



FTAMT 29.27.47

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-153-4-126-135>

Ғылыми мақала

Әр түрлі пішіндегі тозаңды бөлшектердің мезосфера биіктіктеріндегі зарядталуын салыстыру

Г.Н. Шынықұлова^{1*}, Қ.Ж. Рүстемова¹, Ж.Б. Мәжит¹, А.Н. Алдибекова¹,
Н.Н. Шынықұлова²

¹Алматы Технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан

²Қазақ Ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

(E-mail: *gulnur.shynykulova@gmail.com, rkzh@mail.ru, zhamilya.Mazhit01@gmail.com, aitkul.aldebekova@gmail.com, sh_nurgul82@mail.ru)

Аңдатпа. Жұмыста мезосфера биіктіктеріндегі тозаңды бөлшектердің сыртын қоршап тұрған көптеген газдардың ішінен, O , O_2 , O_3 , OH газдарының плазма бөлшектерімен әсерлесуі кезіндегі бөлшектердің пішініне байланысты зарядталу үрдісі қарастырылған. Сфералық бөлшектермен салыстыру мақсатында, цилиндрлік және диск тәрізді бөлшектердің сиымдылықтарын ескере отырып, олардың зарядының электрондық температураға тәуелділігі анықталды. Есептеулер 85 км биіктіктегі ионосфералық плазма үшін, температура 1500 К, электрондар мен иондардың концентрациясы 10^{10} м^{-3} және иондардың жиілігі 10^5 с^{-1} деп жүргізілді. Сфералық тозаңды бөлшектің өлшемі 10 нм және сфера, цилиндр, диск пішінді тозаңды бөлшектердің радиустары $a = 1 \text{ нм}$, цилиндрдің ұзындығы $L = 4 \text{ а}$, диск қалыңдығы өте жұқа 0,2 нм деп есептелініп, олардың зарядының электрондық температураға тәуелділік графигі алынды. Тозаңдық бөлшектердің зарядталуын модельдеу мақсатында, шектеулі орбиталық қозғалыстар (OML) теориясы пайдаланылды. Есептеулер нәтижесі бойынша, мезосфералық плазмадағы тозаңды бөлшектерінің пішіні зарядталу шамасына әсер ететіндігін көрсетті: сфералық бөлшектер ең үлкен теріс зарядқа, цилиндрлік бөлшектер – біршама кішірек, ал дискі тәрізді бөлшектер – ең аз зарядқа ие.

Түйін сөздер: мезосфера, ионосфера, тозаңды плазма, OML теориясы, сфералық, цилиндрлік және диск тәрізді тозаңды бөлшектер.

Кіріспе

Мезосфера – бұл атмосфераның ең аз зерттелген қабаты, өйткені ол ұшақтар мен әуе шарлары үшін тым жоғары, ал спутниктер үшін тым төмен. Осы биіктікте тозаңды бөлшектер де кездеседі. Тозаңды бөлшектер мезосфера биіктігінде қайдан пайда болады? Жерге күнделікті түсетін метеорлық ағынның, орман өрттері мен жанартаулардың атқылауының салдарынан 70-120 км биіктікте, өте ұсақ концентрациясы 10 см^{-3} -тен асатын наноөлшемді бөлшектер пайда болады. Мезосфераның бірқатар құбылыстары

Жіберілді 21.11.2025. Өзгертілді 26.11.2025. Қабылданды 26.11.2025. Онлайн қол жетімді 25.12.2025.

үшін тозаңды бөлшектер маңызды рөл атқарады. Жазғы мезосфераның ерекшелігі, 80-85 км биіктікте орналасқан «күмістелген бұлт» және 85-95 км биіктіктегі полярлық мезосфералық радиошағылулар сияқты тозаңды қабаттардың бар болуы. «Күмістелген бұлт» субмикронды бөлшектерден тұрады, оның қалыңдығы аз болғанның өзінде, күн батқан уақытта көзбен көруге болады. Ал полярлық мезосфералық радиошағылулар, оптикалық әдіспен бақыланбайды, тек 50-1000 МГц аралығында жұмыс жасайтын радарларда күшті радиошағылулар ретінде бақыланады [1-5]. Плазмалық әдістердің «күмістелген бұлттар» мен полярлық мезосфералық радиотолқын шағылыстарын сипаттауға қолданылуы, тозаңды мезосфераның иондану қасиеттеріне, сондай-ақ осы биіктіктегі тозаң қабатының шекараларының пайда болу механизмдерін сипаттауға мүмкіндік берді [1-12]. Бөлшектердің қатты беттері гетерогенді химияда катализатор ретінде әрекет етіп, нанобөлшектің бетінде су молекулалары түзіледі. Бұл әсер тозаң бөлшектері шоғырланған аймақта су концентрациясының жоғарылауына әкеледі, нәтижесінде «күмістелген бұлттар» мен полярлық мезосфералық радиотолқын шағылыстары пайда болады. Сонымен қатар, күн радиациясы нано және микроөлшемді бөлшектердің фотоэлектрлік қасиеттеріне, олардың концентрациясы мен мөлшеріне байланысты тозаңды мезосфералық плазманың зарядталған бөліктерінің әлдеқайда күрделі әрекетіне әкелуі мүмкін. Ал тозаңды бөлшектер олардың химиялық құрамына да әсер етеді [13-20].

Тозаңды бөлшектердің заряды олардың динамикасы мен электромагниттік өрістермен әрекеттесуін анықтайды. Мұндай үрдістерді сипаттау үшін зарядтау механизмдері мен әртүрлі бөлшектердің пішінін ескеру қажет.

Жұмыстың мақсаты, мезосфера биіктіктерінің қасиеттеріне және тозаңды бөлшектерге сипаттама жүргізу, әр түрлі формадағы (сфералық, цилиндрлік, диск түріндегі) тозаңды бөлшектердің зарядталуы үрдісін қарастыру. Мезосфера биіктіктерінің құрамында зарядталу үрдісіне де әсер ететін: «қарапайым» H , O , N , N_2 , OH , O_2 , O_3 , NO^+ сияқты иондар кездеседі, жұмыста O , OH , O_2 , O_3 иондардың зарядталуы қарастырылған [21-26].

Негізгі бөлім және есептеулер нәтижелерін саралау

Бұл жұмысты есептеулер барысында, биіктік – 85 км, температура – $150^\circ K$, электрон мен ион концентрациясы 10^{10} м^{-3} деп есептеліп, плазмадағы электрлік зондтардың теориясына негізделген теориялық модель ретінде, шектеулі орбиталық қозғалыстар (OML) теориясы қолданылды [1,2].

Мезосфера биіктіктеріндегі плазма құрамы сирек, тозаңды бөлшектердің концентрациясы өте аз. Сондықтан қарастырылып отырған бөлшек аумағында электрондар мен иондардың қозғалысына басқа тозаңды бөлшектер әсер етпейді деп есептелінді. Егер осы биіктіктерде эмиссиялық үрдістерді де ескермесе, тозаңды бөлшектердің заряды теріс болады, себебі, электрондар жеңіл, әрі иондар ағынына қарағанда тозаңды бөлшекке тезірек жетіп, оны теріс зарядтайды, ал иондар осы теріс зарядталған тозаңды бөлшектерге қарай бағыттталып, нәтижесінде тозаңды бөлшектердің заряды электрондар мен иондар ағыны теңелгенше жалғаса береді [23-25].

Тозаңды бөлшектің беттік потенциалы:

$$-e\varphi_s = kT_a \quad (1)$$

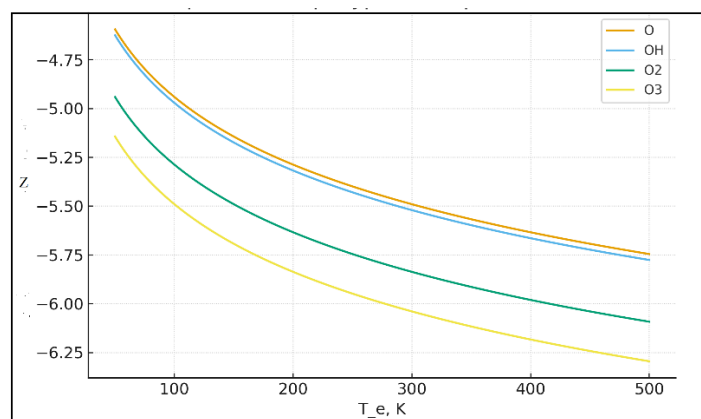
$T_a - (a=e, i)$ электрондар мен иондардың температуралары, k – Больцман тұрақтысы. Больцман тұрақтысының шамасын энергетикалық бірлік бойынша 1-ге тең деп алғандықтан, тозаңды бөлшектің потенциалы мына түрге келеді:

$$\varphi_s = -\frac{T_e}{e} \quad (2)$$

Тозаңды сфералық бөлшектер үшін электрондар мен иондар ағыны теңестіріліп, өлшемсіздендірілген тозаңды бөлшектің беттік потенциалы шамасы мына түрге келді [23-25]:

$$\exp(-z) = \frac{n_i}{n_e} \left(\frac{\mu}{\tau} \right)^{1/2} (1 + z\tau) \quad (3)$$

Осы өлшемсіздендірілген потенциалдың (3) формуласымен, мезосфера биіктіктеріндегі тозаңды бөлшектердің айналасындағы O, OH, O₂, O₃ газдар үшін сфералық тозаңды бөлшектердің потенциалының электрондар мен иондар температураларының қатынасына тәуелділігі анықталды. Бұл тәуелділіктер 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1. O, OH, O₂, O₃ газдар үшін сфералық тозаңды бөлшектердің өлшемсіз потенциалының электрондар мен иондар температураларының қатынасына тәуелділігі

Мезосфера биіктіктеріндегі тозаңды бөлшектердің айналасындағы O, OH, O₂, O₃ иондары үшін атомдық массалары мына түрде (O = 16, OH = 17, O₂ = 32, O₃ = 48) алынып, ал сфералық бөлшектер үшін радиусы $a = 10$ нм деп есептелінді. Өлшемсіздендірілген потенциал бөлшектің пішініне тәуелді емес, тозаңды бөлшектің пішіні тек сиымдылығы мен абсолют зарядына (4) әсер етеді.

OML моделі бойынша, a радиусы өскен сайын Z заряды өседі:

$$Q = 4\pi\epsilon_0 a\varphi, \quad Q = C\varphi, \quad Z = \frac{Q}{e} \quad (4)$$

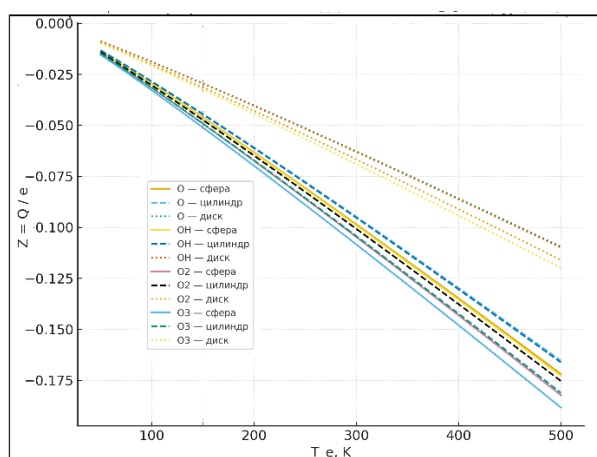
Тозаңды бөлшектерді сфералық, цилиндрлік және диск тәрізді бөлшектердің сиымдылықтары [26]:

Сфералық бөлшектің сиымдылығы: $C_s = 4\pi\epsilon_0 a$,

Цилиндрлік бөлшектің сиымдылығы: $C_c = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(2L/a)}$,

Диск тәрізді бөлшектің сиымдылығы: $C_d = 8\epsilon_0 a$

Сфера, цилиндр, диск пішінді радиустары $a = 1$ нм, цилиндрдің ұзындығы $L = 4a$, диск қалыңдығы өте жұқа $0,2$ нм деп есептелініп, тозаңды бөлшектердің зарядының электрондар мен иондар температураларының қатынасына тәуелділігі анықталды, ол 2-суретте көрсетілген.



Сурет 2. Әр түрлі формалы тозаңды бөлшектің потенциалының электрондар мен иондар температураларының қатынасына тәуелділігі

Қорытынды

Сонымен есептеулер бойынша, мынадай нәтижелер алынды:

- мезосфера биіктіктеріндегі тозаңды плазманың зарядталуына сипаттама берілді;
- тозаңды бөлшектерді қоршап тұрған O, OH, O₂, O₃ иондары үшін, сфералық тозаңды бөлшектердің өлшемсіздірілген потенциалының электрондар мен иондардың температураларының қатынасына тәуелділігі анықталды;

- сфералық, цилиндрлік және диск формалы тозаңды бөлшектердің (O, OH, O₂, O₃) иондары үшін зарядтың электрондар мен иондардың температураларының қатынасына тәуелділігі анықталды;

- барлық бөлшектердің заряды теріс және оның модулі температураның өсуімен азаяды:

- сфералық бөлшектер ең үлкен теріс зарядқа ие, цилиндрлік бөлшектер – одан кіші, ал дискі тәрізді бөлшек – ең кіші зарядқа ие екені анықталды.

Жүргізілген есептеулер мезосфералық плазмадағы тозаңды бөлшектерінің өлшемі өте кіші 10 нм және 1 нм болғандықтан, олардың пішіні зарядталу шамасына әсері, сиымдылықтарының өзгешелігінен байқалады, сфералық бөлшектер ең үлкен теріс зарядқа, цилиндрлік бөлшектер – біршама кішірек, ал дискі тәрізді бөлшектер – ең аз зарядқа

ие. Алынған нәтижелер мезосфералық биіктіктердегі және тозаңды бөлшектердегі үрдістерді модельдеу кезінде қолданылуы мүмкін.

Алғыс айту, мүдделер қайшылығы

Бұл зерттеу **Г.Н. Шынықұлованың** докторлық диссертациясының тақырыбының негізінде жасалған.

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Авторлардың үлестері. Г.Н. Шынықұлова, Қ.Ж. Рүстемова, Ж.Б. Мәжит, А.Н. Алдибекова, Н.Н. Шынықұлова: концептуализация, зерттеу, әдістеме, визуализация, түпнұсқалық жазу, бақылау, ресурстар, шолу, редакциялау және қаржыландыру

Әдебиеттер тізімі

1. Сергей Игоревич Попель, Лекции по физике пылевой плазмы, (Москва, МФТИ, 2012), с.162, ISBN 978-5-7417-0355-7
2. Владимир Евгеньевич Фортов, Анатолий Григорьевич Храпак, Сергей Анатольевич Храпак, Владимир Иванович Молотков, Олег Федорович Петров, Пылевая плазма, УФН Том 174, № 5, 495-544 (2004), <https://doi.org/10.3367/UFNr.0174.200405b.0495>
3. Arthur M. Skellett, The effect of meteors on radio transmission through the Kennellyheavyside layer, Phys. Rev., 1668 (1931), <https://doi.org/10.1103/PhysRev.37.1668>
4. Arthur M. Skellett, The ionizing effect of meteors, Proc. Inst. Radio Eng., 132-249 (1935), <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1935.227289>
5. Walter L. Eklund, Benton B. Balsley, Long-term observations of the Artic mesosphere with MST radar at Poker Flat, Alaska, Journal of Geophysic Research, 7775 (1981), <https://doi.org/10.1029/JA086iA09p07775>
6. Jürgen Röttger, Michael T. Rietveld, Cesar La Hoz, Timothy Hall, Michael C. Kelley, and Wesley 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 profile, Radio Sci. 25, 671- 687 (1991), <https://doi.org/10.1029/90RS01195>
7. John Y.N. Cho, Timothy M. Hall, and Michael C. Kelley, On the role of charged aerosols in polar mesospheric summer echoes, Journal of Geophysic Research 97, 875-886 (1992), <https://doi.org/10.1029/91JD03108>
8. Michael C. Kelley, James Ulwick, Large- and small-scale organization of electrons in the highlatitude mesosphere: Implications of the STATE data, J. Geophys. Res. 93, 7001-7008 (1988), <https://doi.org/10.1029/JD093iD06p07001>
9. Phillip B. Chilson, Evgenia Belova, Michael T. Rietveld, Sheila Kirkwood, Ulf-Peter Hoppe, First artificially induced modulation of PMSE using the EISCAT heating facility, Geophysic Research Letter 27, 3801-3804 (2000), <https://doi.org/10.1029/2000GL012045>
10. Evgenia Belova, Phillip B. Chilson, Markus Rapp, and Michael T. Rietveld, The response time of PMSE to ionospheric heatin, Journal of Geophysic Research 108 (D8), 8446 (2003), <https://doi.org/10.1029/2002JD002385>
11. Ove Havnes, Polar mesospheric Summer Echoes(PMSE) overshoot effect due to cycling of artificial electron heating // Journal of Geophysic Research 109, A02309 (2004), <https://doi.org/10.1029/2003JA010159>

12. Dmitry Borisovich Sobyenin, Boris Georgievich Gavrilov, Igor Mikhailovich Podgorny, Dynamics of an artificial plasma formation in the ionosphere, *Adv. Space Res.* 29, 1345 (2002), [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00151-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00151-3)
13. Boris Georgievich Gavrilov, Igor Mikhailovich Podgorny, Dmitry Borisovich Sobyenin, et al., "North Star" Plasma-Jet Experiment: Particles and Electric and Magnetic Field Measurements, *J. Spacecraft and Rockets*. 41, 490 (2004), <https://doi.org/10.2514/1.1303>
14. George E. Thomas, Joseph J. Olivero, Matthew DeLand, and Eric P. Shettle, A response to the article by U. von Zahn, Are noctilucent clouds truly a miner's canary of global change? *Geophys. Union* 84, 352 (2003) <https://doi.org/10.1029/2003EO370007>
15. Raymond G. Roble, Robert E. Dickinson, How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? *Geophys. Res. Lett.* 16, 1441 (1989), <https://doi.org/10.1029/GL016i012p01441>
16. Michael J. Taylor, Michael Gadsden, Robert P. Lowe, Mark S. Zalcik, Johanna Brausch, Mesospheric cloud observations at unusually low latitudes, *J. Atmos. Sol., Terr. Phys.* 64, 991–999 (2002), [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00049-7)
17. Matthew T. DeLand, Eric P. Shettle, George E. Thomas and Joseph J. Olivero, A quartercentury of satellite PMC observation, *J. Atmos. Sol., Terr. Phys.* 68, 29 (2006), <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.08.011>
18. Ove Havnes, Terje Aslaksen, Alf Brattli, Dust charging in the mesopause region, *Physica Scripta*. 89, 133 (2001), <https://doi.org/10.1238/Physica.Topical.089a00133>
19. Boris A. Klumov, Sergei I. Popel, Robert Bingham, Collective effects in the processes of condensation and coagulation of dust particles in plasma, *Письма в ЖЭТФ* 72, 524 (2000)
20. Nikolay A. Zabolotin, John W. Wright, Role of meteoric dust on sprite formation, *Geophys. Res. Lett.* 28, 2593–2599 (2001), <https://doi.org/10.1029/2000GL012650>
21. P. Muralikrishna, V. H. Kulkarni, Modeling the meteoric dust effect on the equatorial electrojet, *Adv. Space Res.* 42, 164–170 (2008), <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.12.006>
22. Wallace A. Scales, Ali Mahmoudian, Charged dust phenomena in the near-Earth space environment, *Rep. Prog. Phys.* 79, 106802, 31 (2016), <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/10/106802>
23. Владимир Наумович Цытович, Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака, *УФН* 167, 57-99 (1997), <https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199701e.0057>
24. Гульнур Нурбековна Шиникулова, Изучение зарядки пылевой частицы на мезосферных высотах с немаксвелловским распределением электронов, Сб. избранных трудов XVI Конференции молодых ученых, «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвященная Дню космонавтики 15-17 апреля 2019, Россия, РИНЦ, 16 с.
25. Құралай Еркенқызы Нұрғалиева, Гүлнұр Нұрбекқызы Шынықұлова, Максвеллдік емес электрондар бар болған кезде ионосфера биіктіктерінде тозаңды бөлшектің зарядталу ерекшеліктері, Проблемы эволюции открытых систем 21, 136-140 (2019).
26. Gennady I. Sukhinin, Alexander V. Fedoseev, Mikhail V. Salnikov, The influence of dust particle geometry on its charge and plasma potential, *Contribution to Plasma Physics*, 2019, <https://doi.org/10.1002/ctpp.201800153>

Г.Н. Шынықұлова¹, Қ.Ж. Рүстемова¹, Ж.Б. Мәжит¹, А.Н. Алдибекова¹, Н.Н. Шынықұлова²

¹Алматын ағы Технологический университет, Алматы, Казахстан

²Казахский Национальный Женский Педагогический университет,

(E-mail: *gulnur.shynykulova@gmail.com, rkzh@mail.ru, zhamilya.Mazhit01@gmail.com, aitkul.aldebekova@gmail.com, sh_nurgul82@mail.ru)

Сравнение зарядки пылевых частиц различной формы на высотах мезосферы

Аннотация. В работе рассмотрен процесс зарядки пылевых частиц в зависимости от их формы при взаимодействии с плазменными частицами, из множества газов, окружающих пылевые частицы на высотах мезосферы, были взяты (O, O₂, O₃, OH). Для сравнения со сферическими частицами, с учетом емкостей цилиндрических и дискообразных частиц, была определена зависимость их заряда от электронной температуры. Расчеты проводились для ионосферной плазмы на высоте 85 км, при температуре 150° K, концентрации электронов и ионов 10¹⁰ м⁻³ и частоте ионов 10⁵ с⁻¹. Были взяты следующие параметры: радиус для сферической пылевой частицы 10 нм, для сравнения пылевых частиц сферической, цилиндрической и дискообразной формы а = 1 нм, длина цилиндра L=4а, толщина диска очень тонкая - 0,2 нм. Для этих параметров был получен график зависимости их заряда от электронной температуры. Для моделирования зарядки пылевых частиц использовалась теория ограниченных орбитальных движений (OML). По результатам расчетов было показано, что форма пылевых частиц в мезосферной плазме влияет на величину заряда: сферические частицы обладают наибольшим отрицательным зарядом, цилиндрические частицы – несколько меньшим, а дискообразные частицы – наименьшим зарядом.

Ключевые слова: Мезосфера, Ионосфера, Пылевая плазма, Теория OML, Сферические, цилиндрические и дискообразные пылевые частицы.

G.N. Shinikulova^{*1}, K.Zh. Rustemova¹, Zh.B. Mazhit¹, A.N. Aldibekova¹, N.N. Shynykulova²

¹Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

²Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan

(E-mail: *gulnur.shynykulova@gmail.com, rkzh@mail.ru, zhamilya.Mazhit01@gmail.com, aitkul.aldebekova@gmail.com, sh_nurgul82@mail.ru)

Comparison of the dust particles of different shapes at mesosphere altitudes

Abstract. This paper considers the process of charging dust particles depending on their shape during interaction with plasma particles from the variety of gases surrounding the dust particles at mesospheric altitudes, specifically using O, O₂, O₃, and OH. For comparison with spherical particles, taking into account the capacitances of cylindrical and disk-shaped particles, the dependence of their charge on the electron temperature was determined. The calculations were carried out for ionospheric plasma at an altitude of 85 km, at a temperature of 150° K, electron and ion concentrations of 10¹⁰ m⁻³, and ion frequency of

10^5 s^{-1} . The following parameters were used: a radius of 10 nm for the main spherical dust particle, and for comparison of the spherical, cylindrical, and disk-shaped dust particles, a radius $a=1$ nm, cylinder length $L=4a$ and a very thin disk thickness of 0.2 nm. For these parameters, a graph of the dependence of their charge on the electron temperature was obtained. The Orbital Motion Limited (OML) theory was used to model the charging of the dust particles. The calculation results showed that the shape of dust particles in mesospheric plasma affects the magnitude of the charge: spherical particles have the largest negative charge, cylindrical particles have a somewhat smaller charge, and disk-shaped particles have the smallest charge.

Keywords: Mesosphere, Ionosphere, Dust Plasma, OML theory, Spherical, cylindrical, and disk-shaped dust particles.

References

1. Sergei I. Popel, *Lekcii po fizike pyl'evoy plazmy* [Lectures on the physics of dusty plasma] (Moscow: MFTI, 2012, 110 p.), ISBN 978-5-7417-0355-7, [in Russian]
2. V.E. Fortov, A.G. Khrapak, S.A. Khrapak, V.I. Molotkov, O.F. Petrov, *Dusty plazma*, UFN, 5(174), 495-544 (2004), <https://doi.org/10.3367/UFNr.0174.200405b.0495>, [in Russian]
3. Arthur M. Skellett, The effect of meteors on radio transmission through the Kennellyheavyside layer, *Phys. Rev.*, 1668 (1931), <https://doi.org/10.1103/PhysRev.37.1668>
4. Arthur M. Skellett, The ionizing effect of meteors, *Proc. Inst. Radio Eng.*, 132-249 (1935), <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1935.227289>
5. Walter L. Eklund, Benton B. Balsley, Long-term observations of the Artic mesosphere with MST radar at Poker Flat, Alaska, *Journal of Geophysic Research*, 7775 (1981), <https://doi.org/10.1029/JA086iA09p07775>
6. Jürgen Röttger, Michael T. Rietveld, Cesar La Hoz, Timothy Hall, Michael C. Kelley, and Wesley 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 profile, *Radio Sci.* 25, 671- 687 (1991), <https://doi.org/10.1029/90RS01195>
7. John Y. N. Cho, Timothy M. Hall, and Michael C. Kelley, On the role of charged aerosols in polar mesospheric summer echoes, *Journal of Geophysic Research* 97, 875-886 (1992), <https://doi.org/10.1029/91JD03108>
8. Michael C. Kelley, James Ulwick, Large- and small-scale organization of electrons in the highlatitude mesosphere: Implications of the STATE data, *J. Geophys. Res.* 93, 7001-7008 (1988), <https://doi.org/10.1029/JD093iD06p07001>
9. Phillip B. Chilson, Evgenia Belova, Michael T. Rietveld, Sheila Kirkwood, Ulf-Peter Hoppe, First artificially induced modulation of PMSE using the EISCAT heating facility, *Geophysic Research Letter* 27, 3801-3804 (2000), <https://doi.org/10.1029/2000GL012045>
10. Evgenia Belova, Phillip B. Chilson, Markus Rapp, and Michael T. Rietveld, The response time of PMSE to ionospheric heatin, *Journal of Geophysic Research* 108 (D8), 8446 (2003), <https://doi.org/10.1029/2002JD002385>
11. Ove Havnes, Polar mesospheric Summer Echoes(PMSE) overshoot effect due to cycling of artificial electron heating // *Journal of Geophysic Research* 109, A02309 (2004), <https://doi.org/10.1029/2003JA010159>

12. Dmitry Borisovich Sobyenin, Boris Georgievich Gavrilov, Igor Mikhailovich Podgorny, Dynamics of an artificial plasma formation in the ionosphere, *Adv. Space Res.* 29, 1345 (2002), [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00151-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00151-3)
13. Boris Georgievich Gavrilov, Igor Mikhailovich Podgorny, Dmitry Borisovich Sobyenin, et al., "North Star" Plasma-Jet Experiment: Particles and Electric and Magnetic Field Measurements, *J. Spacecraft and Rockets.* 41, 490 (2004), <https://doi.org/10.2514/1.1303>
14. George E. Thomas, Joseph J. Olivero, Matthew DeLand, and Eric P. Shettle, A response to the article by U. von Zahn, Are noctilucent clouds truly a miner's canary of global change? *Geophys. Union* 84, 352 (2003) <https://doi.org/10.1029/2003EO370007>
15. Raymond G. Roble, Robert E. Dickinson, How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? *Geophys. Res. Lett.* 16, 1441 (1989), <https://doi.org/10.1029/GL016i012p01441>
16. Michael J. Taylor, Michael Gadsden, Robert P. Lowe, Mark S. Zalcik, Johanna Brausch, Mesospheric cloud observations at unusually low latitudes, *J. Atmos. Sol., Terr. Phys.* 64, 991–999 (2002), [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00049-7)
17. Matthew T. DeLand, Eric P. Shettle, George E. Thomas and Joseph J. Olivero, A quartercentury of satellite PMC observation, *J. Atmos. Sol., Terr. Phys.* 68, 29 (2006), <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.08.011>
18. Ove Havnes, Terje Aslaksen, Alf Brattli, Dust charging in the mesopause region, *Physica Scripta.* 89, 133 (2001), <https://doi.org/10.1238/Physica.Topical.089a00133>
19. Boris A. Klumov, Sergei I. Popel, Robert Bingham, Collective effects in the processes of condensation and coagulation of dust particles in plasma, *Письма в ЖЭТФ* 72, 524 (2000)
20. Nikolay A. Zabotin, John W. Wright, Role of meteoric dust on sprite formation, *Geophys. Res. Lett.* 28, 2593–2599 (2001), <https://doi.org/10.1029/2000GL012650>
21. P. Muralikrishna, V. H. Kulkarni, Modeling the meteoric dust effect on the equatorial electrojet, *Adv. Space Res.* 42, 164–170 (2008), <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.12.006>
22. Wallace A. Scales, Ali Mahmoudian, Charged dust phenomena in the near-Earth space environment, *Rep. Prog. Phys.* 79, 106802, 31 (2016), <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/10/106802>
23. V.N. Tsitovich, Plazmenno-pylevye kristally, kapli i oblaka [Plasma-dust crystals, droplets and clouds], *UFN* 1(167), 57-99 (1997), <https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199701e.0057>, [in Russian]
24. Shinikulova G.N., Izuchenie zarydki pilevoi chastise na mezosfernih visotah s nemaxwellovskim raspredeleniem elektronov [Study of the charge of a dust particle at mesospheric altitudes with a non-Maxwellian electron distribution] Collection of selected works of the XVI Conference of Young Scientists, "Fundamental and Applied Space Research", dedicated to the Cosmonautics, (Day 15-17 april 2019, Russian, Rins, 2019 y., 16 p) [in Russian]
25. Nurgalieva K. E., Shinikulova G.N., Maxwelldik emes elektrondar bar bolgan kezde ionosfera biyktikterindegi tozandy bolshektyn zarydtalu erekshektiktery [Features of charging a dusty particle at the altitudes of the ionosphere in the presence of non-Maxwell electrons], The problem of the evolution of systems of KAZAKHSTAN recommended by CCES of the MES 21, 136-140(2019) p. [in Kazakh]
26. Sukhinin G.L., Fedoseev A.V., Salnikov M.V. The influence of dust particle geometry on its charge and plazma potential, *Contribution to Plazma Physics.-2019*, <https://doi.org/10.1002/ctpp.201800153>

Авторлар туралы мәліметтер:

Шынықұлова Гүлнұр Нұрбековна – физик магистрі, Алматы Технологиялық университетінің сеньор-лекторы, Төле би, 100, Алматы, Қазақстан

Рүстемова Қарашаш Жорабековна – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Алматы Технологиялық университетінің профессор ассистенті, Төле би, 100, Алматы, Қазақстан

Мәжіт Жамиля Батықызы – математика магистрі, Алматы Технологиялық университетінің сеньор-лекторы, Төле би, 100, Алматы, Қазақстан

Алдибекова Айткүл Нұрбақытовна – техника және технология магистрі, Алматы Технологиялық университетінің сеньор-лекторы, Төле би, 100, Алматы, Қазақстан

Шынықұлова Нұргүл Нұрбековна – Физик магистрі, Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық университеті, Гоголь к-сі 144/8, Алматы, Қазақстан

Шиникулова Гульнур Нурбековна – Магистр физики, сеньор-лектор Алматинского технологического университета, Толе би, 100, Алматы, Казахстан

Рустемова Карашаш Жорабековна – кандидат физико-математических наук, ассис. профессора Алматинского Технологического университета, Толе би, 100, Алматы, Казахстан

Мәжіт Жамиля Батықызы – магистр математики, сеньор-лектор Алматинского технологического университета, Толе би, 100, Алматы, Казахстан

Алдибекова Айткул Нурбақытовна – Магистр техники и технологии, сеньор-лектор Алматинского технологического университета, Толе би, 100, Алматы, Казахстан

Шиникулова Нургуль Нурбековна – Магистр физики, Казахский Национальный Женский Педагогический университет, ул Гоголя, 114/8, Алматы, Казахстан

Shinikulova Gulnur Nurbekovna – Master of physics, senior-lecturer of Almaty Technological University, st Tole bi, 100, Almaty, Kazakhstan.

Rustemova Karashash Zhorabekovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, assistant professor of Almaty Technological University, st Tole bi, 100, Almaty, Kazakhstan

Mazhit Zhamilya Batykkyzy – Master of Mathematics, senior-lecturer of Almaty Technological University, st Tole bi, 100, Almaty, Kazakhstan

Aldibekova Aitkul Nurbakytovna – Master of Engineering and Technology senior-lecturer of Almaty Technological University, st Tole bi, 100, Almaty, Kazakhstan

Shinykulova Nurgul Nurbekovna – Master of physics, Kazakh National Women's Teacher Training University. St. Gogol, 114/8, Almaty, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).