

6. Robinson S., Nance R.E., Paul R.J., et al. Simulation model reuse: definitions, benefits and obstacle, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2004, Vol. 12, pp. 479-494.
7. Polenov M., Guzik V., Gushanskiy S., Kurmaleev A. Development of the Translation Tools for Distributed Storage of Models, *Proc. of 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT 2015)*, IEEE Press, 2015, pp. 30-34.
8. Polenov M., Gushanskiy S., Kurmaleev A. Synthesis of Expert System for Distributed Storage of Models, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2017, Vol. 575, pp. 220-228.
9. Waterman D.A. A Guide to Expert Systems. Addison-Wesley, 1986.
10. Frost R. Introduction to Knowledge Base Systems. Macmillan Pub. Co., 1986, 677 p.
11. Buchanan B.G., Duda R.D. Principles of rule-based expert system. *Advances in Computers*, 1983, Vol. 22, pp.163-216.
12. Dzhekson P. Vvedenie v ekspertnye sistemy [Introduction to Expert Systems]. 3rd ed. Vil'yams, 2001, 624 p.
13. Durkin J. Expert Systems: Design and Development. Macmillan Coll Div, 1994, 800 p.
14. Kendal S., Green M. An introduction to knowledge engineering. Springer, 2007, 300 p.
15. Gonzalez A.J., Dankel D.D. The Engineering of Knowledge-based Systems: Theory and Practice. Prentice-Hall, 2000, 523 p.
16. Giarratano J.C., Riley G.D. Expert Systems: Principles and Programming. 4th ed. Course Technology, 2004, 856 p.
17. Rozenberg G., Salomaa A. Handbook of Formal Languages. Vol. 1. Springer, 1997, 328 p.
18. Scott M.L. Programming Language Pragmatics. 4th ed. Morgan Kaufmann, 2015, 992 p.
19. Boose J.H. A survey of knowledge acquisition techniques and tools. *Knowledge Acquisition*, 1989, Vol.1, pp. 3-37.
20. McGraw K.L., Harbison-Briggs K. Knowledge Acquisition: Principles and Guidelines. Prentice Hall, 1989, 250 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Божич.

Поленов Максим Юрьевич – Южный федеральный университет, e-mail: mypolenov@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371550; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Курмалеев Артём Олегович – e-mail: kurmaleev@sfedu.ru; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; соискатель.

Polenov Maxim Yuryevich – Southern Federal University; e-mail: mypolenov@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371550; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kurmaleev Artem Olegovich – e-mail: kurmaleev@sfedu.ru; phone: +78634371656; the department of computer engineering; researcher.

УДК 551.594

DOI 10.18522/2311-3103-2020-5-130-141

С.С. Свидельский, В.С. Литвинова, Г.В. Куповых, А.Г. Клово
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО СЛОЯ

Рассматривается проблема формирования электрического состояния нижнего слоя атмосферы вблизи поверхности земли. Исследуется электродинамическая модель нестационарного турбулентно-конвективного приземного слоя в приближении электродного эффекта (ЭЭ). Исходная система состоит уравнений, описывающих ионизационные и рекомбинационные процессы для аэроионов, и уравнения Пуассона для электрического поля. В зависимости от метеорологических условий в атмосфере отдельно рассмотрены модели электродного слоя (ЭС) в приближениях классического и турбулентного ЭЭ, а также в приближении сильного турбулентного перемешивания. В качестве факторов, влияющих на

пространственно-временную структуру ЭС, выступают турбулентный и конвективный перенос аэроионов, уровень ионизации воздуха и присутствие в нем субмикронного аэрозоля. Выявлены безразмерные параметры (критерии подобия) для электродинамических уравнений, позволяющие осуществлять выбор соответствующего приближения для моделирования структуры электродного слоя в зависимости от атмосферных условий. В свободной от аэрозоля атмосфере время установления стационарного состояния в электродном слое составляет примерно 5 мин., для классического слоя (характерная высота около 4-5 м), а в турбулентном - примерно 15 мин. (высота порядка 10 м). В случае сильного турбулентного перемешивания масштаб распределения электрических величин возрастает до сотен метров. Соотношение характерных скоростей турбулентного и конвективного процессов указывает на преобладающий физический механизм переноса ионов и формирования структуры ЭС. Увеличение скорости конвективного переноса, направленного вниз, приводит к ослаблению механизма турбулентного перемешивания, а при переносе вверх, имеет место обратный эффект. Присутствие в атмосфере субмикронного аэрозоля приводит к образованию тяжелых ионов, подвижность которых много меньше, чем у аэроионов. Однократно заряженные аэрозольные частицы с концентрацией, не превышающей число аэроионов, незначительно меняют пространственно-временные характеристик ЭС. Тогда как наличие в приземном воздухе многократно заряженных аэрозольных частиц, увеличивает время электрической релаксации и уменьшает высоту ЭС. При достаточно больших концентрациях аэрозоля (больше числа аэроионов на порядок и более) необходимо учитывать его перенос турбулентно-конвективными потоками, а структура ЭС определяется только тяжелыми ионами.

Атмосфера; приземный слой; электродный эффект; электродный слой; электрическое поле; проводимость; ток; турбулентность; конвекция; аэрозоль.

S.S. Svidelsky, V.S. Litvinova, G.V. Kupovykh, A.G. Klovo

FORMATION OF THE ATMOSPHERIC ELECTRODE LAYER STRUCTURE

The problem of the formation of the electric state in the lower layer of the atmosphere near the Earth's surface is considered in the article. An electrodynamic model of a non-stationary turbulent-convective surface layer is investigated in the approximation of the electrode effect. The initial system consists of the ionization-recombination equations for aeroions and the Poisson equation. Depending on the meteorological conditions in the atmosphere, the cases of classical and turbulent electrode effects, as well as the approximation of strong turbulent mixing, are considered separately. Turbulent and convective transport, the degree of air ionization, and the presence of submicron aerosol particles in the air are factors that affect the space-time structure of the electrode layer. Dimensionless parameters (similarity criteria) for electrodynamic equations are revealed, which allow choosing the appropriate approximation for modeling the structure of the electrode layer depending on atmospheric conditions. In an aerosol-free atmosphere, the time to establish a stationary state in the electrode layer is about 5 minutes, for the classical layer (the typical height is about 4-5 m), and in the turbulent layer-about 15 minutes. (the typical height is about 10 m). In the case of strong turbulent mixing, the distribution scale of electrical quantities increases to hundreds of meters. The ratio of the characteristic velocities of turbulent and convective processes indicates the predominant physical mechanism of ion transport and the formation of the electrode layer structure. An increase in the rate of convective transport directed downwards leads to a weakening of the turbulent mixing mechanism, and when moving up, the opposite effect occurs. The presence of a submicron aerosol in the atmosphere leads to the formation of heavy ions, the mobility of which is much less than that of aeroions. Single-charged aerosol particles with a concentration not exceeding the number of aeroions slightly change the spatiotemporal characteristics of the electrode layer. While the presence of repeatedly charged aerosol particles in the surface air increases the time of electrical relaxation and reduces the height of the electrode layer. At sufficiently high concentrations of aerosol (more than the number of aeroions by an order of magnitude or more), it is necessary to take into account its transport by turbulent-convective flows, and the structure of the electrode layer is determined only by heavy ions.

Atmosphere; surface layer; electrode effect; electrode layer; electric field; conductivity; current; turbulence; convection; aerosol.

Введение. Глобальная электрическая цепь атмосферы характеризуется ее общим сопротивлением $R \approx 230$ Ом, потенциалом ионосферы $\varphi_{\infty} \approx 250-300$ кВ, полным электрическим током $I \sim 10^3$ А, полным (эффективным) зарядом $Q \sim 10^5$ Кл, а также электроемкостью $C \approx 2,9$ Ф [1–5]. Время исчезновения электрического поля в атмосфере, при отсутствии в ней токовых генераторов, можно оценить как $\tau = RC \approx 10$ мин. Локальными характеристиками электричества приземного слоя атмосферы являются напряженность электрического поля $E \sim 10^2$ В/м, плотность вертикального электрического тока $j \sim 10^{-12}$ А/м², проводимость воздуха $\lambda \sim 10^{-14}-10^{-15}$ См/м (в условиях хорошей погоды), а также плотность объемного электрического заряда ρ и потенциал электрического поля φ [1–5]. Эти характеристики не являются независимыми, например, первые три из них связывает дифференциальная форма закона Ома, но, именно они используются при проведении атмосферно-электрических измерений [6].

Приземный слой атмосферы представляет собой ионизированную среду за счет действия постоянного космического излучения, а также радиоактивности воздуха и почвы. Электрическое поле и ток направлены вертикально вниз. Поверхность земли является отрицательно заряженной, вблизи которой возникает совокупность процессов, называемых электродным эффектом (ЭЭ) [7, 8]. В результате вблизи поверхности образуется электродный слой (ЭС), где величины локальных электрических характеристик атмосферы зависят от его характерного пространственного масштаба [7, 8].

В теории атмосферного электричества проблема ЭЭ формулируется в виде стационарной задачи о нахождении распределения положительных и отрицательных легких ионов (аэроионов), электрического поля и плотности электрического тока вблизи поверхности земли. Постановка математической задачи включает два предельных случая: классический и турбулентный ЭЭ. Классический ЭЭ имеет место, когда приземная атмосфера считается неподвижной, а структура ЭС формируется под воздействием только электрического поля. Турбулентный ЭЭ предполагает, что структура ЭС определяется, наряду с электрическими силами, турбулентными потоками воздуха, причем последний фактор может быть определяющим (приближение сильного турбулентного перемешивания) [6–8].

Наличие субмикронного аэрозоля в атмосфере, приводит к появлению тяжелых ионов за счет его взаимодействия с аэроионами, что оказывает влияние на характеристики ЭС. При достаточно больших концентрациях аэрозоля необходимо учитывать его перенос турбулентными потоками, а структура ЭС определяется только тяжелыми ионами. Подробная теория ЭЭ в атмосфере приведена в работах [6–8].

Цель настоящей работы исследовать процессы формирования пространственно-временной структуры ЭС в зависимости от метеорологических и физических условий в атмосфере.

Модель турбулентно-конвективного электродного слоя. Проведем анализ уравнений электродинамической модели нестационарного турбулентно-конвективного ЭС в чистой атмосфере [9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z}(b_{1,2} \cdot n_{1,2} \cdot E) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z,t) \cdot \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu(z,t) \cdot n_{1,2}) = q - \alpha n_1 n_2 \\ \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_1 - n_2) \end{cases} \quad (1)$$

с начальными:

$$\begin{cases} n_1(z)|_{r=0} = n_2(z)|_{r=0} = n_0, \\ E(z)|_{r=0} = E_0, \end{cases} \quad (2)$$

и граничным условиям:

$$\begin{cases} n_1(z)|_{z=z_0} = n_2(z)|_{z=z_0} = 0, n_1(z)|_{z=l} = n_2(z)|_{z=l} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \\ E(z)|_{z=z_0} = E_0 \end{cases} \quad (3)$$

где $n_{1,2}$ – концентрация полярных аэроионов; $b_{1,2}$ – их подвижности; E – напряженность электрического поля; ν – параметр конвективного переноса; $D_T(z) = D_1 z$ – параметр турбулентного переноса; q – скорость ионизации воздуха; α – параметр рекомбинации; E_0 – электрическое поле у поверхности; z_0 – параметр шероховатости поверхности; l – верхняя граница ЭС; e – заряд электрона; ε_0 – электрическая постоянная.

Для определения характерного пространственного масштаба ЭС введем обозначения:

$$n_{1,2}|_{z \rightarrow \infty} = n_\infty = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \quad E|_{z \rightarrow \infty} = E_\infty, \quad n'_{1,2} = \frac{n_{1,2}}{n_\infty}, \quad E' = \frac{E}{E_\infty}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в ионизационно-рекомбинационные уравнения системы (1), получаем:

$$\begin{aligned} \tau \frac{\partial n'_1}{\partial t} + \tau b_1 E_\infty \frac{\partial (n'_1 E')}{\partial z} - D_m \tau \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial n'_1}{\partial z} \right) + \nu \tau \frac{\partial n'_1}{\partial z} &= 1 - n'_1 n'_2, \\ \tau \frac{\partial n'_2}{\partial t} - \tau b_2 E_\infty \frac{\partial (n'_2 E')}{\partial z} - D_m \tau \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial n'_2}{\partial z} \right) + \nu \tau \frac{\partial n'_2}{\partial z} &= 1 - n'_1 n'_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Параметр $\tau = (q \cdot \alpha)^{-1/2}$ представляет собой характерное время процесса установления стационарного состояния. В уравнениях (5) можно выделить четыре характерных пространственных масштаба для электродного слоя: $L_{nE_1} = b_1 \cdot E_\infty \cdot \tau$, $L_{nE_2} = b_2 \cdot E_\infty \cdot \tau$, $L_D = D_1 \cdot \tau$, $L_\nu = \nu \cdot \tau$.

Для значений параметров: $D_1 = 0,1$ м/с, $\nu = 0,01$ м/с, $q = 7 \cdot 10^6$ м³с⁻¹, $E = 100$ В/м, $b_1 = 1,2 \cdot 10^{-4}$ м²В⁻¹с⁻¹, $b_2 = 1,4 \cdot 10^{-4}$ м²В⁻¹с⁻¹, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12}$ м³с⁻¹ получаем значения масштабов: $\tau \approx 300$ с, $L_D = 30$ м, $L_\nu = 3$ м, $L_{nE_1} = 3,6$ м, $L_{nE_2} = 4,2$ м. Характерные пространственные масштабы распределения по вертикали ЭС соответствуют разным моделям ЭЭ в зависимости от условий в приземном слое.

Для анализа системы (1) введем следующие безразмерные параметры:

$$\begin{aligned} n_{1,2}|_{z \rightarrow \infty} = n_\infty, \quad E|_{z \rightarrow \infty} = E_\infty, \quad l_1 = D_1 \cdot \tau, \\ t' = t/T, \quad z' = z/l_1, \quad n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty, \quad E' = E/E_\infty. \end{aligned}$$

Подставляя их в систему (1), после некоторых преобразований получаем:

$$\begin{cases} \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} \pm \frac{b_{1,2} E_\infty}{D_1} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} \cdot E') - \frac{\partial}{\partial z'} \left(z' \cdot \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) + \\ + \frac{\nu}{D_1} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} = \frac{q}{q_\infty} - n_1 \cdot n_2, \\ \frac{\partial E'}{\partial z'} = \frac{e \cdot n_\infty l_1}{\varepsilon_0 E_\infty} (n'_1 - n'_2), \end{cases} \quad (6)$$

В уравнениях системы (6) появляются безразмерные параметры, являющиеся критериями подобия для электродинамической модели (1):

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| \cdot E_\infty \cdot \tau}{l_1} = \frac{|b_{1,2}| E_\infty}{D_1}, \quad \chi = \frac{\nu}{D_1}, \quad \gamma = \frac{en_\infty l_1}{\varepsilon_0 E_\infty} = \frac{en_\infty D_1 \tau}{\varepsilon_0 E_\infty}. \quad (7)$$

Тогда, получаем окончательную запись безразмерной системы (1):

$$\begin{cases} \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} \cdot E') - \frac{\partial}{\partial z'} \left(z' \cdot \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) + \chi \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} = \frac{q}{q_\infty} - n_1 \cdot n_2, \\ \frac{\partial E'}{\partial z'} = \gamma (n'_1 - n'_2). \end{cases} \quad (8)$$

Используя параметры подобия (7), проанализируем систему (8) при различных условиях в атмосфере. Время протекания T гидрометеорологических процессов в атмосфере обычно имеет порядок нескольких часов, тогда как время электрической релаксации составляет $\tau = 250$ с ($q = 10^7$ м⁻³с⁻¹ и $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12}$ м³с⁻¹), т.е. на порядок меньше. Поэтому в теории ЭЭ используется стационарное приближение уравнений атмосферной электродинамики.

Когда параметр $|\gamma| \ll 1$, то электрическим полем объемного заряда в ЭС, можно пренебречь, т.е., фактически, явление ЭЭ отсутствует.

При выполнении условия $\xi_{1,2} \geq 1$ имеет место приближение классического ЭЭ [5, 7]. Образуется ЭС с характерной высотой $L_{nE_2} = 4,2$ м. Если $\xi_{1,2} < 1$, то имеет место приближение турбулентного ЭЭ [2,4,6,10-13], а характерная высота ЭС равна $L_D = 30$ м. Когда $\xi_{1,2} \ll 1$ перенос аэроионов осуществляется только турбулентными потоками, а распределения электрического поля и плотности заряда, также, зависит от параметров турбулентности, но при сформировавшемся профилем электрической проводимости (приближение сильного турбулентного перемешивания) [5, 7]. Характерный масштаб ЭС в чистой атмосфере зависит от типа турбулентного перемешивания и может достигать сотен метров [5, 7].

При значении $\chi \ll 1$, конвективным переносом аэроионов можно пренебречь. Если значения параметра D_1 сопоставимо или меньше ν ($D_1 \leq \nu$), то конвекция является основным фактором в формировании турбулентно-конвективного ЭС [3-6, 11], а его высота составляет около $L_\nu = 3$ м и может расти с усилением конвективного переноса [6, 11].

Моделирование структуры ЭС с учётом аэрозольного загрязнения. С точки зрения математического моделирования, классический и турбулентный случаи ЭЭ отличаются условиями на нижней границе поверхности земли для аэроионов. В первом случае концентрация отрицательных аэроионов равна нулю, а положительных – нет. Во втором случае значения положительной и отрицательной

концентраций аэроионов равны нулю, а граничные условия задаются на некоторой высоте, которая определяется масштабом шероховатости z_0 , зависящим от аэродинамических свойств воздушного потока и поверхности, в частности, от числа Рейнольдса.

Присутствие в атмосфере субмикронного аэрозоля приводит к образованию тяжелых ионов, подвижность которых много меньше, чем у аэроионов. В предположении, что количество аэрозольных частиц в атмосфере не превышает числа аэроионов, условия равновесия между ними можно считать выполненными, а ток заряженных тяжелых ионов пренебрежимо мал. В противном случае предположение о стационарности тяжелых ионов не выполняется.

Уравнения электродинамической модели для случая однократно заряженных аэрозоля при условии $N \leq n_{1,2}$ представляются как [10–14, 17]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(b_{1,2}En_{1,2}) - \frac{\partial}{\partial z}\left(D_T(z) \cdot \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}(v(z) \cdot n_{1,2}) = \\ = q - \alpha n_1 n_2 - n_{1,2} \eta_2 N_0 - n_{1,2} \eta_1 N_{2,1}, \\ \frac{\partial N_{1,2}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z}\left(\chi(z) \cdot \frac{\partial N_{1,2}}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}(v(z) \cdot N_{1,2}) = n_{1,2} \eta_2 N_0 - n_{2,1} \eta_1 N_{1,2}, \\ N_1 + N_2 + N_0 = N = \text{const}, \\ \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\varepsilon_0} \cdot (n_1 - n_2 + N_1 - N_2). \end{aligned} \quad (9)$$

Обозначения для аэрозольной составляющей системы: N_0 , $N_{1,2}$, N – концентрации нейтральных, однократно заряженных положительных и отрицательных тяжелых ионов и общая концентрация субмикронных аэрозольных частиц, соответственно, η_1 и η_2 – параметры воссоединения, χ – параметр турбулентной диффузии тяжелых ионов.

Начальные и граничные условия имеют вид: для легких ионов и электрического поля (2)–(3), а для тяжелых ионов:

$$N_{1,2}(t=0) = \frac{\eta_2 N}{2\eta_2 + \eta_1}, \left(\frac{\partial N_{1,2}}{\partial z}\right)_{z=z_0} = 0, N_{1,2}(z=l) = \frac{\eta_2 N}{2\eta_2 + \eta_1}. \quad (10)$$

Множественную заряженность тяжелых ионов рассмотрим ниже.

Для исследования влияния источников ионизации на структуру ЭС обычно используется стационарный профиль ионизации, в виде: $q(z) = q + Q_0 \cdot e^{(-z/l)}$, где q – ионизация за счет космических лучей, второе слагаемое – отражает вклад, создаваемой радиоактивностью воздуха с характерным масштабом распределения l [7, 15–19].

Основные характеристики ЭС в различных условиях. Установление стационарного состояния в ЭС. В свободной от аэрозоля атмосфере время установления стационарного режима в классическом ЭС составляет примерно 5 мин. Время установления в турбулентном ЭС в несколько раз больше, чем в классическом, и равно примерно 15 мин. [8]. Влияние однократно заряженных аэрозольных частиц с концентрацией, не превышающей концентрацию аэроионов, на время установления незначительно [18–20].

Результаты исследования влияния аэрозольных частиц в диапазоне размеров 0,01 мкм – 0,4 мкм показывают [10–14, 17], что с увеличением радиуса частиц r , увеличивается число зарядов k на них (при $r < 0,04$ мкм $k = 1$; при $0,04 \leq r < 0,07$ мкм $k = 2$; при $0,07 \leq r < 0,1$ мкм $k = 3$; при $0,1 \leq r \leq 0,2$ мкм $k = 4$; при $0,2 < r \leq 0,4$ мкм $k = 5$). Возрастание концентрации аэрозоля приводит к увеличению времени установления τ электрической структуры ЭС. При этом τ растет пропорционально размеру аэрозольных частиц (при $N = 10^9$ м⁻³ в случае $r = 0,04$ мкм и $\tau = 800$ с, а в случае $r = 0,4$ мкм и $\tau = 1200$ с).

В работах [9, 11] рассмотрен вопрос о влиянии конвективного переноса на структуру ЭС. Увеличение скорости конвективного переноса, направленного вниз, приводит к ослаблению механизма турбулентного перемешивания, а при переносе вверх, происходит его усиление.

Приближение классического ЭЭ. В классическом ЭС при усилении электрического поля у поверхности земли, отношение E_0/E_∞ практически не меняется, а высота ЭС увеличивается [1, 7, 15]. Вследствие чего, изменяются параметры ЭС: $E(z)/E_\infty$, $z \leq l$ с увеличивается, $n_1(z)/n_\infty$ – практически постоянно, а $n_2(z)/n_\infty$ – уменьшается.

Появление в атмосфере аэрозоля концентрациями $N \sim (10^8 - 10^9)$ м⁻³ уменьшает высоту ЭС, параметр E_0/E_∞ при этом остается неизменным. При значениях $N \geq 5 \cdot 10^9$ м⁻³, структура ЭС определяется, в основном, тяжелыми ионами.

Усиление электрического поля увеличивает значения параметра $E(z)/E_\infty$, $z \leq l$, но в меньшей степени, чем в чистой атмосфере. Другие характеристики ЭС меняются следующим образом: $n_2(z)/n_\infty$ и $N_2(z)/N_\infty$ уменьшаются, $N_1(z)/N_\infty$ увеличивается, а $n_1(z)/n_\infty$ остается неизменным.

В условиях невысокой степени ионизации воздуха объемный электрический заряд в классическом ЭС положителен, а его величина определяется мощностью источника ионизации, и зависит от электрического поля. При наличии тонкого (l несколько десятков сантиметров) слоя повышенной ионизации $Q_0 \geq 80$ см⁻³с⁻¹ вблизи поверхности земли появляется отрицательный объемный заряд. Он возникает и при невысокой степени ионизации воздуха, но слабом электрическом поле (порядка нескольких десятков вольт на метр). При увеличении электрического поля или масштаба распределения повышенной ионизации воздуха объемный заряд опять становится положительным.

Приближение турбулентного ЭЭ. Высота турбулентного ЭС зависит от скорости приземного ветра [1, 7, 16]. При небольших скоростях (~ 1 м/с) параметр $n_1(z)/n_\infty$ быстро растет и достигает значения равного единице на высоте около одного метра. Плотность положительного объемного заряда максимальна, а на высоте 5 м и выше разница в значениях $n_1(z)/n_\infty$ и $n_2(z)/n_\infty$ не превышает нескольких процентов, как и классическом ЭС. При увеличении скорости ветра до 5 – 6 м/с разница значений $n_1(z)/n_\infty$ и $n_2(z)/n_\infty$ на высоте один метр не более 10 %. Высота турбулентного ЭС увеличивается и достигает нескольких десятков метров. Параметр $E(z)/E_\infty$, $z \leq l$ увеличиваются при усилении ветра, но параметр E_0/E_∞ остается постоянным.

При высокой степени ионизации воздуха ($Q_0 = 80$ см⁻³с⁻¹) и небольшой скорости ветра (менее 1 м/с) в турбулентном ЭС объемный заряд – отрицательный, как и в классическом случае. Масштаб его распределения возрастает до 10–15 м, а плотность за-

ряда уменьшается. При усилении турбулентности или электрического поля знак объемного заряда меняется на положительный. В сильном электрическом поле влияние турбулентности ослабевает: плотность объемного заряда возрастает, параметр $E(z)/E_\infty$ увеличивается, и структура турбулентного ЭС становится похожей на классический.

Аэрозоль концентрацией менее 10^9 м^{-3} , как и в классическом случае, незначительно влияет на характеристики турбулентного ЭС. При высоких концентрациях аэрозоля ($N \sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$ и более) также появляется отрицательный объемного заряда, обусловленный тяжелыми ионами.

В случае присутствия многократно заряженных аэрозольных частиц в воздухе с характерными размерами от $r = 0,02 \text{ мкм}$ до $r = 0,1 \text{ мкм}$ показывают, что влияние на параметры ЭС тяжелых ионов с зарядом от 3 до $5e$ почти на порядок меньше, чем для ионов с $1-2e$. При высоких концентрациях аэрозоля ($N \sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$ и более) в слое высотой до 5 м наблюдается также реверс ЭЭ, что свидетельствует о преобладании отрицательного объемного заряда тяжелых ионов, а вкладом заряда аэроионов можно пренебречь. В этом случае необходимо дополнять электродинамическую модель уравнениями переноса тяжелых ионов. В условиях повышенной ионизации воздуха учет аэрозольных частиц большего размера увеличивает плотность отрицательного объемного заряда и смещает его к поверхности.

Приближение сильного турбулентного перемешивания. При условиях в приземном слое, когда параметр $\xi_{1,2} \ll 1$, стационарный вариант системы (1) расщепляется на систему линейных относительно электрического поля уравнений [5, 7]. В нулевом приближении распределение аэроионов определяется только турбулентным переносом и не зависит от электрического поля [5, 7]. Электродинамическая модель преобразуется к виду:

$$-\frac{d}{dz} \left(D_T(z) \frac{dn_{1,2}}{dz} \right) = q - \alpha n_{1,2}^2; \quad (11)$$

$$-\frac{D_T(z)}{\epsilon_0} \frac{d^2 E}{dz^2} + \lambda(z) E = j_0.$$

$$n_1(z = z_0) = n_2(z = z_0) = 0, \quad \left. \frac{dE}{dz} \right|_{z=z_0} = 0, \quad n_1(\infty) = n_2(\infty) = \left(\frac{j_0}{\alpha} \right)^{1/2}, \quad E_\infty = \frac{j_0}{\lambda_\infty}.$$

Профили электрической проводимости воздуха $\lambda(z)$ и плотности объемного заряда $\rho(z)$ по формулам:

$$\lambda(z) = e(b_1 n_1(z) + b_2 n_2(z)), \quad \rho(z) = e(n_1(z) - n_2(z)). \quad (12)$$

Характерный масштаб распределение аэроионов (электрической проводимости) определяется как $l_m = (D_m \tau)^{\frac{1}{2-m}}$, $\tau = (q_\infty \alpha)^{-1}$, т.е. расстояние, проходимое аэроионом вследствие турбулентного переноса за время релаксации. Характерный масштаб распределение для профиля электрического поля определяется профилем электрической проводимости и турбулентным переносом. Характерный масштаб распределения для электрического поля, определяющий высоту турбулентного ЭС равен $L_m = (D_m \tau_{\lambda_\infty})^{\frac{1}{2-m}}$, $\tau_{\lambda_\infty} = (4 \pi \lambda_\infty)^{-1}$, $m = 0; 1; 4/3$ – параметр стратификации соответственно устойчивой, нейтральной и неустойчивой атмосферы [1].

Расчеты показывают [5, 7], что при увеличении степени неустойчивости атмосферы высота ЭС и масштаб распределения его характеристик растет. Плотность электрического заряда резко возрастает в тонком слое у поверхности, а за-

тем монотонно уменьшается. Наиболее сильным этот максимум проявляется при термически неустойчивой стратификации ($m = 4/3$) атмосферы. В случае нейтральной стратификации атмосферы профиль электрической проводимости носит логарифмический характер [5, 7].

С помощью оценки масштаба L_m , который играет роль критерия подобия, можно сделать вывод, что увеличение аэрозольного загрязнения атмосферы и, одновременно, понижение степени ионизации воздуха, уменьшает высоту ЭС и характерный масштаб распределения его характеристик [5, 7].

Заключение. Проведенный анализ электродинамической модели атмосферного приземного слоя в приближении ЭЭ выявил, что в результате ионизационно-рекомбинационных процессов образуется ЭС, в котором пространственно-временные распределения электрических характеристик зависят от его характерного масштаба. Высота ЭС, прежде всего, зависит от степени метеорологической устойчивости приземной атмосферы. Существенную роль в формировании структуры ЭС играют турбулентный и конвективный переносы, а также ионизация атмосферы и степень ее аэрозольного загрязнения. Применение той или другой модели ЭЭ для решения научно-прикладных задач можно обосновывать с помощью критериев подобия, полученных при исследовании уравнений электродинамической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 506 с.
2. Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. – 2008. – № 10. – С. 8-18.
3. Williams E.R. The global electrical circuit: A Review // *Atm. Res.* – 2009. – Vol. 91. – P. 140-152.
4. Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. – 2010. – Т. 180, № 5. – С. 527-534.
5. Морозов В. Н., Куповых Г.В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя: монография. – СПб.: Астерион, 2017. – 307 с.
6. Афиногенов Л.П., Грушин С.И., Романов Е.В. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 319 с.
7. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог. Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.
8. Куповых Г.В. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. – Таганрог. Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 114 с.
9. Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С. Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // Известия вузов. Радиофизика. – 2013. – № 11-12, Т. 56. – С. 820-828.
10. Редин А.А., Куповых Г.В., Клово А.Г., Болдырев А.С. Математическое моделирование электродинамических процессов в приземном слое в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 8 (121). – С. 111-121.
11. Болдырев А.С., Редин А.А., Куповых Г.В., Морозов В.Н. Электродинамическая модель конвективно-неустойчивого атмосферного приземного слоя // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. Спецвыпуск. Физика атмосферы. – 2010. – С. 23-28.
12. Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В., Морозов В.Н. Генерация объемного заряда вблизи поверхности земли с учетом взаимодействия аэрозольных частиц с аэроионами // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. Спецвыпуск. Физика атмосферы. – 2010. – С. 81-85.
13. Kopyukh G., Redin A., Boldyreff A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer // *Journal of Electrostatics.* – 71. Elsevier B.V. – 2013. – P. 305-311.

14. Морозов В.Н., Куповых Г.В., Редин А.А., Кудринская Т.В. Нестационарное физико-математическое моделирование электрических процессов в приземном слое атмосферы с учетом субмикронных аэрозольных частиц // Тр. ГГО им. А.И. Воейкова. – СПб., 2017. – Вып. 584. – С. 36-57.
15. Клово А.Г., Куповых Г.В., Свидельский С.С., Скляров Н.Е. Исследования структуры электродного слоя в приземной атмосфере // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. – 2018. – № 1. – С. 77-89.
16. Куповых Г.В., Клово А.Г., Тимошенко Д.В., Свидельский С.С. Приближенное аналитическое решение задачи об электродинамическом состоянии приземной атмосферы в условиях аэрозольного загрязнения // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. – 2018. – № 2. – С.84-89.
17. Клово А.Г., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В., Свидельский С.С. Моделирование структуры турбулентного электродного слоя в условиях аэрозольного загрязнения приземной атмосферы // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. – 2018. – № 3. – С. 82-88.
18. Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Редин А.А. Исследования ионизационного состояния приземного слоя атмосферы в разных геофизических условиях // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 4. – С. 77-85.
19. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V. Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer // CATPID-2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 698. – 2019 044034. – 8 p.
20. Куповых Г.В., Кудринская Т.В., Тимошенко Д.В., Клово А.Г., Свидельский С.С., Литвинова В.С. Математическое моделирование электрических процессов в приземном слое атмосферы // VIII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству с международным участием (Нальчик, 23-27 сентября 2019 г.). – СПб.: Изд-во ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – С. 191-193.

REFERENCES

1. Atmosfera. Spravochnik (spravochnye dannye, modeli) [Atmosphere. Handbook (reference data, models)]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 506 p.
2. Anisimov S.V., Mareev E.A. Geofizicheskie issledovaniya global'noy elektricheskoy tsepi [Geophysical studies of the global electric circuit], *Fizika Zemli* [Physics of the Earth], 2008, No. 10, pp. 8-18.
3. Williams E.R. The global electrical circuit: A Review, *Atm. Res.*, 2009, Vol. 91, pp. 140-152.
4. Mareev E.A. Dostizheniya i perspektivy issledovaniy global'noy elektricheskoy tsepi [Achievements and prospects of research of the global electric circuit], *UFN* [Advances in Physical Sciences], 2010, Vol. 180, No. 5, pp. 527-534.
5. Morozov V. N., Kupovykh G.V. Matematicheskoe modelirovanie global'noy atmosfery elektricheskoy tsepi i elektrichestva prizemnogo sloya: monografiya [Mathematical modeling of the global atmospheric electric circuit and surface layer electricity: a monograph]. Saint Petersburg: Asterion, 2017, 307 p.
6. Afinogenov L.P., Grushin S.I., Romanov E.V. Apparatura dlya issledovaniy prizemnogo sloya atmosfery [Equipment for studies of the surface layer of the atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 319 p.
7. Kupovykh G.V., Morozov V.N., Shvarts Ya.M. Teoriya elektrodnoogo effekta v atmosfere [Theory of the electrode effect in the atmosphere]. Taganrog. Izd-vo TRTU, 1998, 123 p.
8. Kupovykh G.V. Elektrodinamicheskie protsessy v prizemnom sloe atmosfery [Electrodynamic processes in the surface layer of the atmosphere]. Taganrog. Izd-vo TTI YuFU, 2009, 114 p.
9. Redin A.A., Kupovykh G.V., Boldyrev A.S. Elektrodinamicheskaya model' konvektivno-turbulentnogo prizemnogo sloya atmosfery [Electrodynamic model of convective-turbulent surface layer of the atmosphere], *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Izvestiya vuzov. Radio], 2013, No. 11-12, Vol. 56, pp. 820-828.
10. Redin A.A., Kupovykh G.V., Klovo A.G., Boldyrev A.S. Matematicheskoe modelirovanie elektrodinamicheskikh protsessov v prizemnom sloe v usloviyakh aerazol'nogo zagryazneniya atmosfery [Mathematical modeling of electrodynamic processes in the surface layer under conditions of aerosol pollution of the atmosphere], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 8 (121), pp. 111-121.

11. Boldyrev A.S., Redin A.A., Kupovykh G.V., Morozov V.N. Elektrodinamicheskaya model' konvektivno-neustoychivogo atmosfernogo prizemnogo sloya [Electrodynamic model of convective-unstable atmospheric surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Sev.-Kav. region. Estestvennye nauki. Spetsvyпуск. Fizika atmosfery* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences. Special issue. Physics of the atmosphere], 2010, pp. 23-28.
12. Redin A.A., Klovo A.G., Kupovykh G.V., Morozov V.N. Generatsiya ob'emnogo zaryada vblizi poverkhnosti zemli s uchetom vzaimodeystviya aerazol'nykh chastits s aeroionami [The generation of space charge near the earth's surface, accounting for the interaction of aerosol particles with air ions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Sev.-Kav. region. Estestvennye nauki. Spetsvyпуск. Fizika atmosfery* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences. Special issue. Physics of the atmosphere], 2010, pp. 81-85.
13. Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer, *Journal of Electrostatics*, 71, Elsevier B.V., 2013, pp. 305-311.
14. Morozov V.N., Kupovykh G.V., Redin A.A., Kudrinskaya T.V. Nestatsionarnoe fiziko-matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh protsessov v prizemnom sloe atmosfery s uchetom submikronnykh aerazol'nykh chastits [Nonstationary physical and mathematical modeling of electrical processes in the surface layer of the atmosphere taking into account submicron aerosol particles], *Tr. GGO im. A.I. Voeykova* [Proceedings of the Voeykov State Educational Institution]. Saint Petersburg, 2017, Issue 584, pp. 36-57.
15. Klovo A.G., Kupovykh G.V., Svidel'skiy S.S., Sklyarov N.E. Issledovaniya struktury elektrodnoogo sloya v prizemnoy atmosfere [Studies of the structure of the electrode layer in the surface atmosphere], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Sev.-Kav. region. Estestvennye nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences], 2018, No. 1, pp. 77-89.
16. Kupovykh G.V., Klovo A.G., Timoshenko D.V., Svidel'skiy S.S. Priblizhennoe analiticheskoe reshenie zadachi ob elektrodinamicheskom sostoyanii prizemnoy atmosfery v usloviyakh aerazol'nogo zagryazneniya [Approximate analytical solution of the problem of the electrodynamic state of the surface atmosphere under conditions of aerosol pollution], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Sev.-Kav. region. Estestvennye nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences], 2018, No. 2, pp.84-89.
17. Klovo A.G., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Svidel'skiy S.S. Modelirovanie struktury turbulentnogo elektrodnoogo sloya v usloviyakh aerazol'nogo zagryazneniya prizemnoy atmosfery [Modeling of the structure of a turbulent electrode layer in the conditions of aerosol pollution of the surface atmosphere], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Sev.-Kav. region. Estestvennye nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences], 2018, No. 3, pp. 82-88.
18. Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Redin A.A. Issledovaniya ionizatsionnogo sostoyaniya prizemnogo sloya atmosfery v raznykh geofizicheskikh usloviyakh [Studies of the ionization state of the surface layer of the atmosphere in different geophysical conditions], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2018, No. 4, pp. 77-85.
19. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V. Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer, *CATPID-2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 698, 2019 044034, 8 p.
20. Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G., Svidel'skiy S.S., Litvinova V.S. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh protsessov v prizemnom sloe atmosfery [Mathematical modeling of electrical processes in the surface layer of the atmosphere], *VIII Vserossiyskaya konferentsiya po atmosfernomu elektrichestvu s mezhdunarodnym uchastiem (Nal'chik, 23-27 sentyabrya 2019 g.)* [VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity with international participation (Nalchik, September 23-27, 2019)]. Saint Petersburg: Izd-vo VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2019, pp. 191-193.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.Н. Каркищенко.

Свидельский Сергей Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: svidelskiy@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89281410341; аспирант.

Литвинова Валерия Сергеевна – e-mail: litvvalery@mail.ru; тел.: 89185884396; аспирант.

Куповых Геннадий Владимирович – e-mail: kupovykh@sfedu.ru; тел.: 89289543642; д.ф.-м.н.; профессор.

Клово Александр Георгиевич – e-mail: klovo_ag@mail.ru; тел.: 89281221064; к.ф.-м.н.; доцент.

Svidelsky Sergey Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: svidelskiy@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79281410341; postgraduate student.

Litvinova Valeria Sergeevna – e-mail: litvvalery@mail.ru; phone: +79185884396; postgraduate student.

Kupovykh Gennady Vladimirovich – e-mail: kupovykh@sfedu.ru; phone: +79289543642; dr. of phys. and math. sc.; professor.

Klovo Alexander Georgievich – e-mail: klovo_ag@mail.ru; phone: +79281221064; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

УДК 621.396.94:621.376

DOI 10.18522/2311-3103-2020-5-141-149

Hussein Ahmed Mahmood, К.Е. Румянцев, Al-Karawi Hussein Shookor

**ЭВОЛЮЦИЯ РАДИОСВЯЗИ ПО ОПТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ СВЯЗИ
В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ПОДНЕСУЩИХ С АМПЛИТУДНОЙ
МАНИПУЛЯЦИЕЙ**

В беспроводных системах и сетях отмечается высокий спрос на радиосвязь по оптическому каналу связи в свободном пространстве (RoFSO) с широкой полосой пропускания и высокой скоростью передачи данных. Такая связь обеспечивает такую же скорость передачи данных, как в волоконно-оптических системах, но при меньшей стоимости на её развёртывание. Системы RoFSO реализуются комбинированием радиосигнала (RF) с оптическим сигналом для беспроводных каналов в свободном пространстве (FSO). Предлагается моделирование системы с мультиплексированием поднесущих с амплитудной манипуляцией (SCM/ASK) для оптической связи в свободном пространстве. В системе Скорость передачи данных принята равной 1 Гбит/с. Электронный амплитудный модулятор настроен на радиосигнал 10 ГГц. К нему добавляются 100 каналов с частотным разнесением поднесущих частот на 10 МГц при рабочей частоте первого канала 60 МГц. Эти каналы поднесущих смешиваются с гармоническим радиосигналом с несущей частотой 10 ГГц в гибридном ответвителе со сдвигом фазы в 90°. Непрерывное лазерное излучение с входной мощностью 10 дБм и длиной волны 1550 нм модулируется сформированным радиосигналом в оптическом LiNb модуляторе Маха-Цендера на LiNb-кристалле. Выходной сигнал модулятора передаётся по разным оптическим линиям связи в свободном пространстве протяжённостью 300 ... 1000 м под воздействием атмосферной турбулентности, определяемой структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления. Система оценивается с точки зрения Q-добротности и частоты ошибок бит (BER) с использованием программного обеспечения Optisystem. Показано, что максимальная протяжённость связи при слабой турбулентности ($C_n^2 = 5 \times 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$) и $BER=10^{-9}$ составляет 950 м, а при сильной турбулентности ($C_n^2 = 5 \times 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$) – 850 м.

Радиосвязь; оптический канал; свободное пространство; поднесущие составляющие; мультиплексирование; амплитудная манипуляция; оптический модулятор Маха-Цендера; частоты ошибок бит; добротность.