

DOI 10.24412/2221-2574-2023-3-12-19

УДК 551.594

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНО-КОНВЕКТИВНОГО ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ

Белоусова Ольга Васильевна

аспирант кафедры высшей математики Южного федерального университета.

E-mail: obelousova@sfedu.ru

Тимошенко Дмитрий Владимирович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Южного федерального университета.

E-mail: dmitrytim@sfedu.ru

Куповых Геннадий Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Южного федерального университета.

E-mail: kupovykh@sfedu.ru

Адрес: 347922, Российская Федерация, Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, д. 44.

Аннотация: Построена и исследована модель электродинамического состояния приземного слоя, обусловленная действием электродного эффекта вблизи поверхности земли с учётом турбулентного и конвективного переносов в атмосфере. Анализ модельных уравнений методами теории подобия позволил сделать ряд обоснованных физических допущений. Методами математического моделирования получены аналитические решения электродинамических уравнений в приближениях классического и турбулентного электродного эффекта, а также уравнения полного тока для различных метеорологических условий. Получены аналитические формулы для расчётов пространственных распределений электрических характеристик приземного слоя: электрической проводимости воздуха, концентрации полярных аэроионов (ионов проводимости), объёмного заряда и напряжённости электрического поля. Исследованы зависимости распределения электрических характеристик приземного слоя от значений электрического поля, степени турбулентного перемешивания и скорости конвективного переноса. Показано, что параметр электродного эффекта (отношение значений напряжённости электрического поля на поверхности земли и на верхней границе электродного слоя) практически не зависит от атмосферных условий, тогда как высота электродного слоя и, соответственно, масштабы распределения электрических характеристик приземного слоя меняются в значительной степени. Усиление турбулентного перемешивания или скорости конвективного переноса в приземном слое приводит к увеличению высоты электродного слоя и, как следствие, масштабов распределения его параметров. Усиление электрического поля приводит к уменьшению его высоты. Результаты аналитических расчётов хорошо согласуются с экспериментальными данными и известными результатами численного моделирования электрической структуры приземного слоя. Полученные в работе аналитические формулы и расчётные данные могут быть полезны при решении ряда прикладных задач геофизики, в частности для мониторинга электрического состояния атмосферы.

Ключевые слова: математическое моделирование, приземный слой, атмосфера, электродный эффект, аэроионы, электрическое поле, проводимость, турбулентность, конвекция.

Введение

Современное состояние исследований атмосферного электричества приведены в обзорных работах [1, 2]. Отмечается необходимость исследования взаимосвязи параметров глобальной атмосферно-электрической цепи с электрическими характеристиками приземного слоя, где обычно проводятся атмосферно-электрические наблюдения [3, 4]. В исследовании электриче-

ских характеристик атмосферы общей задачей является определение пространственно-временных профилей концентраций полярных аэроионов ($n_{1,2}$) и напряжённости электрического поля (E), плотности объёмного заряда, плотности электрического тока в различных условиях.

Электродинамическая модель горизонтально-однородного свободного от аэрозоля приземного слоя атмосферы с учётом турбулентно-

го и конвективного переносов [5, 6, 7] состоит из ионизационно-рекомбинационных уравнений и уравнения Пуассона:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} \cdot n_{1,2} \cdot E) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z, t) \cdot \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} (v(z, t) \cdot n_{1,2}) = q(z, t) - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2), \end{cases} \quad (1)$$

где $b_{1,2}$ — подвижности полярных аэроионов; α — коэффициент рекомбинации; $D_T = D_I z$ — коэффициент турбулентной диффузии; q — скорость ионизации воздуха; v — скорость конвективного переноса; e — элементарный заряд; ϵ_0 — электрическая постоянная; z — высота.

Исследуем систему уравнений (1) методами теории подобия [8]. Введём безразмерные параметры, используя характерные масштабы физических величин:

$$t' = t/T, \quad z' = z/l_1, \quad n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty, \quad E' = E/E_\infty, \\ n_\infty = \sqrt{q_\infty/\alpha}, \quad l_1 = D_1 \cdot \tau, \quad \tau = (q_\infty \alpha)^{-1/2}. \quad (2)$$

Здесь и далее индекс ∞ обозначает верхнюю границу электродного слоя. Используя замену переменных (2), система уравнений (1) может быть представлена в безразмерном виде:

$$\begin{cases} \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} \cdot E') - \frac{\partial}{\partial z'} \left(z' \cdot \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) + \\ + \chi \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} = \frac{q}{q_\infty} - n'_1 \cdot n'_2, \\ \frac{\partial E'}{\partial z'} = \gamma (n'_1 - n'_2), \\ \xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| \cdot E_\infty \cdot \tau}{l_1}, \quad \chi = \frac{v}{D_1}, \quad \gamma = \frac{e}{\epsilon_0} \frac{n_\infty}{E_\infty} l_1. \end{cases} \quad (3)$$

Безразмерные параметры $\xi_{1,2}$, χ и γ являются критериями подобия, значения которых определяют тип модели электродного эффекта в приземном слое. Анализ системы (3) показывает, что при $\xi_{1,2} \geq 1$ реализуется модель классического электродного эффекта, а при $\xi_{1,2} < 1$ — турбулентного электродного эффекта. Пара-

метр γ определяет влияние электрического поля, создаваемого объёмным зарядом у поверхности земли, а параметр χ показывает соотношение механизмов турбулентного и конвективного переносов.

В работе в приближении электродного эффекта рассмотрены стационарные электродинамические модели приземного слоя, так как метеорологические процессы обычно протекают в течение нескольких часов, а время электрической релаксации в атмосфере составляет порядка ста секунд.

1. Моделирование структуры электродного слоя с учётом конвективного переноса

В процессе математического моделирования электродного слоя использован метод расщепления по физическим процессам [9], а также результаты численного моделирования электрического состояния приземного слоя [6, 7]. Описание алгоритмов моделирования структур классического и турбулентного электродного слоя (без учёта конвективного переноса) и результаты в виде аналитических выражений для концентраций полярных аэроионов, плотности объёмного заряда и напряжённости электрического поля подробно представлены в работах [9, 10].

1.1. Приближение классического электродного эффекта

Рассмотрим случай, когда критерий подобия $\xi_{1,2} \geq 1$, т.е. имеет место приближение классического электродного эффекта. Как следует из теории электродного эффекта на основании результатов численного моделирования [6] в нетурбулентном приземном слое профиль концентрации положительных ионов незначительно зависит от высоты. Тогда, положим, что $n_1 \approx const$, $q = const$, а также на первом этапе моделирования $E = E_0 = const$. Тогда модель электродного слоя с учётом конвекции описывается одним уравнением с соответствующим граничным условием:

$$(\nu - b_2 E_0) \frac{dn_2}{dz} = q - \alpha n_1 n_2, \quad n_2(z=0) = 0. \quad (4)$$

Решением (4) является выражение для профиля концентрации отрицательных ионов:

$$n_2(z) = \frac{q}{\alpha n_1} \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha n_1 z}{b_2 E_0 - \nu}\right) \right). \quad (5)$$

Рассчитаем плотность объёмного электрического заряда, создаваемого аэроионами, по формуле: $\rho(z) = e(n_1 - n_2)$. С учётом выражения (5) получаем:

$$\rho(z) = e \left[n_1 - \frac{q}{\alpha n_1} \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha n_1 z}{b_2 E_0 - \nu}\right) \right) \right]. \quad (6)$$

Далее будем исходить из того, что плотность тока проводимости j при классическом электродном эффекте не меняется с высотой, её значение можно рассчитать по закону Ома:

$$j = \lambda \cdot E, \quad \lambda = e(b_1 n_1 + b_2 n_2), \quad (7)$$

где λ — проводимость воздуха; $n_{1,2} = n_\infty = (q/\alpha)^{1/2}$ — асимптотические значения величин на верхней границе электродного слоя.

Тогда на втором этапе моделирования для расчёта профиля напряжённости электрического поля можно использовать формулу:

$$E(z) = j/\lambda(z) \quad (8)$$

Здесь $\lambda(z)$ рассчитывается на соответствующей высоте аналогично второму выражению (7):

$$\lambda(z) = e \left[b_1 n_1 + b_2 \frac{q}{\alpha n_1} \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha n_1 z}{b_2 E_0 - \nu}\right) \right) \right]. \quad (9)$$

1.2. Приближение турбулентного электродного эффекта

Рассмотрим исходную модель (1) в приближении турбулентного электродного эффекта ($\xi_{1,2} < 1$). Для получения аналитических решений стационарных уравнений, следующих из системы (1), сделаем следующие допущения: $E = E_0 = const, q = const, D_T(z, t) = D_0 = const$.

Используя идею расщепления по физическим процессам [9], линеаризуем правые части

ионизационно-рекомбинационных уравнений, положив в первом уравнении $n_2 = n_\infty$, а во втором — $n_1 = n_\infty$. Тогда, для турбулентно-конвективного электродного слоя модельные уравнения с соответствующими граничными условиями принимают вид:

$$\begin{aligned} (\nu \pm b_{1,2}) E_0 \frac{dn_{1,2}}{dz} - D_0 \frac{d^2 n_{1,2}}{dz^2} &= q - \alpha n_\infty n_{1,2}, \\ n_{1,2}(z = z_0) &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$n_{1,2}(z = z_\infty) = \sqrt{q_\infty/\alpha} = n_\infty.$$

Решениями системы уравнений (10) являются аналитические выражения для высотных профилей концентраций положительных и отрицательных аэроионов:

$$\begin{aligned} n_1(z) &= \frac{q}{\alpha n_\infty} \left(1 - e^{k_{12}(z-z_0)} \right), \\ n_2(z) &= \frac{q}{\alpha n_\infty} \left(1 - e^{k_{22}(z-z_0)} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{где } k_{12} = \frac{(b_1 E_0 + \nu) - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_1 E_0 + \nu)^2}}{2D_0};$$

$$k_{22} = \frac{-(b_2 E_0 - \nu) - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_2 E_0 - \nu)^2}}{2D_0};$$

z_0 — параметр шероховатости земной поверхности.

Для профиля плотности объёмного электрического заряда получаем:

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

Для расчёта профиля напряжённости электрического поля воспользуемся уравнением для полного электрического тока (j_0) в приземном слое атмосферы, вытекающего из системы (1). Уравнение для полного тока состоит из суммы трёх компонент: тока проводимости, турбулентного и конвективного токов. В стационарном случае имеем:

$$-\varepsilon_0 D_0 \frac{d^2 E}{dz^2} + \varepsilon_0 \nu \frac{dE}{dz} + \lambda E = j_0, \quad (13)$$

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

Значение величины полного тока на верхней границе турбулентного электродного слоя рассчитаем по формуле:

$$j_0 = \lambda_\infty \cdot E_0, \quad \lambda_\infty = e(b_1 n_1(\infty) + b_2 n_2(\infty)). \quad (14)$$

Тогда, получаем выражение для профиля напряжённости электрического поля в виде:

$$E(z) = (E_0 - E_\infty) \times \exp\left(\frac{\varepsilon_0 \nu - \sqrt{(\varepsilon_0 \nu)^2 + 4\lambda \varepsilon_0 D_0}}{2\varepsilon_0 D_0} (z - z_0)\right) + E_\infty. \quad (15)$$

Здесь полагаем значения параметров λ, ν, D_0 постоянными, а значения E_0 и E_∞ заданными.

1.3. Конвективное приближение

а) Рассмотрим модельный случай, когда конвективный перенос преобладает над турбулентным перемешиванием ($\chi = \nu/D_1 \geq 1$). Положим скорость переноса постоянной: $\nu(z) = \nu_0 = const$. Тогда в конвективно-неустойчивом электродном слое уравнение полного тока (13) с граничным условием примет вид:

$$\varepsilon_0 \nu_0 \frac{dE}{dz} + \lambda E = j_0, \quad E|_{z=z_0} = E_0. \quad (16)$$

Здесь L — высота электродного слоя. Решение уравнения (16) имеет вид:

$$E(z) = E_0 e^{\frac{\lambda}{\varepsilon_0 \nu_0} (z_0 - z)} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (17)$$

б) Далее рассмотрим модель конвективно-неустойчивого электродного слоя с учётом зависимости скорости переноса от высоты [6]:

$$\nu(z) = \nu_1 \frac{z}{l} \left(1 - \frac{z}{l}\right). \quad (18)$$

В этом случае уравнение (16) принимает вид:

$$\varepsilon_0 \nu_1 \frac{z}{l} \left(1 - \frac{z}{l}\right) \frac{dE}{dz} + \lambda E = j_0. \quad (19)$$

Решение уравнения (19) с граничным условием аналогичным приведённому в (16) имеет вид:

$$E(z) = E_0 \left(\frac{L - z_0}{z_0}\right)^{\frac{\lambda L}{\varepsilon_0 \nu_1}} \left(\frac{L - z}{z}\right)^{-\frac{\lambda L}{\varepsilon_0 \nu_1}} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (20)$$

1.4. Результаты моделирования и их анализ

Для расчётов электрических характеристик классического электродного слоя с учётом конвективного переноса в чистой атмосфере использовали формулы (5)–(7). Для расчётов электрических характеристик турбулентно-конвективного приземного слоя атмосферы использовали формулы (11), (12) и (15).

Физические параметры, входящие в аналитические выражения, задавались следующими: $b_1 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$, $b_2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$, $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $|E_0| = 100 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, $j_0 \sim 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^2$, $\lambda \sim 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$, $D_0 = 0,01 - 0,1 \text{ м}^2 / \text{с}^2$, $\nu = 0,01 - 0,1 \text{ м} / \text{с}$, $z_0 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Для расчётов напряжённости электрического поля в случае классического электродного слоя с учётом влияния конвективного переноса использовались значения параметров, следующие из решений ионизационно-рекомбинационных уравнений.

Для модели турбулентно-конвективного слоя значения электрической проводимости задавались равными: $\lambda = (3 - 9) \cdot 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$, $\lambda_\infty = 9,25 \cdot 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$, откуда получаем значение полного тока $j_0 = \lambda_\infty \cdot E_0 \approx 9 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$. Тогда для расчёта профиля напряжённости электрического поля по формуле (15) 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 и рис. 2 представлены профили напряжённости электрического поля в электродном слое в различных физических условиях.

По характеру построенных профилей напряжённости электрического поля можно сделать вывод, что конвективные процессы, наряду с турбулентностью увеличивают харак-

электродного слоя. Кроме того, из графиков видно, что при усилении электрического поля возрастает соотношения E/E_0 (параметр электродного эффекта) на одинаковых уровнях.

На рис. 4 приведены профили напряжённости электрического поля ($j = 3 \cdot 10^{-12} \text{ A / м}^2$, $\lambda = 12 \cdot 10^{-15} \text{ См}$, $L = 10 \text{ м}$) при переменной конвекции. В этом случае происходит усиление обратной зависимости напряжённости электрического поля от высоты, что проявляется в ускоренном, по сравнению со случаем постоянной конвекции, выходе функции на свои стационарные значения при уменьшении высоты.

Из приведённых на рисунках расчётных данных можно видеть, что турбулентный и конвективный переносы приводят к заметным искажениям профилей электрического поля, что проявляется в увеличении параметра электродного эффекта $E(z)/E_0$ с ростом поля E_0 .

Заключение

Проведено исследование математической модели приземного слоя атмосферы, учитывающей процессы турбулентного и конвективного переносов, как по отдельности, так и при совместном действии. Для всех рассмотренных случаев получены точные или приближённые решения уравнений электродного эффекта и полного электрического тока, описывающие структуру электродного слоя и поведение напряжённости электрического поля в приземном слое. Результаты проведенного математического моделирования хорошо согласуются с теорией электродного эф-

фекта в атмосфере и выполненными ранее численными расчётами. Полученные аналитические выражения могут служить качественным и полезным инструментом для решения прикладных задач прикладной геофизики и атмосферно-электрического мониторинга [12].

Литература

1. Russian National Report / Meteorology and Atmospheric Sciences. 2011–2014 / Eds: *I.I. Mokhov, A.A. Krivolytsky*. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAX Press, 2015. 270 p

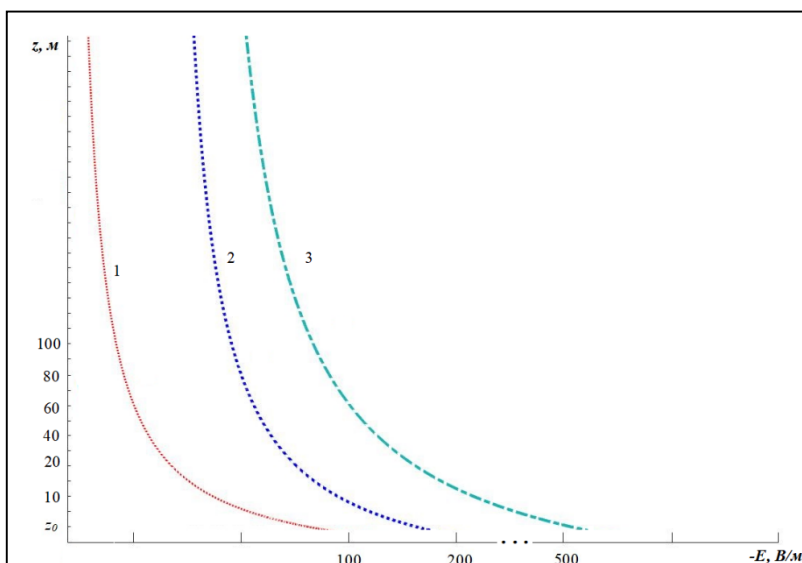


Рис. 3. Электрического поле в конвективно-неустойчивом приземном слое ($v_0 = 0,01 \text{ м / с}$):

1 — $E_0 = -100 \text{ В / м}$; 2 — $E_0 = -200 \text{ В / м}$; 3 — $E_0 = -500 \text{ В / м}$

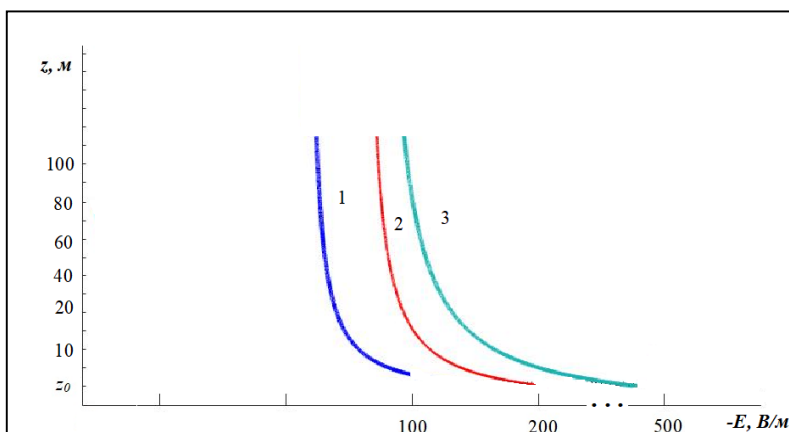


Рис. 4. Электрического поле в конвективно-неустойчивом приземном слое ($v_0 = 0,01 \text{ м / с}$):

1 — $E_0 = -100 \text{ В / м}$; 2 — $E_0 = -200 \text{ В / м}$; 3 — $E_0 = -500 \text{ В / м}$

2. Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Булатов А.А. и др. Российские исследования атмосферного электричества в 2011–2014 гг. // Известия РАН. 2016. Т. 52. № 2. С. 175–186

3. Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т. 180. № 5. С. 527–534.

4. Williams E.R., Mareev E.A. Recent progress on the global electrical circuit // Atmos. Res. 2014. Vol. 135–136. Pp. 208–227.

5. Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 394–408.

6. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.

7. Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С. Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 11–12. С. 820–828.

8. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 423 с.

9. Марчук Г.И. Методы расщепления. М.: Наука, 1988. 263 с

10. 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.

11. Белоусова О.В., Куповых Г.В., Клово А.Г., Гривцов В.В. Результаты моделирования электродинамической структуры турбулентного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 4(228). С. 245–253.

12. Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г., Куповых Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики — атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2015. 206 с.

Поступила 20 июня 2023 г.

English

MATHEMATICAL MODELING OF THE TURBULENT-CONVECTIVE SURFACE LAYER ELECTRICAL STRUCTURE

Olga Vasilyevna Belousova — Postgraduate Student, Department of Higher Mathematics, Southern Federal University.

E-mail: obelousova@sfedu.ru

Dmitry Vladimirovich Timoshenko — PhD, Associate Professor of Department of Higher Mathematics, Southern Federal University.

E-mail: dmitrytim@sfedu.ru

Gennady Vladimirovich Kupovykh — Grand Dr. in Physics and Mathematics, Professor, the Head of Department of Higher Mathematics, Southern Federal University.

E-mail: kupovykh@sfedu.ru

Address: 347922, Russian Federation, Rostov region, Taganrog, Nekrasovsky alleyway, 44.

Abstract: There was developed and examined a model of the ground layer electrodynamic state assisted by the electrode effect near the Earth surface considering turbulent and convective transfers in the atmosphere. Model equations' analysis via similarity theory methods enabled to make a few proved physical assumptions. There were obtained analytical solutions of electrodynamic equations in approximations of the classical and turbulent electrode effect as well as the total current equations for various weather environment using mathematical simulation methods. Analytical formulas are obtained for calculating space distributions of electrical characteristics in the ground layer: air electrical conductivity, concentration of polar air ions (conductivity ions), space charge and electric field intensity. There were investigated distribution dependences of the ground layer electrical characteristics on the electric field values, on the turbulent mixing degree and the convective transfer speed. It is shown that the electrode effect parameter (the ratio of electric field intensity values on the Earth's surface and on the upper boundary of the electrode layer) is barely dependent on atmospheric environment, while the electrode layer height and thus, the distribution scale of electrical characteristics in the ground layer change significantly. Turbulent mixing intensification or convective transfer speed in the ground layer boosts the height of the electrode layer and, as a consequence, the distribution scale of its parameters' distribution. The electric field enhancement provides a decrease in its height. Analytical calculations' results match well with test data and the known results for numerical simulation of electrical

structure in the ground layer. The obtained analytical formulas and calculated data can be useful in solving a number of application tasks in geophysics, notably to monitor the atmosphere electrical state.

Keywords: mathematical simulation, ground layer, atmosphere, electrode effect, air ions, electric field, conductivity, turbulence, convection.

References

1. Russian National Report / Meteorology and Atmospheric Sciences. 2011–2014. Eds: *I.I. Mokhov, A.A. Krivolysky*. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAX Press, 2015. 270 p.
2. *Mareev E.A., Stasenko V.N., Bulatov A.A.* and others. Russian studies of atmospheric electricity in 2011–2014. *Izvestiya RAN*. 2016. Vol. 52. No. 2. Pp. 175–186
3. *Mareev E.A.* Achievements and prospects of global electric circuit research. *UFN*. 2010. Vol. 180. No. 5. Pp. 527–534.
4. *Williams E.R., Mareev E.A.* Recent progress on the global electrical circuit. *Atmos. Res.* 2014. Vol. 135–136. Pp. 208–227.
5. *Morozov V.N.* Atmospheric electricity. *Atmosphere. Handbook (reference data, models)*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. Pp. 394–408.
6. *Kupovykh G.V., Morozov V.N., Schwartz Ya.M.* Theory of the electrode effect in the atmosphere. Taganrog: Publishing house of TRTU, 1998. 123 p.
7. *Redin A.A., Kupovykh G.V., Boldyrev A.S.* Electrodynamic model of convective-turbulent surface layer of the atmosphere. *Izvestiya vuzov. Radiophysics*. 2013. Vol. 56. No. 11–12. Pp. 820–828.
8. *Sedov L.I.* Methods of similarity and dimension in mechanics. Moscow: Nauka, 1987. 423 p.
9. *Marchuk G.I.* Splitting methods. Moscow: Nauka, 1988. 263 p.
10. *Kupovykh G.V., Klovo A.G., Grivtsov V.V., Belousova O.V.* Modeling of electrodynamic structure of a non-turbulent surface layer. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2022. No. 3(227). Pp. 234–243.
11. *Belousova O.V., Kupov G.V., Klovo A.G., Grivtsov V.V.* Results of modeling the electrodynamic structure of a turbulent surface layer. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2022. No. 4(228). Pp. 245–253.
12. *Shuleikin V.N., Shchukin G.G., Kupovykh G.V.* Development of methods and means of applied geophysics — atmospheric-electrical monitoring of geological inhomogeneities and zones of geodynamic processes. St. Petersburg: Publishing House of RSMU, 2015. 206 p.