

Т.Г. ЖИВОЛУП, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт ионосферы НАН и МОН Украины

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

Розроблено теоретичну модель іоносфери для інтервалу висот 100 – 200 км. Отримано результати про варіації відносної концентрації іону атомарного кисню за допомогою розробленої теоретичної моделі іоносфери для інтервалу висот 100 – 200 км. За допомогою цієї розробленої моделі були розраховані профілі електронної концентрації та отримані залежності висоти максимуму шару F1 та параметрів міжшарової западини F1-F2 від рівня сонячної активності.

The theoretical model of the ionosphere for the height interval 100 – 200 km is developed. Results about variations of relative concentration of the atomic oxygen ion with the help of the developed theoretical model of the ionosphere for the height interval 100 – 200 km are received. With the help of this developed model electronic concentration height profiles have been designed and dependences of F1-layer height maximum and parameters interlayer valley F1-F2 from the solar activity level are received.

Постановка задачи. Одной из важнейших задач теории и моделирования нижней части области F ионосферы, состоящей из различных ионов, является разработка таких моделей, которые достоверно 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 значительную роль в распространении радиоволн. Поэтому создание надежной теоретической модели нижней части области F ионосферы и изучение поведения слоя F1 при разных гелиогеофизических условиях, особенно в зависимости от относительной концентрации атомарного кислорода, представляет интерес, как для фундаментальных исследований, так и для решения прикладных задач геофизики и распространения радиоволн.

Анализ литературы. В работах [1, 2] исследуется поведение слоя F1 и его высоты максимума с помощью однопараметрического семейства кривых, параметром которого является относительный ионный состав, характеризующийся величиной $X = ([O^+]/n_e)([O^+]/[M^+])$, где $[M^+]$ – сумма концентраций молекулярных ионов, что позволило получить в аналитическом виде условия возникновения на профиле $n_e(h)$ максимума или перегиба.

Из [3] 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. Теория слоя F1 разработана еще недостаточно, а моделирование поведения высоты слоя F1 сталкивается с большими трудностями [4].

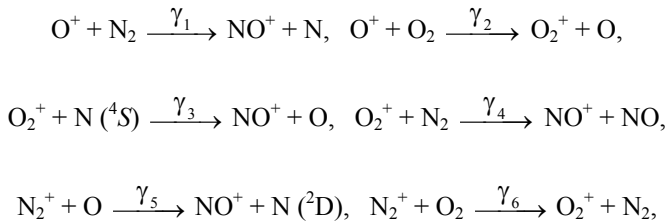
Цель статьи – изложение результатов исследования вариаций относительной концентрации ионов атомарного кислорода в зависимости от уровня солнечной активности (СА) и их связи с высотой максимума слоя F1 и параметрами межслоевой впадины F1-F2 с помощью разработанной теоретической модели ионосферы для высот 100 – 200 км.

Теоретическая модель ионосферы для интервала высот 100 – 200 км. Разработанная автором теоретическая модель ионосферы для интервала высот 100 – 200 км использует данные модели MSIS-86 для концентраций нейтральных частиц на высотах 100 – 200 км для конкретного 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 [5].

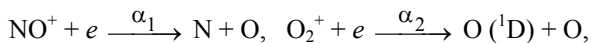
Разработанная теоретическая модель включает основные ионно-обменные реакции и реакции диссоциативной рекомбинации и уточненные значения их скоростей, приведенные в [6]. Модель учитывает ионизацию нейтральной атмосферы солнечным излучением и определяет из условий ионизационно-рекомбинационного равновесия концентрацию электронов n_e и концентрации ионов NO^+ , O_2^+ , O^+ и N_2^+ .

Модель использует девятиинтервальный спектр коротковолнового солнечного излучения, приведенный в [7], и зависимость интенсивности коротковолнового излучения Солнца от значения индекса $F_{10,7}$ из работы [8].

Предложенная модель учитывает следующие основные ионно-обменные реакции:



и две реакции диссоциативной рекомбинации:



где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6, \alpha_1, \alpha_2$ – скорости реакций.

Система уравнений баланса ионизации в стационарном случае имеет следующий вид:

$$0 = q_1 - [\text{N}_2^+] \{ \gamma_5[\text{O}] + \gamma_6[\text{O}_2] \},$$

$$0 = q_2 - [\text{O}^+] \{ \gamma_1[\text{N}_2] + \gamma_2[\text{O}_2] \},$$

$$0 = q_3 - [\text{O}_2^+] \{ \gamma_3[\text{N}] + \gamma_4[\text{N}_2] \} - \alpha_2[\text{O}_2^+]n_e + \gamma_2[\text{O}_2][\text{O}^+] + \gamma_6[\text{O}_2][\text{N}_2^+],$$

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

$$n_e = [\text{NO}^+] + [\text{O}_2^+] + [\text{N}_2^+] + [\text{O}^+].$$

Скорости ионизации q_1 , q_2 , q_3 определяются путем ионизации N_2 , O , O_2 девятиинтервальным спектром коротковолнового солнечного излучения, приведенного в [7].

Система уравнений баланса ионизации сводится к кубическому уравнению относительно n_e :

$$n_e^3 + bn_e^2 + cn_e + d = 0, \quad (1)$$

где

$$b = A_2 - A_3,$$

$$c = -(A_2A_3 + C_1 + C_2),$$

$$d = -(A_1C_2 + A_2C_1).$$

$$A_1 = \frac{\gamma_3[\text{N}] + \gamma_4[\text{N}_2]}{\alpha_1},$$

$$A_2 = \frac{\gamma_3[\text{N}] + \gamma_4[\text{N}_2]}{\alpha_2},$$

$$A_3 = [\text{O}^+] + [\text{N}_2^+],$$

$$C_1 = \frac{\gamma_1[\text{N}_2][\text{O}^+] + \gamma_5[\text{O}][\text{N}_2^+]}{\alpha_1},$$

$$C_2 = \frac{q_3 + \gamma_2[\text{O}_2][\text{O}^+] + \gamma_6[\text{O}_2][\text{N}_2^+]}{\alpha_2}.$$

Уравнение (1) имеет три действительных корня (положительный и два отрицательных), потому что его дискриминант меньше нуля.

Так как у уравнения (1) – только один положительный корень, а на высотах 100 – 200 км $n_e > 0$, то решением уравнения (1) будет этот положительный корень. В результате рассчитаны модельные профили $n_e(h)$, а из системы уравнений – высотные профили концентрации ионов O^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2^+ в интервале высот 100 – 200 км для конкретных гелиогеофизических условий.

Сопоставление с международной справочной моделью. Данные ракетных измерений относительного ионного содержания, представленные в Международной справочной модели ионосферы IRI-2001, представляют интерес как для уточнения 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 для интервала высот 100 – 200 км с Международной справочной моделью ионосферы IRI-2001 выбраны конкретные дни 2001 г., относящиеся к весеннему и осеннему равноденствиям, а также к летнему и зимнему солнцестояниям: 22 марта (индекс СА $F_{10,7} = 145$), 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 относительного содержания ионов O^+ сопоставлялись с эмпирическими высотными профилями $[O^+]/n_e$ Международной справочной модели ионосферы IRI-2001.

Сравнение экспериментальных высотных профилей относительного содержания ионов O^+ с теоретическими расчётами по Международной справочной модели ионосферы IRI-2001 показало их хорошее соответствие для рассматриваемых геофизических периодов в диапазоне высот 100 – 200 км. В интервале высот 100 – 200 км расхождение экспериментальных и теоретических профилей для 22 марта, 22 июня и 22 сентября не превышает 4%, а для 22 декабря – не превышает 7%.

Результаты сравнения экспериментальных 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 ионов атомарного кислорода в основном не превышает 4 – 7%.

Результаты расчетов. Выполнены расчеты относительной концентрации ионов атомарного кислорода в нижней части области F ионосферы в зависимости от уровня СА. Для этого была использована теоретическая модель ионосферы для интервала высот 100 – 200 км.

Для исследования влияния СА на поведение относительной концентрации ионов атомарного кислорода был выбран период летнего

солнцестояния и следующие уровни СА: $F_{10,7} = 70, 100, 140, 170$ и 200 . Исследования выполнены для высот $140, 150, 160, 170, 180, 190$ и 200 км.

Теоретические расчеты показали, что с ростом уровня СА $[O^+]/n_e$ увеличивается на всех рассматриваемых высотах. Так, на высоте 140 км при возрастании уровня СА $F_{10,7}$ от 70 до 140 $[O^+]/n_e$ 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. 1).

Как видно из приведенных значений, при возрастании уровня СА $F_{10,7}$ от 70 до 140 увеличение $[O^+]/n_e$ убывает с ростом высоты. При возрастании уровня СА $F_{10,7}$ от 140 до 200 относительная концентрация ионов атомарного кислорода также увеличивается на всех рассматриваемых высотах. Так, на высоте 140 км $[O^+]/n_e$ увеличилась примерно 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. 1). Как видно, при возрастании уровня СА $F_{10,7}$ от 140 до 200 увеличение $[O^+]/n_e$ также убывает с ростом высоты.

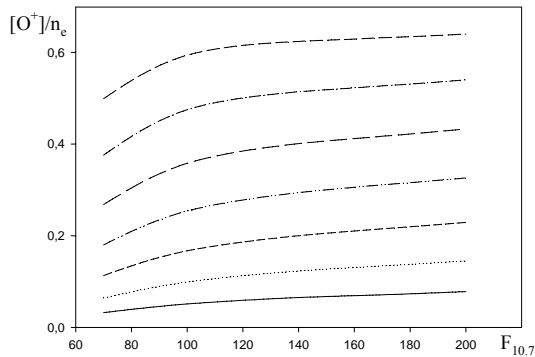


Рис. 1. Изменение относительной концентрации иона атомарного кислорода на высотах $140, 150, 160, 170, 180, 190$ и 200 км с ростом уровня СА $F_{10,7}$ от 70 до 200

Таким образом, увеличение $[O^+]/n_e$ на высотах $140 - 200$ км более существенное при возрастании уровня СА $F_{10,7}$ от 70 до 140 .

Для исследования влияния СА на формирование слоя F1, поведение высоты его максимума, а также на параметры межслоевой впадины F1-F2 выполнены расчеты высотных профилей концентрации электронов по разработанной теоретической модели ионосферы для интервала высот $100 - 200$ км.

На рис. 2 показано поведение высоты максимума слоя F1 ионосферы при возрастании индекса СА $F_{10,7}$ от 70 до 200 .

Как видно из рис. 2, при возрастании СА возрастает высота максимума слоя F1. При увеличении индекса СА $F_{10,7}$ 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 росте индекса СА $F_{10,7}$ наблюдается медленный рост высоты максимума слоя F1. Так при изменении индекса СА $F_{10,7}$ от 140 до 200 высота максимума слоя F1 возрастает от 165 до 167 км (на 2 км).

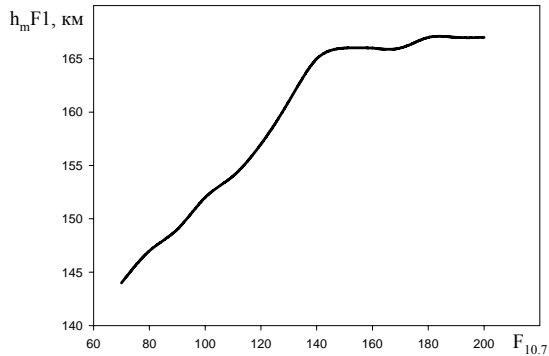


Рис. 2. Изменение высоты максимума слоя F1 с ростом СА

Расчеты показали, что при возрастании индекса СА $F_{10,7}$ от 70 до 130 высота минимума межслоевой впадины F1-F2 $h_v F1$ (рис. 3) и ее ширина D (рис. 4) быстро уменьшаются. Как видно из рис. 3 и рис. 4, 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 кислорода наблюдается при возрастании уровня СА $F_{10,7}$ от 70 до 140, что приводит к быстрому возрастанию высоты максимума слоя F1 и к быстрому уменьшению высоты минимума и ширины межслоевой впадины F1-F2.

Обсуждение. Проведенные исследования влияния СА на поведение $[O^+]/n_e$ в нижней части области F ионосферы и на формирование и поведение параметров слоя F1 ионосферы показали, что при возрастании СА возрастает относительная концентрация ионов атомарного кислорода, что приводит к возрастанию высоты максимума слоя F1.

Особенно быстрое возрастание высоты максимума слоя F1 наблюдается при наиболее быстром возрастании $[O^+]/n_e$, что происходит при увеличении индекса СА $F_{10,7}$ от 70 до 130. При этом зависимость высоты максимума слоя F1 от индекса $F_{10,7}$ близка к линейной. При дальнейшем росте индекса СА $F_{10,7}$ наблюдается медленный рост $[O^+]/n_e$. При этом и высота максимума слоя

F1 слабо возрастает. Поэтому следует отметить, что более быстрое возрастание высоты максимума слоя F1 наблюдается тогда, когда происходит наиболее быстрое увеличение $[O^+]/n_e$, и при этом зависимость высоты максимума слоя F1 от индекса $F_{10,7}$ близка к линейной.

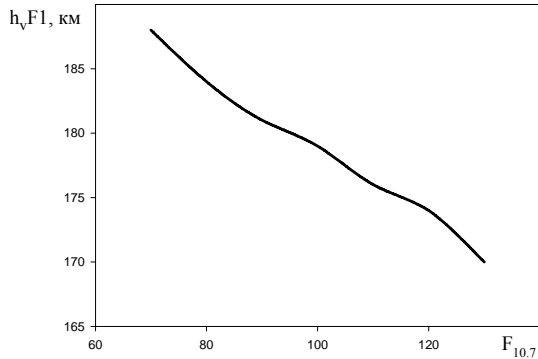


Рис. 3. Изменение высоты минимума межслоевой впадины F1-F2 с ростом СА

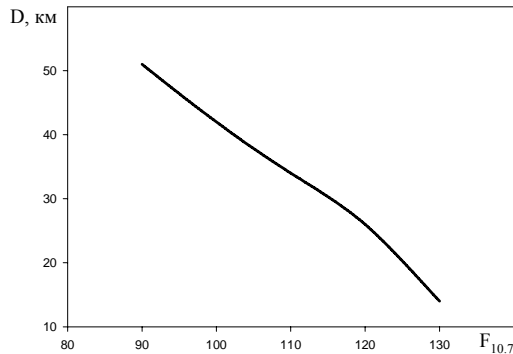


Рис. 4. Изменение ширины межслоевой впадины F1-F2 с ростом СА

При наиболее быстром возрастании $[O^+]/n_e$ высота минимума межслоевой впадины F1-F2 (см. рис. 3) и ее ширина (см. рис. 4) 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 $[O^+]/n_e$, которое наблюдается на высотах 140 – 200 км при возрастании уровня СА $F_{10,7}$ от 70 до 140, приводит к

быстрому возрастанию 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 экспериментальных 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 $[O^+]/n_e$ не превышает 4 – 7%.

3. При возрастании уровня SA на высотах 140 – 200 км $[O^+]/n_e$ возрастает, 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 $[O^+]/n_e$ наблюдается при возрастании уровня солнечной активности $F_{10,7}$.

Список литературы. 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. Поляков В.М., Щепкин Л.Ф., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Ионосферные процессы. – Новосибирск: Наука, 1968. – 536 с. 4. Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. – Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p. 5. 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. 6. Антонова Л.А., Иванов-Холодный Г.С., Чертопруд В.Е. Аэронавигация слоя E (учет вариаций УФ-излучения Солнца и геомагнитных возмущений). – М.: Янус, 1996. – 168 с. 7. Stubbe P. The thermosphere and the F-region a reconciliation of theory with observations. – Ionospheric Research Sci. Rep. N 418. Penn. State University. – 1973. – 156 p. 8. Иванов-Холодный Г.С., Фирсов В.В. Спектр коротковолнового излучения Солнца при различных уровнях активности // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1974. – 14, № 3. – С. 393 – 398.

Поступила в редакцию 03.06.2010