

УДК: 551.594

DOI: 10.26907/rwp29.2025.405-409

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛЬНОТУРБУЛЕНТНОГО ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ НЕЙТРАЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ И АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

О.В. Белоусова, Г.В. Куповых

Южный федеральный университет, 347928, г. Таганрог, Россия, пер. Некрасовский, 44

E-mail: obelousova@sfedu.ru, kupovykh@sfedu.ru

**Аннотация.** Представлена модель электрического состояния приземного слоя в приближении сильного турбулентного перемешивания в условиях нейтральной стратификации с учетом однократно заряженных аэрозольных частиц в атмосфере. Методами математического моделирования получены приближенные аналитические решения уравнений электродного эффекта. Построены профили концентраций полярных аэроионов, удельной электрической проводимости воздуха и напряженности электрического поля в различных метеорологических условиях. Расчеты удовлетворительно согласуются с известными результатами численного моделирования электродного эффекта в атмосфере и удобны для применения на практике.

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

## HIGHLY TURBULENT SURFACE LAYER ELECTRICAL STATE MODELING UNDER CONDITIONS OF NEUTRAL STRATIFICATION AND AEROSOL POLLUTION

O.V. Belousova, G.V. Kupovykh

**Annotation.** The surface layer electrical state model is presented in the approximation of strong turbulent mixing under conditions of neutral stratification, taking into account singly charged aerosol particles in the atmosphere. Approximate analytical solutions of the equations of the electrode effect have been obtained by mathematical modeling methods. The profiles of polar aeroion concentrations, specific electrical conductivity of air, and electric field strength under various meteorological conditions are constructed. The calculations are in satisfactory agreement with the known results of numerical simulation of the atmospheric electromagnetic effect, and are also convenient for practical application.

**Keywords:** surface layer, atmosphere, electrode effect, aeroions, conductivity, electric field, turbulence, aerosol, mathematical modeling.

### Введение

Электрические характеристики приземного слоя (ПС) атмосферы определяются действием электродного эффекта (ЭЭ). Параметры электродного слоя (ЭС) зависят от метеорологических условий, степени ионизации воздуха, естественного аэрозольного загрязнения воздуха и антропогенного воздействия и т. д. Отдельный интерес представляет приближение сильного турбулентного перемешивания, модель которого подробно описана в работах [1, 2], где также приведены результаты численного моделирования ЭЭ в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы. Для мониторинга электрического состояния атмосферы [3] представляет интерес оценка электрических характеристик ПС по аналитическим формулам, полученным с некоторыми допущениями из известных моделей ЭЭ методами математического моделирования.

### Моделирование электрической структуры сильнотурбулентного ПС

В приближении сильного турбулентного перемешивания, можно использовать метод расщепления уравнений ЭЭ по физическим процессам [2]. Тогда получаем систему двух уравнений, первое из них описывает распределение концентрации аэроионов по высоте (и, следовательно, удельной электрической проводимости  $\lambda$ ) под действием только турбулентной диффузии и вместе с граничными условиями имеет вид:

$$-\frac{d}{dz} \left( D_T(z) \frac{dn_{1,2}}{dz} \right) = q - \alpha n_1 n_2, \\ n_{1,2}(z \rightarrow z_0) = 0, \quad n_{1,2}(z \rightarrow L_1) = (q/\alpha) = n_\infty. \quad (1)$$

Решениями уравнения (1) являются профили концентрации полярных аэроионов ( $n_{1,2}$ ) по высоте ( $z$ ), формирующиеся под действием только турбулентной диффузии без учета электрического поля. В качестве параметров входят коэффициенты рекомбинации ( $\alpha$ ) и турбулентной диффузии аэроионов ( $D_T$ ), скорость ионизации воздуха ( $q$ ),  $L_1$  – верхняя граница (характерный масштаб) турбулентного ЭС,  $z_0$  – масштаб шероховатости поверхности.

Для учета однократно заряженных монодисперсных аэрозольных частиц постоянной концентрацией  $N$  введем в правую часть уравнения (1) член, описывающий взаимодействие аэроионов с аэрозолем в виде  $BN\eta_{1,2}$  [4,5]. Здесь  $B = \frac{2\eta_1\eta_2}{\eta_1 + 2\eta_2}$  – параметр, описывающий взаимодействия аэроионов с аэрозолем концентрацией  $N$ , а  $\eta_{1,2}$  – коэффициенты их воссоединения. В случае, когда  $N \geq \eta_{1,2}$ , рекомбинацией аэроионов можно пренебречь. Соответственно выражение (1) приобретает вид:

$$\begin{aligned} -\frac{d}{dz} \left( D_T(z) \cdot \frac{dn_{1,2}}{dz} \right) &= q - BN\eta_{1,2}N, \\ n_{1,2}(z \rightarrow z_0) &= 0, \quad n_{1,2}(z \rightarrow L_1) = \frac{q}{BN} = n_\infty \end{aligned} \quad (2)$$

Второе уравнение для напряженности ( $E$ ) электрического поля с учетом рассчитанного профиля удельной проводимости ( $\lambda$ ) на основании решения уравнения (2) с соответствующими граничными условиями, имеет вид:

$$\begin{aligned} -\epsilon_0 \cdot D_T(z) \frac{d^2 E}{dz^2} + \lambda E &= j_0, \quad \lambda(z) = e \cdot \eta_{1,2} \cdot (b_1 + b_2) \\ E(z = z_0) &= E_0, \quad E(z \rightarrow L_1) = E_{L_1} \end{aligned} \quad (3)$$

В уравнение (3) входят также элементарный заряд ( $e$ ) и электрическая постоянная ( $\epsilon_0$ ).

Рассмотрим случай нейтральной стратификации ПС: коэффициент турбулентной диффузии представим как  $D_T(z) = D_1 z$  [2]. При  $q = const$ , решением уравнения (2) является выражение:

$$n_{1,2}(z) = \frac{q}{BN} \begin{cases} e^{\frac{BN}{D_1}z} \left( \ln \frac{z}{L_1} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-2BNz)^i}{D_1^i \cdot i \cdot i!} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-2BNL_1)^i}{D_1^i \cdot i \cdot i!} \right) + 1 \\ e^{\frac{BN}{D_1}z_0} \left( \ln \frac{L_1}{z_0} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-2BNL_1)^i}{D_1^i \cdot i \cdot i!} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-2BNz_0)^i}{D_1^i \cdot i \cdot i!} \right) \end{cases}, \quad L_1 = \frac{D_1 \epsilon_0}{\lambda_\infty}. \quad (4)$$

Оценка членов ряда выявила, что достаточно первого приближения, так как последующие не вносят существенного влияния в результат. Тогда при  $i = 1$  выражение (4) приобретает вид:

$$n_{1,2}(z) = \frac{q}{BN} \begin{cases} e^{\frac{BN}{D_1}z} \left( \ln \frac{z}{L_1} + \frac{2BN}{D_1} (L_1 - z) \right) + 1 \\ e^{\frac{BN}{D_1}z_0} \left( \ln \frac{L_1}{z_0} + \frac{2BN}{D_1} (z_0 - L_1) \right) \end{cases}. \quad (5)$$

С учетом сделанных ранее физических допущений уравнение (3) имеет решение в виде:

$$E(z) = \frac{(E_0 - E_{L_1})(e^{az+L_1} - e^{a(2z_0+L_1-z)})}{e^{2az_0} - e^{2aL_1}} + \frac{(E_0 \lambda - j_0)(e^{az} + e^{a(z_0+L_1-z)})}{\lambda(e^{az_0} + e^{aL_1})} + \frac{j_0}{\lambda}, \quad (6)$$

где  $E_{L_1} = j_0 / \lambda_\infty$ , где  $\lambda_\infty$  - значение удельной электрической проводимости на верхней границе  $L_1$  турбулентного ЭС.

Параметры моделирования задавались следующими: ( $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $b_{1,2} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $j_0 \sim 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ ,  $z_0 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ). Характерные пространственные масштабы для случаев с  $D_1 = 0,1 \text{ м с}^{-1}$ ,  $D_1 = 0,15 \text{ м с}^{-1}$  и  $D_1 = 0,2 \text{ м с}^{-1}$  равны  $L_1 = 23,5 \text{ м}$ ,  $L_1 = 35,3 \text{ м}$  и  $L_1 = 47,1 \text{ м}$ , соответственно, при  $N = 7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$  (рис. 1-3) и равны  $L_1 = 33,6 \text{ м}$ ,  $L_1 = 50,4 \text{ м}$  и  $L_1 = 67,2 \text{ м}$ , соответственно, при  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$  (рис. 4-6). Таким образом, увеличение коэффициента турбулентной диффузии, а также увеличение концентрации аэрозоля увеличивает масштаб распределения параметров ЭС.

Некоторые результаты моделирования электрических характеристик ПС в приближении сильного турбулентного перемешивания представлены на рис. 1-6.

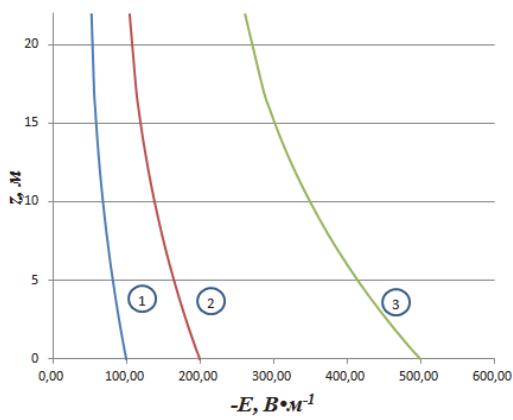


Рис 1. Напряженность электрического поля при  $D_1 = 0,1 \text{ м с}^{-1}$ ,  $N = 7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$   
(1)  $E_0 = -100 \text{ В/м}$ ; (2)  $E_0 = -200 \text{ В/м}$ ; (3)  
 $E_0 = -500 \text{ В/м}$

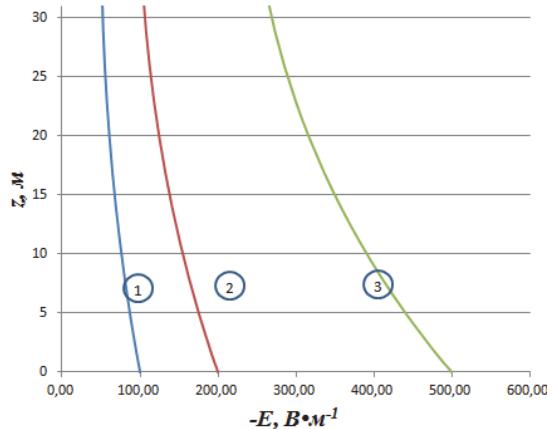


Рис. 2. Напряженность электрического поля при  $D_1 = 0,15 \text{ м с}^{-1}$ ,  $N = 7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$   
(1)  $E_0 = -100 \text{ В/м}$ ; (2)  $E_0 = -200 \text{ В/м}$ ; (3)  
 $E_0 = -500 \text{ В/м}$

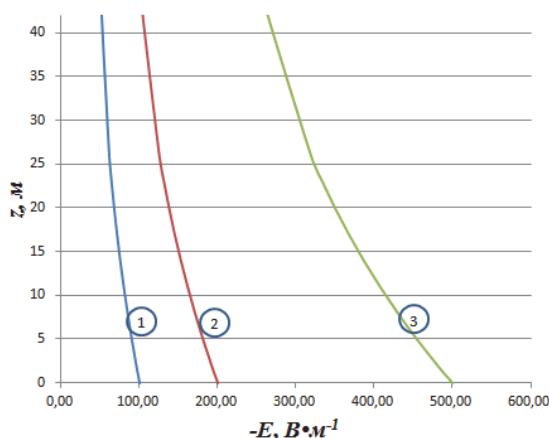


Рис. 3. Напряженность электрического поля при  $D_1 = 0,2 \text{ м с}^{-1}$ ,  $N = 7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$   
(1)  $E_0 = -100 \text{ В/м}$ ; (2)  $E_0 = -200 \text{ В/м}$ ; (3)  
 $E_0 = -500 \text{ В/м}$

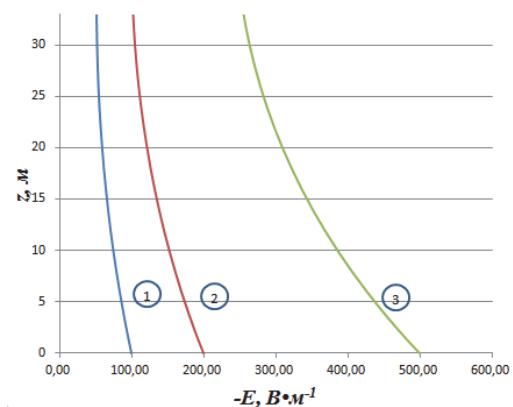


Рис. 4. Напряженность электрического поля при  $D_1 = 0,1 \text{ м с}^{-1}$ ,  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$   
(1)  $E_0 = -100 \text{ В/м}$ ; (2)  $E_0 = -200 \text{ В/м}$ ; (3)  
 $E_0 = -500 \text{ В/м}$

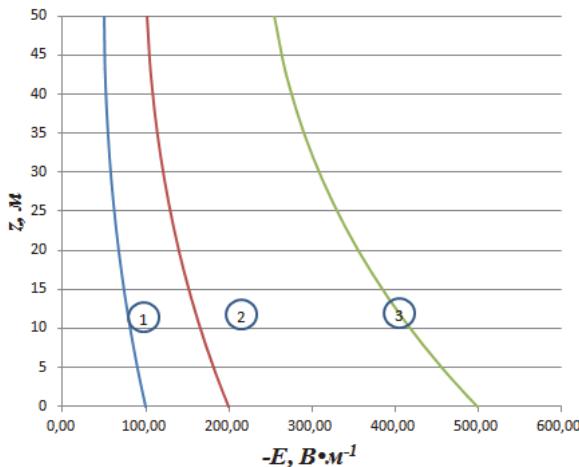


Рис. 5. Напряженность электрического поля при  $D_1 = 0,15 \text{ м} \text{с}^{-1}$ ,  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$

(1)  $E_0 = -100 \text{ B/m}$ ; (2)  $E_0 = -200 \text{ B/m}$ ; (3)  
 $E_0 = -500 \text{ B/m}$

В результате моделирования электрической структуры ПС в условиях нейтральной стратификации и аэрозольного загрязнения атмосферы получено, что значения параметра  $E(z)/E_\infty$  на высотах 1-10 м увеличиваются на  $\approx 6\%$  при увеличении  $D$  от значения  $0,1 \text{ м} \text{с}^{-1}$  до  $0,15 \text{ м} \text{с}^{-1}$  и на  $\approx 9\%$  при увеличении  $D$  до значения  $0,2 \text{ м} \text{с}^{-1}$ . При изменении значений  $E_0$  от  $-100 \text{ B/m}$  до  $-200 \text{ B/m}$  параметр  $E(z)/E_\infty$  на высотах 1-10 м увеличивается на  $\approx 1\%$ , а при увеличении до  $E_0 = -500 \text{ B/m}$  на  $\approx 2\%$ . Значения параметра  $E(z)/E_\infty$  при увеличении концентрации с  $N = 7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$  до  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$  аэрозоля увеличиваются на  $\approx 4\%$ . При этом с увеличением высоты с 1 до 5 м значения параметра  $E(z)/E_\infty$  уменьшаются на  $\approx 9\%$ , а при изменении высоты с 1 до 10 м  $E(z)/E_\infty$  уменьшается в среднем на 19%.

Значения параметра  $E(z)/E_\infty$  на высотах 1, 5 и 10 метров в различных условиях представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения параметра  $E/E_\infty$

	$E(z)/E_\infty$								
	$E_0 = -100 \text{ B/m}$			$E_0 = -200 \text{ B/m}$			$E_0 = -500 \text{ B/m}$		
	1м	5м	10м	1м	5м	10м	1м	5м	10м
$D_1 = 0,1 \text{ м} \text{с}^{-1}$ $N = 7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$	1,89	1,61	1,34	1,90	1,63	1,37	1,90	1,64	1,38
$D_1 = 0,15 \text{ м} \text{с}^{-1}$ $N = 7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$	1,92	1,72	1,51	1,93	1,73	1,53	1,92	1,74	1,54
$D_1 = 0,2 \text{ м} \text{с}^{-1}$ $N = 7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$	1,93	1,78	1,61	1,94	1,79	1,63	1,93	1,80	1,64
$D_1 = 0,1 \text{ м} \text{с}^{-1}$ $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$	1,91	1,69	1,46	1,92	1,72	1,50	1,92	1,73	1,52
$D_1 = 0,15 \text{ м} \text{с}^{-1}$ $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$	1,93	1,78	1,61	1,94	1,80	1,64	1,94	1,81	1,65
$D_1 = 0,2 \text{ м} \text{с}^{-1}$ $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$	1,94	1,83	1,69	1,95	1,84	1,72	1,95	1,85	1,73

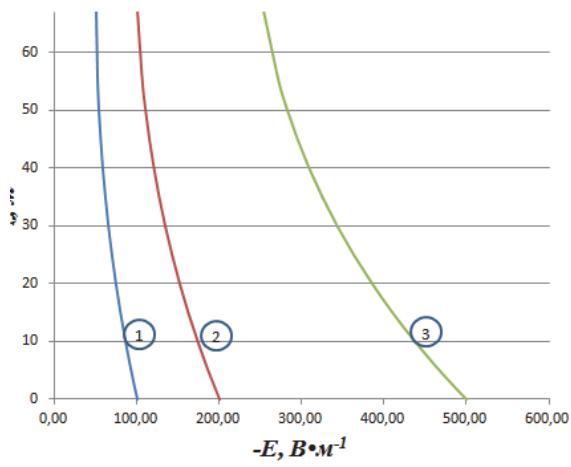


Рис. 6. Напряженность электрического поля при  $D_1 = 0,2 \text{ м} \text{с}^{-1}$ ,  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$

(1)  $E_0 = -100 \text{ B/m}$ ; (2)  $E_0 = -200 \text{ B/m}$ ; (3)  
 $E_0 = -500 \text{ B/m}$

### **Заключение**

Приближенные аналитические решения, которые были получены для математической модели электрических характеристик ПС в условии сильного турбулентного перемешивания при нейтральной стратификации атмосферы и ее аэрозольном загрязнении, описывают количественное распределение по высоте аэроинов, удельной электрической проводимости воздуха и напряженности электрического поля в различных метеорологических условиях. Результаты проведенного математического моделирования хорошо согласуются с теорией ЭЭ в атмосфере и выполненными ранее численными расчетами. Полученные аналитические выражения могут быть качественным и полезным инструментом для решения прикладных задач наземных атмосферно-электрических наблюдений.

### **Список литературы**

1. Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л. : Гидрометеоиздат, 1991. – С. 394–408.
2. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.
3. 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.: РГГМУ, 2015. – 206 с.
4. Редин А.А., Куповых Г.В., Клово А.Г., Болдырев А.С. Математическое моделирование электродинамических процессов в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы // Известия ЮФУ. Технические науки. – № 8. – 2011. – С. 111–121.
5. 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.