

О.В. Белоусова, Г.В. Куповых, А.Г. Клово, В.В. Гривцов

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ

*Представлены результаты математического моделирования электродинамической структуры турбулентного приземного слоя атмосферы. Использована модель стационарного турбулентного электродного эффекта, действующего вблизи поверхности земли. Анализ уравнений методами теории подобия позволил сделать ряд обоснованных физических допущений, позволивших получить аналитические решения. Получены аналитические формулы для расчетов профилей концентраций легких ионов (аэроионов), плотности объемного электрического заряда и напряженности электрического поля в турбулентном электродном слое. В результате математического моделирования исследованы зависимости распределения электрических характеристик приземного слоя от значений электрического поля, степени турбулентного перемешивания и аэрозольного загрязнения атмосферы. Показано, что параметр электродного эффекта (отношение значений напряженности электрического поля на поверхности земли и на верхней границе электродного слоя) практически не зависит от атмосферных условий, тогда как высота электродного слоя и, соответственно, масштаб распределения электрических характеристик приземного слоя меняются в значительной степени. Усиление турбулентного перемешивания в приземном слое приводит к увеличению высоты электродного слоя и, как следствие, масштабов распределения его параметров. Усиление электрического поля или загрязнение воздуха аэрозольными частицами достаточной концентрации приводит к уменьшению его высоты. Увеличение концентрации аэрозольных частиц в атмосфере уменьшает значения плотности электрического заряда у поверхности земли. Теоретические расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными и результатами численного моделирования электродинамической структуры приземного слоя. Полученные в работе аналитические формулы для расчетов электрических характеристик приземного слоя и результаты вычислений могут быть полезны при решении ряда прикладных задач геофизики, в частности для мониторинга электрического состояния атмосферы.*

*Математическое моделирование; электродинамика; приземный слой; атмосфера; турбулентный электродный эффект; электрическое поле; аэроионы; объемный заряд; аэрозоль.*

O.V. Belousova, G.V. Kupovykh, A.G. Klovo, V.V. Grivtsov

### MODELING RESULTS OF THE TURBULENT SURFACE LAYER ELECTRODYNAMIC STRUCTURE

*The article presents the results of mathematical modeling of turbulent surface layer electrodynamic structure. A model of a stationary turbulent electrode effect operating near the earth's surface is used. The analysis of equations by methods of similarity theory allowed us to make a number of reasonable physical assumptions that allowed us to obtain analytical solutions. Analytical formulas have been obtained for calculating the profiles of concentrations of small ions (aeroions), the density of the space electric charge and the electric field strength in a turbulent electrode layer. As a result of mathematical modeling, the dependences electrical characteristics in surface layer on the values of the electric field, the turbulent mixing degree and aerosol pollution of the atmosphere are investigated. It is shown that the parameter of the electrode effect (the ratio of the values of the electric field strength on the earth's surface and at the upper boundary of the electrode layer) practically does not depend on atmospheric conditions, whereas the height of the electrode layer and, accordingly, the scale of the distribution of the electrical characteristics of the surface layer vary significantly. The intensification of turbulent mixing in the surface layer leads to an increase in the height of the electrode layer and, as a consequence, the scale of distribution of its parameters. The strengthening of the electric field or air pollution by aerosol parti-*

cles of sufficient concentration leads to a decrease in its height. An increase in the concentration of aerosol particles in the atmosphere reduces the values of the electric charge density at the earth's surface. Theoretical calculations are in good agreement with experimental data and the results of numerical modeling of the surface layer electrical structure. The analytical formulas obtained in the work for calculating the electrical characteristics of the surface layer and the results of calculations can be useful in solving a number of applied problems of geophysics, in particular for monitoring the electrical state of the atmosphere.

*Mathematical modeling; electrostatics; surface layer; atmosphere; turbulent electrode effect; electric field; aeroions; bulk charge; aerosol.*

**Введение.** Электрическое поле атмосферы, обусловленное действием глобальных токовых генераторов [1], подвергается воздействию электродного эффекта вблизи поверхности земли [1–4]. Структура образующегося электродного слоя высотой от нескольких до нескольких десятков метров зависит от значений напряженности электрического поля, ионизации воздуха, турбулентного перемешивания, а также степени аэрозольного и радиоактивного загрязнений в приземном слое. Известные электродинамические модели приземного слоя основываются на теории классического (нетурбулентного) или турбулентного электродного эффекта в атмосфере [1–4]. Имеется достаточно большое количество результатов численных расчетов электрической структуры приземного слоя [3–7]. Однако, для практических расчетов электрических характеристик атмосферы представляют интерес аналитические выражения, получаемые методами математического моделирования.

В работах [8–10] представлен анализ общей системы электродинамических уравнений для приземного слоя атмосферы методами теории подобия. Определены условия стационарности процессов. Получены критерии подобия для различных электрогидродинамических условий в атмосфере, позволяющие обосновано применять те или иные модели электродного эффекта. Определены характерные масштабы электродинамических процессов в приземном слое атмосферы. В рамках модели классического электродного эффекта получены аналитические выражения для распределений концентраций полярных аэроионов ( $n_{1,2}$ ) и электрического поля ( $E$ ) в различных условиях, а также рассчитаны значения плотности объемного заряда и плотности электрического тока [10].

Цель настоящей работы – математическое моделирование электродинамического состояния турбулентного приземного слоя с учетом влияния аэрозольного загрязнения воздуха.

**1. Постановка задачи.** Электродинамическая модель стационарного горизонтально-однородного свободного от аэрозоля приземного слоя атмосферы в приближении турбулентного электродного эффекта [3, 4, 6, 7] состоит из ионизационно-рекомбинационных уравнений и уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} \cdot n_{1,2} E) - \frac{\partial}{\partial z} (D_T(z) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z}) = q(z) - \alpha n_1 n_2, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2)$$

где  $b_{1,2}$  – подвижности полярных аэроионов,  $\alpha$  – коэффициент их рекомбинации,  $D_T = D_j z$  – коэффициент турбулентной диффузии аэроионов,  $q$  – скорость ионизации воздуха,  $e$  – элементарный заряд,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Введем в (1) безразмерные переменные, используя характерные значения и масштабы входящих в них физических величин:

$$z' = z/l_1, \quad n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty, \quad E' = E/E_\infty, \quad n_\infty = \sqrt{q_\infty/\alpha}, \quad l_1 = D_1 \cdot \tau, \quad \tau = (q_\infty/\alpha)^{-1/2}$$

Тогда получаем уравнения в безразмерной форме:

$$-\frac{\partial}{\partial z'} \left( z' \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} E') = \frac{q}{q_\infty} - n'_1 n'_2, \quad \xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| \cdot E_\infty \cdot \tau}{l_1}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \gamma (n'_1 - n'_2), \quad \gamma = \frac{e}{\varepsilon_0} \frac{n_\infty}{E_\infty} l_1.$$

Знак «∞» означает верхнюю границу ( $Z_\infty$ ) электродного слоя. Систему (2) характеризуют два безразмерных параметра (критерии подобия)  $\xi_{1,2}$  и  $\gamma$ , которые определяют тип модели электродного эффекта [1–3].

**2. Модель турбулентного электродного слоя в чистой атмосфере.** Рассмотрим случай  $\xi_{1,2} < 1$ , когда имеет место турбулентный электродный эффект, т.е. перенос аэроионов осуществляется, наряду с электрическими силами, турбулентными потоками воздуха [2, 3, 4–8]. Также будем предполагать выполненным условие  $|\gamma| \ll 1$ , тогда объёмным зарядом можно пренебречь, т.е. электрическое поле можно считать его постоянным.

Итак, для получения аналитического решения из уравнений системы (1) сделаем следующие допущения:  $E = E_0 = \text{const}$ ,  $q = \text{const}$ ,  $D_T(z, t) = D_0 = \text{const}$ . Используя идею расщепления по физическим процессам [9–11], линеаризуем правые части ионизационно-рекомбинационных уравнений, положив в первом уравнении  $n_2 = n_\infty$ , а во втором –  $n_1 = n_\infty$ , и тогда получаем:

$$\pm b_{1,2} E_0 \frac{dn_{1,2}}{dz} - D_0 \frac{d^2 n_{1,2}}{dz^2} = q - \alpha n_\infty n_{1,2}. \quad (3)$$

Зададим граничные условия как:

$$n_{1,2}(z = z_0) = 0, \quad n_{1,2}(z = z_\infty) = \sqrt{q_\infty / \alpha} = n_\infty, \quad (4)$$

где  $z_0$  – масштаб шероховатости земной поверхности [1–4].

Решая совместно (3) и (4), получаем аналитические выражения для высотных профилей полярных аэроионов.

$$n_1(z) = \frac{q}{\alpha n_\infty} \left( 1 - e^{k_{12}(z-z_0)} \right), \quad (5)$$

$$n_2(z) = \frac{q}{\alpha n_\infty} \left( 1 - e^{k_{22}(z-z_0)} \right),$$

где

$$k_{12} = \frac{b_1 E_0 - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_1 E_0)^2}}{2D_0}, \quad k_{22} = \frac{-b_2 E_0 - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_2 E_0)^2}}{2D_0}.$$

Плотность электрического заряда может быть рассчитана по формуле:

$$\rho(z) = e(n_1(z) - n_2(z)). \quad (6)$$

Тогда получаем:

$$\rho(z) = \frac{eq}{\alpha n_\infty} \left( e^{k_{22}(z-z_0)} - e^{k_{12}(z-z_0)} \right). \quad (7)$$

Для расчёта профиля напряжённости электрического поля воспользуемся уравнением для стационарного полного электрического тока, вытекающего из системы (1) [3, 4].

Значение полного тока можно рассчитать по закону Ома на верхней границе электродного слоя:

$$j_0 = \lambda_\infty \cdot E_0, \quad \lambda_\infty = e(b_1 n_1(\infty) + b_2 n_2(\infty)), \quad (8)$$

где  $n_{1,2}(\infty) = (q/\alpha)^{1/2}$  – асимптотические значения концентраций аэроионов на верхней границе электродного слоя.

С учётом сделанных выше допущений, а также полагая постоянным значение электрической проводимости воздуха ( $\lambda$ ), уравнение для полного электрического тока примет вид:

$$-\varepsilon_0 D_0 \frac{d^2 E}{dz^2} + \lambda E = j_0. \quad (9)$$

Граничные условия зададим в виде:

$$E(z = z_0) = E_0, \quad E(z \rightarrow \infty) = E_\infty. \quad (10)$$

Решением системы (9) и (10) является профиль электрического поля в турбулентном электродном слое:

$$E(z) = (E_0 - E_\infty) e^{-\frac{(z-z_0)\sqrt{\lambda}}{\varepsilon_0 D_0}} + E_\infty. \quad (11)$$

**3. Модель турбулентного электродного слоя в условиях аэрозольного загрязнения.** Рассмотрим модель турбулентного электродного слоя, заполненный монодисперсными аэрозольными частицами концентрацией  $N$ . Тогда в правой части ионизационно-рекомбинационных уравнений в системе (1), можно добавить член  $BNn_{1,2}$ , описывающий взаимодействие аэроионов с аэрозолем [12–18]. Параметр  $B = \frac{2\eta_1\eta_2}{\eta_1 + 2\eta_2}$  зависит от коэффициентов воссоединения полярных аэроионов ( $\eta_{1,2}$ ) легких ионов с аэрозольными частицами [14, 17]. Очевидно, что для достаточно больших концентраций аэрозоля ( $N \geq n_{1,2}$ ) рекомбинационным членом в правых частях этих уравнений можно пренебречь.

Используя сделанные выше допущения, перейдем к следующей системе уравнений с учетом аэрозольных частиц в воздухе с соответствующими граничными условиями:

$$-D_0 \frac{d^2 n_{1,2}}{dz^2} \pm b_{1,2} E_0 \frac{dn_{1,2}}{dz} = q - BNn_{1,2}, \quad (12)$$

$$n_{1,2}(z = z_0) = 0, \quad n_{1,2}(z \rightarrow \infty) = \frac{q}{BN}.$$

Решением (12) являются профили концентраций полярных аэроионов:

$$n_1(z) = \frac{q}{BN} (1 - e^{k_{11}(z-z_0)}), \quad (13)$$

$$n_2(z) = \frac{q}{BN} (1 - e^{k_{21}(z-z_0)}).$$

где

$$k_{11} = \frac{b_1 E_0 - \sqrt{4D_0 BN + (b_1 E_0)^2}}{2D_0}, \quad k_{21} = \frac{-b_2 E_0 - \sqrt{4D_0 BN + (b_2 E_0)^2}}{2D_0}.$$

Тогда для плотности объемного заряда получаем:

$$\rho(z) = \frac{eq}{BN} (e^{k_{21}(z-z_0)} - e^{k_{11}(z-z_0)}). \quad (14)$$

Расчет профиля напряженности электрического поля осуществляется по формуле (11) с учетом изменённых значений электрической проводимости  $\lambda$  и  $\lambda_\infty$ , а, следовательно, и плотности тока  $j_0$ , за счет присутствия аэрозоля в атмосфере.

**4. Результаты вычислений и их анализ.** Расчёты электрических характеристик приземного слоя атмосферы проводились по формулам (7), (11), (14) для чистой и загрязнённой аэрозольными частицами атмосферы. Физические параметры, входящие в аналитические выражения, задавались следующими:  $b_1 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$ ,  $b_2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$ ,  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ ,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ,  $q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $|E_0| = 50; 100; 200 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $j_0 \sim 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ ,  $\lambda \sim 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $N \sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $D_0 = 0,01; 0,1 \text{ м}^2 / \text{с}$ ,  $\eta_1 = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $\eta_2 = 4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $z_0 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Для расчетов напряженности электрического поля использовались значения параметров, следующие из решений ионизационно-рекомбинационных уравнений (3), (4) и (12).

В чистой атмосфере значения электрической проводимости и тока:  $\lambda = (3-9) \cdot 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $\lambda_\infty = 9,25 \cdot 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ , откуда значение полного тока равно  $j_0 = \lambda_\infty \cdot E_0 \approx 9 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ . Тогда для расчета профиля напряженности электрического поля по формуле (11) получаем следующие значения параметров  $\lambda \approx 6 \cdot 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $j_0 \approx 9 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ .

На рис. 1-2 построены профили плотности объемного заряда и напряженности электрического поля в приземном слое в чистой атмосфере.

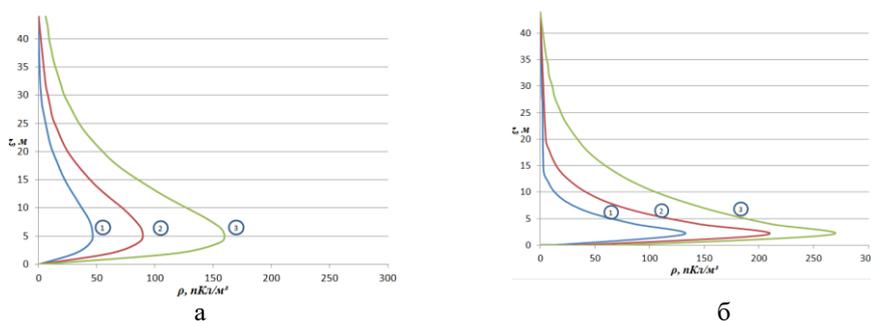


Рис. 1. Профили плотность объемного заряда в приземном слое без аэрозоля: (для  $D_0 = 0,1 \text{ м}^2 / \text{с}$  (а) и  $D_0 = 0,01 \text{ м}^2 / \text{с}$  (б); кривые (1,2,3) при  $E_0 = -50 ; -100 ; -200 \text{ , [В / м]}$ )

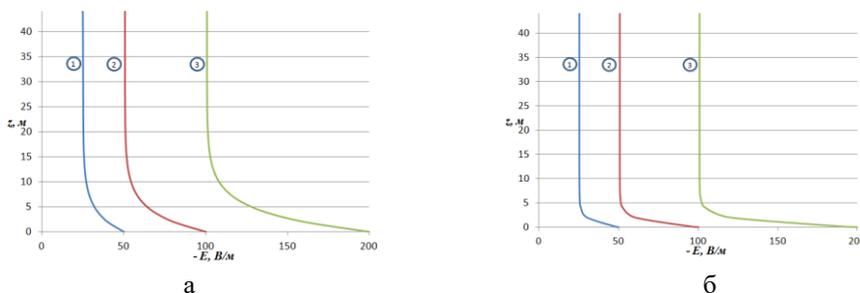


Рис. 2. Профили электрического поля в приземном слое без аэрозоля: (для  $D_0 = 0,1 \text{ м}^2 / \text{с}$  (а) и  $D_0 = 0,01 \text{ м}^2 / \text{с}$  (б); кривые (1,2,3) при  $E_0 = -50 ; -100 ; -200 \text{ , [В / м]}$ )

Аналогично, при наличии аэрозольных частиц в воздухе концентрацией  $N \sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$  имеем  $\lambda = (1,3 - 2,6) \cdot 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $\lambda_{\infty} = 2,65 \cdot 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ , и, соответственно, значение полного тока принимает значение  $j_0 = \lambda_{\infty} \cdot E_0 \approx 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ , а параметры в формуле (11) равны  $\lambda \approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ ,  $j_0 \approx 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ .

На рис. 3-4 приведены профили плотности заряда и напряжённости электрического поля в приземном слое, заполненного аэрозольными частицами.

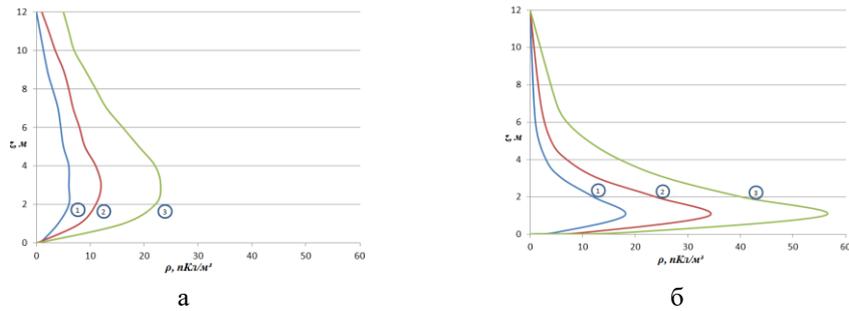


Рис. 3. Профили плотность объемного заряда в условиях аэрозольного загрязнения (для  $D_0 = 0,1 \text{ м}^2 / \text{с}$  (а) и  $D_0 = 0,01 \text{ м}^2 / \text{с}$  (б); кривые (1,2,3) при  $E_0 = -50 ; -100 ; -200 \text{ , [В / м]}$ )

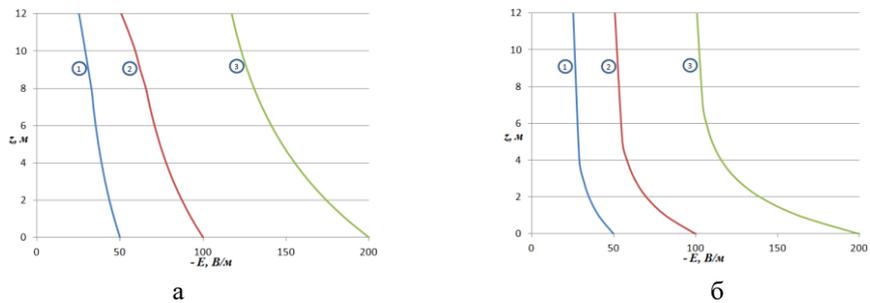


Рис. 4. Профили электрического поля в условиях аэрозольного загрязнения: (для  $D_0 = 0,1 \text{ м}^2 / \text{с}$  (а) и  $D_0 = 0,01 \text{ м}^2 / \text{с}$  (б); кривые (1,2,3) при  $E_0 = -50 ; -100 ; -200 \text{ , [В / м]}$ )

В ходе вычислительных экспериментов получены следующие результаты. В условиях турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы высота электродного слоя увеличивается по сравнению с аналогичными расчетами для не-турбулентного случая [11], а его электрическая структура зависит от значений коэффициента турбулентной диффузии. Знак объемного электрического заряда положительный, а максимальное значение его плотности наблюдается у поверхности земли.

Как и в случае классического электродного эффекта [11], появление в приземном воздухе аэрозольных частиц концентрацией сопоставимой с числом аэроионов приводит к уменьшению высоты турбулентного электродного слоя и значений плотности электрического заряда.

С усилением турбулентного перемешивания максимальные значения плотности заряда уменьшаются, значения напряженности электрического поля увеличиваются вследствие увеличения характерных масштабов распределения величин.

**Заключение.** Методами математического моделирования построены и исследованы аналитические модели турбулентного электродного слоя в чистой атмосфере и в условиях аэрозольного загрязнения. На основании теории подобия сделаны обоснованные физические допущения и получены решения электродинамических уравнений, расщепленных по физическим процессам. Получены распределения концентраций полярных аэроионов, электрической проводимости, плотности объемного заряда и электрического поля. Исследованы их зависимости от значений электрического поля, степени турбулентного перемешивания и аэрозольного загрязнения воздуха. Полученные аналитические профили электрических характеристик приземного слоя хорошо согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными [3–5, 19, 20] и могут быть полезны при решении ряда прикладных задач геофизики и физики атмосферы [21, 22].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Морозов В.Н.* Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеониздат, 1991. – С. 394-408.
2. *Куповых Г.В.* Электричество приземного слоя // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 1995. – № 4. – С. 32-34.
3. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.
4. *Куповых Г.В.* Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 114 с.
5. *Hoppel W.A.* Electrode effect: comparison of the theory and measurement // In: Planetary Electrodynamics, 2. S.C. Coroniti and J. Hughes; editors. – Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1969. – P. 167-181.
6. *Куповых Г.В., Морозов В.Н.* Турбулентный электродный эффект в приземном слое // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение № 3. – 2003. – С. 55-62.
7. *Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В.* Электродинамическая модель атмосферного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 8. – С. 93-106.
8. *Свидельский С.С., Литвинова В.С., Куповых Г.В., Клово А.Г.* Формирование структуры атмосферного электродного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 130-141.
9. *Куповых Г.В., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Тимошенко Д.В.* Математическое моделирование в электродинамике приземного слоя атмосферы // Матер. XIV Международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы математики и информатики». – Изд-во ДГУ, 2021. – С. 141-144.
10. *Куповых Г.В., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Тимошенко Д.В.* Электродинамические модели приземного слоя атмосферы // X Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сб. научных трудов (п. Нижний Архыз, Россия 28 сентября – 02 октября 2021 г.). – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 190-195.
11. *Куповых Г.В., Клово А.Г., Гривцов В.В., Белоусова О.В.* Моделирование электродинамической структуры нетурбулентного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 3 (227). – С. 234-243.
12. *Hoppel W.A., Frick G.M.* Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distribution on Aerosols in a Bipolar Ion Environment // Aerosol Science and Technology. – 1986. – 5:1. – P. 1-21.
13. *Hoppel W.A.* Ionaerosol attachment, ion depletion and charge distribution on aerosols // J. Geoph. Res. – 1985. – Vol. 90, No. D4. – P. 5917-5923.
14. *Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В.* Математическое моделирование электродинамической структуры приземного слоя атмосферы в условиях аэрозольного загрязнения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 7 (96). – С. 192-200.

15. 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. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Спецвыпуск. Физика атмосферы. – 2010. – С. 81-85.
16. Kupovykh 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.
17. Куповых Г.В., Клово А.Г., Тимошенко Д.В. Оценка влияния аэрозольного загрязнения на электрические характеристики приземной атмосферы // Матер. V Всероссийской научной конференции «Проблемы военноприкладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – С. 483-486.
18. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V. Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 698. – 044034. – 8 p.
19. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Kudrinskaya T.V., Klovo A.G. Modeling of the atmospheric electric field local variations in the turbulent surface layer // Journal of Physics: IOP Conference Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity. – 2020. – 1604. – 012003. – 5 p.
20. 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.
21. Шулейкин В.Н., Шукин Г.Г., Куповых Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. – СПб.: РГГМУ, 2015. – 206 с.
22. Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Grivtsov V.V. The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 913. – 052041. – 6 p.

## REFERENCES

1. Morozov V.N. Atmosfernoe elektrichestvo [Atmospheric electricity], *Atmosfera. Spravochnik (spravochnye dannye, modeli)* [Atmosphere. Handbook (reference data, models)]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, pp. 394-408.
2. Kupovykh G.V. Elektrichestvo prizemnogo sloya [Electricity of the surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Natural sciences], 1995, No. 4, pp. 32-34.
3. 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.
4. 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.
5. Hoppel W.A. Electrode effect: comparison of the theory and measurement, *In: Planetary Electrodynamics*, 2. S.C. Coroniti and J. Hughes; editors. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1969, pp. 167-181.
6. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Turbulentnyy elektrodnyy effekt v prizemnom sloe [Turbulent electrode effect in the surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. Prilozhenie № 3* [Izvestia of higher educational institutions. The North Caucasus region. Natural sciences. Appendix No. 3], 2003, pp. 55-62.
7. Redin A.A., Klovo A.G., Kupovykh G.V. Elektrodinamicheskaya model' atmosfernogo prizemnogo sloya [Electrodynamic model of the atmospheric near-earth layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 8, pp. 93-106.
8. Svidel'skiy S.S., Litvinova V.S., Kupovykh G.V., Klovo A.G. Formirovanie struktury atmosfernogo elektrodnoogo sloya [Formation of the structure of the atmospheric electrode layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5, pp. 130-141.
9. Kupovykh G.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Timoshenko D.V. Matematicheskoe modelirovanie v elektrodinamike prizemnogo sloya atmosfery [Mathematical modeling in the electrostatics of the surface layer of the atmosphere], *Mater. XIV Mezhdunarodnoy konferentsii «Fundamental'nye i prikladnye problemy matematiki i informatiki»* [Proceedings of the XIV International Conference "Fundamental and Applied problems of Mathematics and Computer Science"]. Izd-vo DGU, 2021, pp. 141-144.

10. Kupovykh G.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Timoshenko D.V. Elektrodynamic models of the surface layer of the atmosphere, *X Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya «Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika»: Sb. nauchnykh trudov (p. Nizhny Arkhyz, Rossiya 28 sentyabrya – 02 oktyabrya 2021 g.)* [Collection of scientific papers (Nizhny Arkhyz, Russia September 28 – October 02, 2021)]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2021, pp. 190-195.
11. Kupovykh G.V., Klovo A.G., Grivtsov V.V., Belousova O.V. Modelirovanie elektrodinamicheskoy struktury neturbulentnogo prizemnogo sloya [Modeling of the electrodynamic structure of a non-turbulent surface layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 3 (227). pp. 234-243.
12. Hoppel W.A., Frick G.M. Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distribution on Aerosols in a Bipolar Ion Environment, *Aerosol Science and Technology*, 1986, 5:1, pp. 1-21.
13. Hoppel W.A. Ionaerosol attachment, ion depletion and charge distribution on aerosols, *J. Geoph. Res.*, 1985, Vol. 90, No. D4, pp. 5917-5923.
14. Redin A.A., Klovo A.G., Kupovykh G.V. Matematicheskoe modelirovanie elektrodinamicheskoy struktury prizemnogo sloya atmosfery v usloviyakh aerazol'nogo zagryazneniya [Mathematical modeling of the electrodynamic structure of the surface layer of the atmosphere under conditions of aerosol pollution], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 7 (96), pp. 192-200.
15. 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 [Generation of a volumetric charge near the Earth's surface, taking into account the interaction of aerosol particles with aeroions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennyye nauki. Spetsvypusk. Fizika atmosfery* [Izvestiya vyshvnykh uchebnykh uchebnykh iuzov. The North Caucasus region. Natural sciences. Special edition. Physics of the atmosphere], 2010, pp. 81-85.
16. Kupovykh 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.
17. Kupovykh G.V., Klovo A.G., Timoshenko D.V. Otsenka vliyaniya aerazol'nogo zagryazneniya na elektricheskie kharakteristiki prizemnoy atmosfery [Assessment of the effect of aerosol pollution on the electrical characteristics of the surface atmosphere], *Mater. V Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Problemy voennoprikladnoy geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoy sredy»* [Materials of the V All-Russian Scientific Conference "Problems of military geophysics and control of the state of the natural environment"]. Saint Petersburg: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2018, pp. 483-486.
18. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V. Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 698, 044034, 8 p.
19. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Kudrinskaya T.V., Klovo A.G. Modeling of the atmospheric electric field local variations in the turbulent surface layer, *Journal of Physics: IOP Conference Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity*, 2020, 1604, 012003, 5 p.
20. 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.
21. Shuleykin V.N., Shchukin G.G., Kupovykh G.V. Razvitie metodov i sredstv prikladnoy geofiziki – atmosferno-elektricheskiy monitoring geologicheskikh neodnorodnostey i zon geodinamicheskikh protsessov [Development of methods and means of applied geophysics – atmospheric-electrical monitoring of geological inhomogeneities and zones of geodynamic processes]. Saint Petersburg: RGGMU, 2015, 206 p.
22. Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Grivtsov V.V. The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 913, 052041, 6 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

**Белусова Ольга Васильевна** – Южный федеральный университет; e-mail: obelousova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; ассистент.

**Куповых Геннадий Владимирович** – e-mail: kupovykh@sfedu.ru; тел.: +78634371636; кафедра высшей математики; зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

**Клово Александр Георгиевич** – e-mail: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

**Гривцов Владимир Владиславович** – e-mail: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371794; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; к.т.н.; доцент.

**Belousova Olga Vasilievna** – Southern Federal University; e-mail: obelousova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371705; the department of the higher mathematician; assistant.

**Kupovkh Gennady Vladimirovich** – e-mail: kupovykh@sfedu.ru; phone: +78634371636; the department of higher mathematics; head of department; dr. of phys. and math. sc.; professor.

**Klovo Alexander Georgievich** – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

**Gritvsov Vladimir Vladislavovich** – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371794; the department of engineering graphics and computer design; cand. of eng. sc.; associate professor.