07.10

T. G. Zhivolup

VARIATIONS OF RELATIVE CONCENTRATION OF ATOMIC OXYGEN IONS IN ACCORDANCE WITH THE SOLAR ACTIVITY LEVEL AND THEIR IMPACT ON THE FORMATION OF THE IONOSPHERE F1-LAYER

A theoretical model of the ionosphere for a height interval from 100 to 200 km is developed and some information on variations of relative concentration of atomic oxygen ions are derived. Electronic concentration height profiles are calculated and dependences of F1-layer maximum height and parameters of interlayer valley F1–F2 on the solar activity level are obtained.