

Г.Н. Шынықұлова, Қ.Е. Нұрғалиева

*Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан***МАКСВЕЛЛДІК ЕМЕС ЭЛЕКТРОНДАР БАР БОЛҒАН КЕЗДЕ ИОНОСФЕРА БИІКТІКТЕРІНДЕ ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТІҢ ЗАРЯДТАЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ**

**Аннотация.** Ұсынылып отырған жұмыста максвеллдік емес электрондары бар ионосферада мезосфера биіктігінде тозаңды бөлшектің зарядталуы зерттелген. Ортаның тепе-теңсіз болуы радиоқызырғыш стендтің жұмысы салдырынан болып тұр. Электрондардың жылдамдықтар бойынша үлестірілуі ретінде  $k$ -үлестірілуі қолданылған. Есептеулер 85-95 км биіктігіндегі ионосфералық плазма үшін  $150^\circ \text{K}$  температурада жүргізілді, электрондар мен иондар концентрациясы  $10^{10} \text{ м}^{-3}$  деп алынды. Барлық тозаңдық бөлшектер біртекті және бәрінің өлшемдері бірдей және 10 нм құрайды деп есептелінді. Тозаңды бөлшектердің зарядталуын модельдеу үшін OML (Orbit Motion Limited) теориясы қолданылды. Тепе-теңсіз плазмалық ортадағы тозаңды бөлшектің өлшемсіздірілген потенциалының тепе-теңдіктегі плазмалық ортадағы тозаңды бөлшектің өлшемсіздірілген потенциалына қатынасы есептелінді. Тепе-теңсіз плазмалық ортадағы тозаңды бөлшектің бет потенциалының тепе-теңдіктегі плазмалық ортасындағы жағдайдан бірнеше есе көп екендігі анықталды және ионосфералық газдың иондық құрылымына байланысты болатыны көрсетілді. Бет потенциалының тепе-теңсіз және тепе-теңдіктегі орта арасындағы айырмашылық температура өскен сайын кемитіні де байқалды.

**Түйін сөздер:** мезосфера, ионосфера, тозаңды плазма, максвеллдік үлестірілу, максвеллдік емес үлестірілу, каппа үлестірілу

**Кіріспе**

Жер атмосферасына күнделікті ғарыш кеңістігінен 40 тоннадай тозаңды бөлшек енеді, олардың көбі метеор бөлшектерінің қалдығы. Жер атмосферасына енген метеор бөлшектер тежеліп, 70-120 км биіктікте жанады, нәтижесінде метеор заттардың буы конденсацияланады және ұсақ дисперсті нанобөлшектер құрайды. Өрт немесе жанартау атқылауы нәтижесінде де төменгі атмосферадан нанобөлшектер жетуі мүмкін. 80-95 км биіктікте субмикронды және нано өлшердегі бөлшектердің концентрациясының басым бөлігі шоғырланып, тозаңды қабат түзеді [1-2]. Мамыр айының аяғы мен тамыз айының соңына дейін бақыланатын полярлық мезосфералық құбылыстар – «күмістелген бұлттар» мен «полярлық мезосфералық радиошағылулар» табиғаты осы тозаңды қабаттың түзілуіне байланысты. «Күмістелген бұлттар» 80-85 км биіктікте байқалады және оларды күн батқаннан кейін көруге болады, ал «полярлық мезосфералық радиошағылулар» жиілігі 50-1000 МГц болатын радарлардан 85-95 км биіктікте

елеулі радио шағылулар арқылы білінеді [1-2].

Жазғы полярлық мезосфера уақытында ауа температурасы 150 К-ге дейін төмендейді, осы биіктіктерде су буы қаныққан күйіне жетеді. Белгілі бір мөлшерге дейін өскен тозаңды бөлшектер өзі шоғырланған жерде иондалу сипатын анықтайды [1-2].

Метеорлардың иондалған іздері бар екендігін [3-4] жұмыстарында алғашқы рет көрсетілген. Бірақ мезосфералық тозаңдық плазманың пайда болуы және динамикасын зерттеу облыстары, жерден, спутниктен және ракеталық өлшеулер арқылы тек өткен ғасырда басталған [5-13].

Тозаңдық мезосфералық плазманың қасиеттерін зерттеуге байланысты ғылыми қызығушылықтың жоғары екендігін атап өту керек. Осылайша, мезосфераның биіктіктеріндегі тозаң қабатын зерттеудің негізгі бағыттарының бірі антропогендік факторларға тәуелді. Соңғы 100 жыл ішінде мезосфералық бұлттың ұлғаюы, жоғарыда аталған құбылыстар мен климаттың жаһандық өзгерістері арасындағы байланыстың болуы мүмкін

деген болжамдар келтірілген [14-17]. Зарядталған тозаңды бөлшектер ионосфералық плазмадағы физика-химиялық процестерге айтарлықтай, кейбір жағдайда олардың рөлі алдыңғы қатарға шығады [18-19]. Осыған орай, АІМ 2007 жылдың сәуір айында полярлық мезосфералық бұлтты зерттеуге бағытталған бірінші ғарыш миссиясы іске қосылды [20]. Сонымен қатар, [21] жұмыста метеорлы тозаңбөлшектері спрайттардың пайда болу физикасына дақатысады деп айтылған. Сондай-ақ, тозаңның соқтығысу жиілігіне және өткізгіштігіне әсері, 100-120 км биіктіктегі ток өткізу қабатына да, сайып келгенде, ионосфераның динамикасына да әсер етеді [22].

### Негізгі бөлім және нәтижелерді саралау

Бүгінгі таңда радиоқызырушы стендтерде орындалған жұмыстар [20]. Ұсынылып отырған жұмыста біз есептеулерді 85 км биіктікте 150°К температурада және электрон мен ион концентрациясы  $10^{10} \text{ м}^{-3}$  ионосфералық плазма үшін жүргізілді. Бірдей өлшемді және тозаңды бөлшектердің бәрі шамамен 10 нм құрайды деп есептелінді.

Газды плазма ішіндегі тозаңды бөлшектердің зарядталуының сандық сипаттамасын алу үшін, әдетте, плазмадағы электрлік зондтардың теориясына негізделген теориялық модельдер қолданылады. Ең жиі қолданылатын модельдердің бірі - шектеулі орбиталық қозғалыстар (орбиталық қозғалыстың шектеулі (OML) теориясы) [25].

Әдетте, бұл жуықтаудың қолданылу шарттары,  $a \ll \lambda_D \ll \ell_{i(e)}$  мұндағы  $a$  - тозаң бөлшегінің өлшемі, барлық бөлшектердің өлшемі бірдей және сфералық деп тұжырымдалған,  $\lambda_D$  - Дебай радиусы,  $\ell_{i(e)}$  - орташа еркін жүру жолы. Бұл тәсіл энергия мен импульс моментінің сақталу заңынан электрон мен иондардың тозаңды плазмада жұтылуының қимасын анықтауға мүмкіндік береді [1, 2, 25]:

$$\sigma_e(v) = \begin{cases} \pi a^2 \left(1 + \frac{2e\varphi_s}{m_e v^2}\right), & \frac{2e\varphi_s}{m_e v^2} > -1 \\ 0, & \frac{2e\varphi_s}{m_e v^2} < -1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_e(v) = \pi a^2 \left(1 - \frac{2e\varphi_s}{m_i v^2}\right) \quad (2)$$

мұндағы  $\sigma_{e(i)}(v)$  - электрондармен иондардың жұтылу қимасы,  $m_e(i)$  — электрондардың (иондардың) массалары,  $av$  - электрондар мен иондардың жылдамдықтары,  $\varphi_s$  - тозаңдық бөлшектер бетінің потенциалы.

Бөлшек бетіне электрондар мен иондар ағыны, сәйкесінше қималары мен жылдамдықтар бойынша үлестірілу функциялар  $f_e(v)$  арқылы анықталады [2]:

$$I_{e(i)} = n_{e(i)} \int v \sigma_{e(i)}(v) f_{e(i)}(v) d^3v \quad (3)$$

мұндағы  $n_{e(i)}$  - электрондардың (иондардың) концентрациясы [1, 2, 25].

Әдетте, бұл формуладағы жылдамдық бойынша үлестірілуіне Максвелл үлестірілуін қолданады [1, 2, 25]:

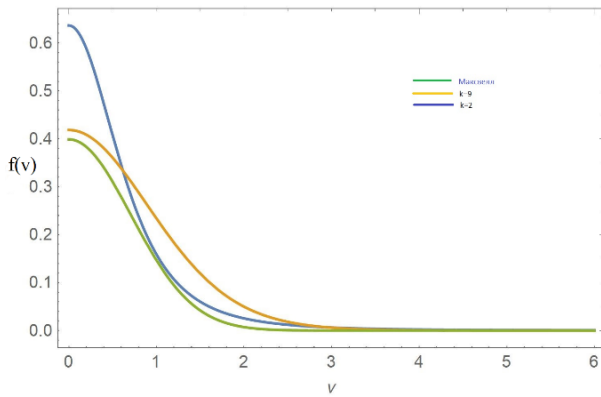
$$f_M(v) = \frac{n}{\sqrt{\left(\frac{2\pi T}{m}\right)^3}} e^{-v^2} \quad (4)$$

Максвеллдік емес плазмадағы тозаң бөлшектерін зарядтау кинетикасын [22-24] қарастыруда. Максвеллдік емес электрондардың үлестірілу функциясы ретінде  $k$  - үлестірілуі қолданылады.

$$f_k(v) = \frac{n}{\sqrt{\left(\frac{2k-3}{m}\right)^3}} \frac{\Gamma(k+1)}{\Gamma\left(k-\frac{1}{2}\right)} (1+v)^{-k-1} \quad (6)$$

мұндағы  $\Gamma$  – гамма функциясы,  $k$  – каппа үлестірілуі.

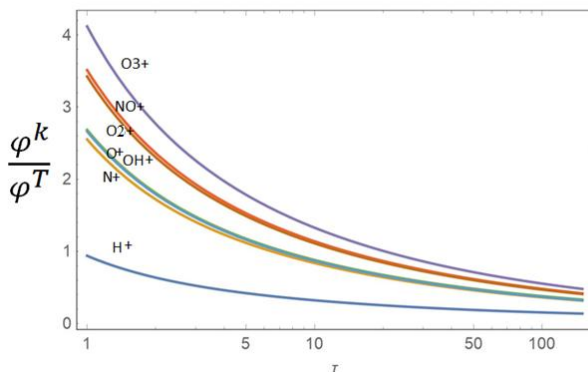
Плазмалық бөлшектердің жылдамдықтар бойынша максвеллдік және максвеллдік емес үлестірілуі бойынша нәтижесі 1-суретте көрсетілген. Максвеллдік үлестірілуде ауытқуды көрсететін каппа 9-ға тең мәні таңдап алынды.



Жасыл – максвеллдік үлестірілу,  
көк – каппа үлестірілу,  $k = 2$ ,  
сары – каппа үлестірілу,  $k = 9$

Сурет 1. Плазмалық бөлшектердің жылдамдықтар бойынша максвеллдік және максвеллдік емес үлестірілуі

Тепе-теңдіксіз плазмалық ортадағы тозанды бөлшектердің өлшемсізделген потенциалының тепе-теңдікті ортадағы потенциалға қатынасының электрондар мен иондардың қатынасына тәуелділігі 2-суретте көрсетілген.



Сурет 2. Тепе-теңдіксіз плазмалық ортадағы тозанды бөлшектердің өлшемсізделген потенциалының тепе-теңдікті ортадағы потенциалға қатынасының температураға тәуелділігі

1-суретте көрініп тұрғандай,  $k = 9$  максвеллдік үлестіруінде максвеллдік емес үлестірілуге қарағанда айтарлықтай ауытқу бар. 2-суреттен, тепе-теңдіксіз плазмалық ортадағы тозанды бөлшектердің өлшемсізделген потенциалының тепе-теңдікті ортадағы потенциалға қатынасының электрондар мен иондардың қатынасына тәуелділігі бойынша потенциалдар қатынасының температура қатынастарының өсуімен

кемитіндігі, реттік нөмірі өскен сайын өсетіндігі байқалады.

### Қорытынды

Сонымен, есептеулер нәтижесінде мынадай қорытынды алынды:

- Тепе-теңдіксіз плазмалық ортадағы тозанды бөлшектердің өлшемсізделген потенциалының тепе-теңдікті ортадағы потенциалға қатынасы электрондар мен иондардың температураларының қатынастары өскен сайын кемиді;

- Тепе-теңдіксіз плазмалық ортадағы тозанды бөлшектердің өлшемсізделген потенциалының тепе-теңдікті ортадағы потенциалға қатынасы мезосфералық компоненттердің реттік нөмірі ұлғайған сайын артады.

### Қолданылған әдебиет

- 1 Попель С. И. Лекции по физике пылевой плазмы, Москва МФТИ – 2012.-с. 110 -112.
- 2 Фортон В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. Пылевая плазма. УФНТом 174, № 5, май 2004 г.стр. 495-544.
- 3 Skellett A M. The effect of meteors on radio transmission through the Kennelly-heavy side layer//Phys. Rev.- 1931- 37 –p. 1668.
- 4 Skellett A M 1935 The ionizing effect of meteors // Proc. Inst. Radio Eng.- 1935- 23 – p. 132–249 Skellett.
- 5 Eklund, W.L. and B.B. Balsley, Long-term observations of the Arctic mesosphere with MST radar at Poker Flat, Alaska// Journal of Geophysic Research – 1981 - 8t –p. 7775.
- 6 Rottger, J., M. T. Rietveld, C. La Hoz, T. Hall, M. C. Kelley, and W. E. Swartz. Polar mesosphere summer echoes observed with the EISCAT 933-MHz radar and the CUPRI 46.9-MHz radar, their similarity to 224-MHz radar echoes and their relationship to turbulence and electron density profiles// Radio Sci. – 1991 – 25 – p. 671- 687.
- 7 Cho, J.Y.N., T.M. Hall, and M.C. Kelley, On the role of charged aerosols in polar mesospheric summer echoes// Journal of Geophysic Research -1992- 97 -p 875-886.
- 8 Kelley, M., and J. Ulwick, Large- and small-scale organization of electrons in the high latitude mesosphere: Implications of the

STATE data// J. Geophys. Res. – 1988 – 93 – p. 7001-7008.

9. Chilson, P.B., E. Belova, M.T. Rietveld, S. Kirkwood, and U. Hoppe, First artificially induced modulation of PMSE using the EISCAT heating facility// Geophysic Research Letter – 2000- 27 –p. 3801-3804.

10 Belova, E., P.B. Chilson, M. Rapp, and M.T. Rietveld, The response time of PMSE to ionospheric heating// Journal of Geophysic Research 108 (D8), 8446, 2003.

11 Havnes, O., Polar mesospheric Summer Echoes(PMSE) overshoot effect due to cycling of artificial electron heating// Journal of Geophysic Research -2014 – 109 - A02309.

12 Sobyenin D.B., Gavrilov B.G., Podgorny I.M. // Adv.Space Res. 2002. V. 29. P. 1345.

13 Gavrilov B.G., Podgorny I.M., Sobyenin D.B. et al. //J. Spacecraft and Rockets. 2004. V. 41. P. 490.

14 Thomas G E, Olivero J J, DeLand M and Shettle E.P. A response to the article by U. von Zahn, Are noctilucent clouds truly a miner’s canary of global change? //Eos Trans. Am. Geophys. Union -2003 – 84 – p. 352.

15 Roble R G and Dickinson R E How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? //Geophys. Res. Lett. – 1989- 16 – p.1441.

16 Taylor M J, Gadsden M, Lowe R P, Zalcik M S and Brausch J Mesospheric cloud observations at unusually low latitudes//J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2002- 64- p. 991–999.

17 DeLand M T, Shettle E P, Thomas G E and Olivero J J A. A quarter-century of satellite PMC observations //J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.- 2006 – 68, 9–p.29.

18 Havnes O., Aslaksen T., Brattli A. // Physica Scripta. 2001. V. T89. P. 133.

19 Klumov B.A., Popel S.I. Bingham R. // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72. С. 524.

20 W A.Scales and A. Mahmoudian, "Charged dust phenomena in the near-Earth space environment", Rep. Prog. Phys. **79** (2016) 106802 (31pp).

21 Zabotin N A and Wright J W. Role of meteoric dust on sprite formation// Geophys. Res. Lett.-2001- 28 -2593–2599.

22 Muralikrishna P and Kulkarni V H. Modeling the meteoric dust effect on the equatorial electrojet// Adv. Space Res. – 2008 – 42, 164–70.

23 S. K. Mishra, Sh.Misra, and M.S.Sodha. "Charging kinetics of dust particles in a non-Maxwellian Lorentzian plasma", Eur. Phys. J. D (2013) **67**: 210.

24 Nurgaliyeva K.E., Ramazanov T.S., Popel S.I. "The charging of dust particles in ionospheric plasma with non-Maxwellian electrons", PNP, 24-28 September, (2018), (112).

25 Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака. УФН Январь 1997 г., Том 167, № 1, стр. 57-99.

**14.05.2019 басылымға қабылданды**

**Г.Н. Шынықұлова, Қ.Е. Нұрғалиева**

*Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

## **МАКСВЕЛЛДІК ЕМЕС ЭЛЕКТРОНДАР БАР БОЛҒАН КЕЗДЕ ИОНОСФЕРА БИІКТІКТЕРІНДЕ ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТІҢ ЗАРЯДТАЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ**

**Аннотация.** Ұсынылып отырған жұмыста максвеллдік емес электрондары бар ионосферада мезосфера биіктігінде тозаңды бөлшектің зарядталуы зерттелген. Ортаның тепе-теңсіз болуы радиоқызырғыш стендтің жұмысы салдырынан болып тұр. Электрондардың жылдамдықтар бойынша үлестірілуі ретінде к-үлестірілуі қолданылған. Есептеулер 85-95 км биіктігіндегі ионосфералық плазма үшін 150° К температурада жүргізілді, электрондар мен иондар концентрациясы  $10^{10} \text{ м}^{-3}$  деп алынды. Барлық тозаңдық бөлшектер біртекті және бәрінің өлшемдері бірдей және 10 нм құрайды деп есептелінді. Тозаңды бөлшектердің зарядталуын модельдеу үшін OML (Orbit Motion Limited) теориясы қолданылды. Тепе-теңсіз плазмалық ортадағы тозаңды бөлшектің өлшемсіздірілген

потенциалының тепе-теңдіктегі плазмалық ортадағы тозанды бөлшектің өлшемсіздірілген потенциалына қатынасы есептелінді. Тепе-теңсіз плазмалық ортадағы тозанды бөлшектің бет потенциалының тепе-теңдіктегі плазмалық ортасындағы жағдайдан бірнеше есе көп екендігі анықталды және ионосфералық газдың иондық құрылымына байланысты болатыны көрсетілді. Бет потенциалының тепе-теңсіз және тепе-теңдіктегі орта арасындағы айырмашылық температура өскен сайын кемитіні де байқалды.

**Түйін сөздер:** мезосфера, ионосфера, тозанды плазма, максвеллдік үлестірілу, максвеллдік емес үлестірілу, каппа үлестірілу

**Г.Н. Шиникулова, Қ.Е. Нұрғалиева**  
*КазНУ имени аль-Фараби, Алматы, Қазақстан*

## **ОСОБЕННОСТИ ЗАРЯДКИ ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ НА ИОНОСФЕРНЫХ ВЫСОТАХ ПРИ НАЛИЧИИ НЕМАКСВЕЛЛОВСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ**

**Аннотация.** В данной работе исследованы особенности зарядки пылевой частицы на высотах мезосферы, после воздействия на нее радионагревным стендом. Этим обусловлено наличие немаксвелловских электронов в составе ионосферного газа на мезосферных высотах. В качестве распределения электронов по скоростям использовано  $k$ -распределение при параметре  $k = 9$ . Расчеты проводились для ионосферной плазмы на высоте 85-95 км при температуре 150°K и концентрации электронов и ионов  $10^{10} \text{ м}^{-3}$ . Все пылевые частицы берутся одного размера и их размер составляет около 10 нм. Для моделирования зарядки пылевой частицы использована теория ограниченного орбитального движения OML (Orbit Motion Limited). Была рассчитана зависимость отношения обезразмеренного потенциала пылевой частицы в неравновесной плазменной среде к потенциалу частицы в равновесной среде. Было установлено, что поверхностный потенциал пылевой частицы в неравновесной плазменной среде в несколько раз превышает потенциал частицы в равновесной среде и зависит от ионного состава ионосферного газа, но это отношение уменьшается с увеличением температуры.

**Ключевые слова:** мезосфера, ионосфера, пылевая плазма, максвелловское распределение, немаксвелловское распределение, каппа распределение, теория ограниченного орбитального движения.

**G.N. Shinikulova, K.E. Nurgaliyeva**  
*al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan*

## **THE PECULIARITIES OF DUST PARTICLES CHARGING AT IONOSPHERE HEIGHTS AT THE PRESENTS OF NON-MAXWELLIAN ELECTRONS**

**Abstract.** In this paper, the dust particles charging peculiarities in the presence of non-Maxwellian electrons at the heights of the ionosphere was investigated. The existence of non-Maxwellian electrons caused by heating stands. The kappa distribution was taken as non-Maxwellian distribution at  $k=9$ . The calculations were carried out for ionospheric plasma at the heights 85-90 km, a temperature of 150° K, and an electron and ion concentration of  $10^{10} \text{ m}^{-3}$ . All dust particles are considered of the same size and are about 10 nm. The OML theory was used as model of the charging of dust particles. The ratio of dust surface potential in non-equilibrium plasma medium to dust surface potential in equilibrium plasma medium was calculated. It was established that the dust surface potential in non-equilibrium plasma exceeds for many times the surface potential in equilibrium plasma medium and depend on plasma ions composition but with the raising of temperature this ratio decreases.

**Keywords:** mesosphere, ionosphere, dusty plasma, Maxwell distribution, non-Maxwell distribution, kappa distribution