

Метод расчета спектров фотоэлектронов в ионосфере

Л.Б. Волкомирская¹, О.А. Гулевич¹, Н.В. Кривошеев², Т.Н.Ларина²,

А.Е. Резников¹

¹ *Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук им. Н.В. Пушкова.*

² *Донской государственный технический университет*

Аннотация. Рассматривается методика расчета спектров первичных фотоэлектронов, образующихся в результате ионизации нейтральных составляющих атмосферы солнечным излучением в области E ионосферы Земли. Приведены примеры расчета спектров фотоэлектронов на высотах (100 – 130) км в зависимости от зенитного угла Солнца для среднего уровня солнечной активности.

Ключевые слова: солнечное излучение, спектры фотоэлектронов, зенитный угол Солнца, соударения электронов, потенциал ионизации, вторичная ионизация, эффективные сечения поглощения.

Особенности проектирования средств связи в различных диапазонах длин волн требует достоверного задания условий их распространения [1,2]. Например, для моделирования ионосферного распространения радиоволн необходимо уметь достаточно точно прогнозировать пространственные распределения электронной концентрации, в частности, в E–области ионосферы. Эта задача, в свою очередь, требует задания параметров, определяющих поведение нейтральной атмосферы, а также температурный режим нейтральной и ионизированной компонент. Расчет спектров первичных фотоэлектронов является одним из этапов изучения теплового баланса ионосферных электронов в области E ионосферы.

Основным источником ионизации нейтральных составляющих в ионосфере Земли является солнечное излучение с длиной волны менее 1037,6 Å. Если энергия первичного фотоэлектрона превышает потенциал ионизации или возбуждения нейтральной молекулы, то при соударении имеет место вторичная ионизация или возбуждение нейтрала.

Скорость образования фотоэлектронов q под действием монохроматического излучения с длиной волны λ и интенсивностью I определяется из соотношения [3–8]:

$$q = \sigma_i I r n, \quad (1)$$

где: σ_i – эффективное сечение ионизации; n – концентрация нейтральных частиц, r – относительный выход фотоэлектронов.

Каждый образованный в результате фотоионизации однозарядный ион может находиться в различных энергетических состояниях, лежащих выше основного, следовательно, фотоэлектрон также может иметь одно из нескольких возможных значений энергии E . При ионизации нейтральной молекулы фотоном с энергией ε кинетическая энергия электрона равна

$$E = \varepsilon - E_i, \quad (2)$$

где E_i – потенциал ионизации для данного состояния иона.

Таким образом, если возможно несколько состояний ионизации, то для расчета зависимости скорости производства первичных фотоэлектронов от энергии необходимо знать вероятность реализации каждого из них (относительны выход электронов) r .

Если ионизирующее излучение не является монохроматическим, но в интервале длин волн $\Delta\lambda$ все величины, входящие в (1), постоянны, то скорости заполнения фотоэлектронами соответствующих интервалов энергии ΔE можно представить для каждого сорта нейтральных частиц как

$$\Delta q = r \sigma_i I n \Delta\lambda. \quad (3)$$

В условиях ионосферы до каждой фиксированной высоты h солнечное излучение приходит ослабленным за счет поглощения в вышележащих слоях атмосферы [3–7]:

$$I(h) = I_0 \exp \left\{ - \sum_k \sigma_k \int_h^{\infty} ch(\chi, h) n_k dh \right\}. \quad (4)$$

Здесь I_0 – интенсивность излучения за пределами атмосферы [9];

σ_k – эффективное сечение поглощения; $ch(\chi, h)$ – функция Чепмена, χ – зенитный угол Солнца. Индекс k определяет тип нейтральной частицы.

При расчете спектров первичных фотоэлектронов нами были использованы данные о сечениях поглощения, ионизации и о значениях I_0 для среднего уровня солнечной активности [10]. Скорости ионизации $q(E)$ рассчитаны для интервалов длин волн на которые разбита область спектра солнечного излучения от 1037,6 А до 31 Å. За основу разбиения взяты интервалы $\Delta\lambda$ из [3–9]. В каждом интервале $\Delta\lambda$ рассмотрен процесс ионизации трех составляющих нейтральной атмосферы – молекулярного и атомарного кислорода и азота.

Число энергетических состояний, образующихся в результате фотоионизации ионов O^+ , O_2^+ и N^+ , в каждом интервале изменяется в зависимости от длины волны ионизирующего излучения от одного до тринадцати. Данные о вероятностях r и ΔE , которые образующиеся фотоэлектроны заполняют со скоростью $q(E)$, взяты из [4–6]. Трудность расчетов состоит, в основном, в необходимости введения большого числа исходных данных. Результаты расчета $q(E)$ на высоте 130 км для интервала $\Delta\lambda$ от 460 до 480 Å и использованные для этих расчетов исходные данные представлены в таблице 1.

Таблица №1

Результаты расчета $q(E)$ на высоте 130 км для интервала $\Delta\lambda$ от 460 до 480 Å и использованные для этих расчетов исходные данные

Ион	Состояние	Эффективное сечение поглощения, $\sigma \cdot 10^{19}$, см ²	Относительный выход электронов, r	Интервалы энергии фотоэлектронов E , эВ	Скорости ионизации $q \cdot 10^{-2}$, см ⁻³ сек ⁻¹
O^+	4s	121	0,32	12,2 – 13,4	6,2
O^+	2D	121	0,42	8,9 – 100,1	8,1
O^+	2P	121	0,26	7.1 – 8.3	5,0
O_2^+	X	230	0,03	13,7 – 14,9	7,0
O_2^+	a	230	0,07	9,7 – 10,9	1,64
O_2^+	A	230	0,24	9,0 – 10,2	5,6
O_2^+	B	230	0,64	7,6 – 8,8	1,54
O_2^+	X	160	0,14	10,2 -11,4	1,34
O_2^+	B	160	0,20	7,0 - 8,2	3,24
O_2^+	C	160	0,32	2,2 – 3,4	1,91

Примеры спектров, полученных для высот 120 – 130 км при различных значениях зенитного угла Солнца, показаны на рисунках 1,2 в виде графиков зависимости числа фотоэлектронов $q(E)$, образующихся в интервале $\Delta E = 1$ эВ в 1 секунду в 1 см³ от энергии E .

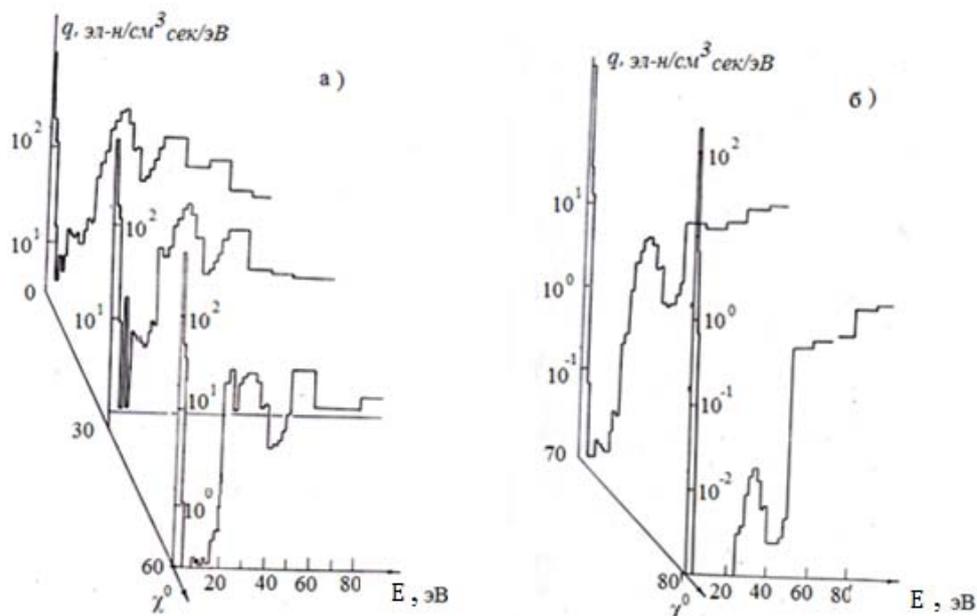


Рис. 1. – Примеры спектров на высоте 130 км при различных значениях зенитного угла χ

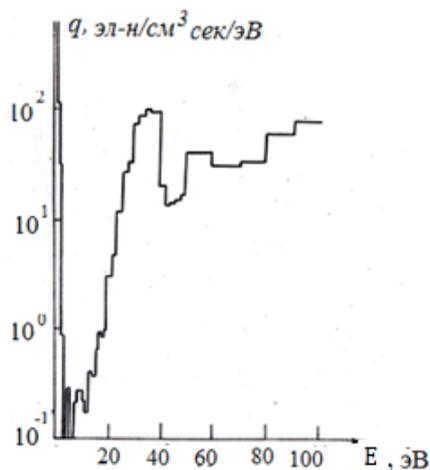


Рис. 2. – Спектры фотоэлектронов на высоте 120 км

Как видно из графиков, энергетические спектры первичных фотоэлектронов имеют ряд более или менее ярко выраженных пиков и провалов, что вызвано как линейчатым характером спектра ионизирующего излучения Солнца, так и сложной зависимостью эффективных сечений поглощения и ионизации от длины волны λ и сорта нейтральных частиц.

Характерным свойством каждого из полученных спектров является наличие абсолютного минимума в области энергий от 5 до 10 эВ, который особенно четко выражен при больших значениях зенитного угла Солнца ($\chi = 70^{\circ} - 80^{\circ}$), и максимума в области энергий (20 – 40) эВ. При минимуме солнечной активности этот максимум можно сравнить по порядку величины только с пиком в области малых ($E < 5$ эВ) [11]. В нашем случае величина $q(E)$ относительно велика и в области более высоких значений энергии ($E > 50$ эВ). Причем с возрастанием χ и уменьшением высоты от 130 до 120 км относительное число фотоэлектронов, образующихся с энергиями более 50 эВ, все более увеличивается.

Такое изменение спектра первичных фотоэлектронов обусловлено возрастанием роли коротковолновой части ионизирующего излучения Солнца (которая ответственна за образование наиболее энергичных фотоэлектронов) с увеличением оптической длины.

На рисунке 3 (кривые 1–3) для высоты 130 км показаны соответственно полная скорость образования первичных фотоэлектронов q_n , средняя энергия фотоэлектронов $\langle E \rangle$, полная энергия фотоэлектронов E_n , образующихся за одну секунду в 1 см^3 . Как q_n так и E_n обнаруживают существенную зависимость от зенитного угла Солнца χ . На высоте 120 км при $\chi = 30^{\circ}$ значения q_n и E_n составляют, соответственно, $6,465 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3} \text{ сек}^{-1}$ и $2,666 \cdot 10^5 \text{ эВ см}^{-3} \text{ сек}^{-1}$. Сравнение этих значений с результатами, полученными для высоты 130 км и $\chi = 30^{\circ}$ (рис. 3), указывает на слабую зависимость от высоты величин q_n и E_n в области 120 – 130 км при относительно небольшом $\chi = 30^{\circ}$. Средняя энергия фотоэлектронов на высоте 120 км составляет около 41 эВ. На высоте 130 км фотоэлектроны обладают средней энергией такой величины в диапазоне χ от 0° до 60° .

При более высоких значениях величина $\langle E \rangle$ резко падает (рис.3, кривая 2).

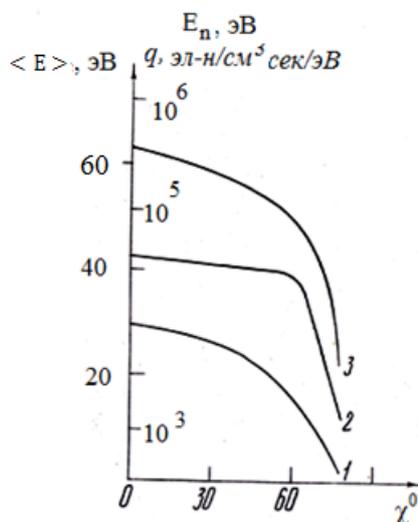


Рис. 3. Полная скорость образования первичных фотоэлектронов q_n , (кривая 1), средняя энергия фотоэлектронов $\langle E \rangle$ (кривая 2) и полная энергия фотоэлектронов E_n , (кривая 3) на высоте 130 км.

График, приведенный на рис.3 (кривая 2) видимо не вполне отражает реальную зависимость $\langle E \rangle$ от χ для достаточно больших ($\chi > 60^\circ$) значений зенитного угла. Это связано с уже отмеченным выше эффектом усиления роли высокоэнергетической части спектра солнечного излучения при больших χ . Здесь при расчете q_n , E_n и $\langle E \rangle$ учитывались только фотоэлектроны, образующиеся в диапазоне от 0 до 100 эВ, а при $\chi = 60^\circ$ уже нельзя игнорировать влияние фотоэлектронов, имеющих более высокие энергии.

Таким образом, хотя спектр первичных фотоэлектронов и определяется сочетанием большого числа параметров (спектр солнечного излучения, эффективные поперечные сечения поглощения и ионизации, вероятности r и прочее) что делает невозможным его представление в аналитическом виде, все же можно указать определенные тенденции в его поведении в зависимости от зенитного угла Солнца и высоты.

Литература

1. Омелянчук Е.В., Тихомиров А.В., Кривошеев А.В. Особенности проектирования систем связи миллиметрового диапазона радиоволн // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1742/.
 2. Тимошенко А.Г., Круглов Ю.В., Ломовская К.М., Белоусов Е.О., Солодков А.В. Особенности проектирования схем для исследования интегральных антенн // Инженерный вестник Дона, 2011, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3_y2011/476/.
 3. Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. Солнце и ионосфера. Москва: Наука. 1969. 456с.
 4. Киселев В.А. Формула для расчета скорости ионообразования. //Труды института прикладной геофизики Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. 1985. № 65. С. 19-25.
 5. Киселев В.А., Микиров А.Е. Инвариантная форма представления относительного спектра фотоэлектронов // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. 25. № 4. С. 677-679.
 6. Киселев В.А., Микиров А.Е. Энергетический спектр фотоэлектронных линий с энергией 22,2-27,2 эВ // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. 25. № 5. С. 743-749.
 7. Уваров В. М. Эффективный метод расчета скоростей фотоионизации //Геомагнетизм и аэрономия. 1995. 35. № 1. С. 182-183.
 8. Brasseur G.P., Solomon S. Aeronomy of the Middle Atmosphere (Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere). Berlin, New York: Springer, 2005. 651 p.
 9. Warren Harry P A solar minimum irradiance spectrum for wavelengths below 1200 A // Astrophysical Journal Supplement Series. 2005. 157. №1. pp. 147-173.
-



10. Иванов-Холодный Г.С., Величанский Б.Н. Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. Москва: Наука. 1973. № 26. вып. 103. 230с.
11. Хазанов Г.В. Кинетика электронной компоненты плазмы верхней атмосферы. Москва: Наука. 1979. 123с.

References

1. Omel'yanchuk E.V., Tikhomirov A.V., Krivosheev A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1742/.
 2. Timoshenko A.G., Kruglov Yu.V., Lomovskaya K.M., Belousov E.O., Solodkov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3_y2011/476/.
 3. Ivanov-Kholodnyy G.S., Nikol'skiy G.M. Solntse i ionosfera. [Sun and ionosphere]. Moskva: Nauka, 1969. 456 p.
 4. Kiselev V.A. Trudy instituta prikladnoy geofiziki Gosudarstvennogo komiteta SSSR po gidrometeorologii i kontrolyu prirodnoy sredy. 1985. № 65. pp. 19-25.
 5. Kiselev V.A., Mikirov A.E. Geomagnetizm i aeronomiya. 1985. 25. № 4. pp. 677-679.
 6. Kiselev V.A., Mikirov A.E. Geomagnetizm i aeronomiya. 1985. 25. № 5. pp. 743-749.
 7. Uvarov V. M. Geomagnetizm i aeronomiya. 1995. 35. № 1. pp. 182-183.
 8. Warren Harry P Astrophysical Journal Supplement Series. 2005. 157. №1. pp. 147-173.
 9. Brasseur G.P., Solomon S. Aeronomy of the Middle Atmosphere (Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere). Berlin, New York: Springer, 2005. 651 p.
 10. Ivanov-Kholodnyy G.S., Velichanskiy B.N. Moskva: Nauka. 1973. № 26. 103. 230p.
-



11. Khazanov G.V. Kinetika elektronnoy komponenty plazmy verkhney atmosfery. [The kinetics of the electron component of the upper atmosphere of the plasma]. Moskva: Nauka. 1979. 123p.