

Раздел II. Анализ данных и моделирование

УДК 551.51, 551.554

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-115-125

О.В. Белоусова

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Представлен сравнительный анализ результатов численного и аналитического моделирования электродного эффекта в атмосфере, а также экспериментальных исследований электродинамических процессов, проходящих в приземном слое. Для анализа использованы несколько электрических характеристик приземного слоя в атмосфере, а именно значения параметров электродного эффекта, определяемых числом положительных и отрицательных аэроионов, на различных высотах от поверхности земли. Исследования проведены для различных моделей при различных метеорологических условиях в приближениях классического (нетурбулентного) и турбулентного электродного эффекта, как в чистой атмосфере, так и с учетом аэрозольного загрязнения воздуха. Выявлена закономерность независимости значения электродного эффекта в целом (усиление электрического поля у поверхности по сравнению с верхней границей образующегося электродного слоя) от атмосферных условий при различных методах математического и численного моделирования. Установлено, что высота электродного слоя и, соответственно, масштаб распределения электрических характеристик меняются в значительной степени при действии на приповерхностный слой атмосферы различных факторов, таких как ионизация и аэрозольное загрязнение воздуха, наличие и интенсивность турбулентного и конвективного переносов. Проведена верификация приближенных аналитических моделей путем установления соответствия между результатами численного моделирования, теоретических расчетов и экспериментальных исследований, полученным ранее. Данные теоретических и численных расчетов различными способами хорошо согласуются между собой и с результатами экспериментальных атмосферно-электрических наблюдений. Сделаны выводы о возможности использования приближенных аналитических выражений, полученных методами математического моделирования, для описания электродинамической структуры нижнего слоя атмосферы.

Математическое моделирование; приземный слой; атмосфера; электродный эффект; электрическое поле; аэроионы, аэрозоль.

O.V. Belousova

SURFACE LAYER ELECTRICITY RESEARCH: MODELING AND EXPERIMENT

The article presents a comparative analysis of the numerical and analytical modeling results of the electrode effect in the atmosphere, as well as experimental studies of electrodynamic processes taking place in the surface layer. For the analysis, several electrical characteristics of the surface layer in the atmosphere were used, namely, the values of the parameters of the electrode effect determined by the number of positive and negative aeroions at different altitudes from the earth's surface. Studies have been carried out for various models under various meteorological conditions in approximations of the classical (non-turbulent) and turbulent electrode effect, both in a clean atmosphere and taking into account aerosol air pollution. The independence regularity of the electrode effect value as a whole (the amplification of the electric field at the surface com-

pared with the upper boundary of the formed electrode layer) from atmospheric conditions with various methods of mathematical and numerical modeling is revealed. It is established that the height of the electrode layer and, accordingly, the scale of the electrical characteristics distribution change significantly when various factors, such as ionization and aerosol air pollution, the presence and intensity of turbulent and convective transport, act on the near-surface layer of the atmosphere. The verification of approximate analytical models was carried out by establishing the correspondence between the results of numerical modeling, theoretical calculations and experimental studies obtained earlier. The data of theoretical and numerical calculations in various ways are in good agreement with each other and with the results of experimental atmospheric-electrical observations. Conclusions are drawn about the possibility of using approximate analytical expressions obtained by mathematical modeling methods to describe the electrodynamic structure of the atmospheric lower layer.

Mathematical modeling; surface layer; atmosphere; electrode effect; electric field; aeroions; aerosol.

Введение. Электродинамическими характеристики атмосферы у поверхности земли тесно связаны с метеоявлениями. Установление связей между электрическими величинами и метеопараметрами необходимо и достаточно для решения многих прикладных проблем, в частности для корректной интерпретации данных оперативного и долгосрочного атмосферно-электрического мониторинга [1, 2].

Как известно, электрические процессы в нижней части атмосферы обусловлены влиянием электродного эффекта в слое высотой от одного до десятков метров у земли, под которым понимается большая совокупность физических факторов и метеорологических процессов [3].

Данные измерений электрических параметров в приземном слое малочисленны. Это связано, прежде всего, со сложными методиками проведения градиентных измерений метеорологических и электрических величин, а также с проблемой искажения результатов измерений за счет влияния приборов-измерителей.

Численные модели и результаты расчетов электродного эффекта описаны в достаточно большом числе работ, результаты которых обобщены и приведены в монографии [3]. В работах [4–8] при обоснованных физических опущениях методами математического моделирования получены аналитические выражения для расчетов электрических характеристик приземного слоя в приближении электродного эффекта.

Цель работы – сравнительный анализ результатов численных и аналитических расчетов по различным моделям приземного слоя в приближении электродного эффекта, а также их верификация на основе экспериментальных данных.

Классический электродный слой. При отсутствии аэрозольных частиц система электродинамических уравнений в приближении классического электродного эффекта [4] записывается как

$$\begin{aligned} \pm \frac{d}{dz} (b_{1,2} n_{1,2} E) &= q - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{dE}{dz} &= \frac{e}{\varepsilon_0} (n_1 - n_2), \end{aligned} \quad (1)$$

при заданных граничных условиях в виде:

$$n_2(z=0), \quad n_{1,2}(\infty) = (q(\infty) / \alpha)^{1/2}, \quad E(z=0) = E_0, \quad (2)$$

где $n_{1,2}$ – концентрации полярных аэроионов, $b_{1,2}$ – параметры подвижности, α – рекомбинационный параметр, E – напряженность электрического поля, q – параметр ионизации воздуха, e – модуль заряда электрона, ε_0 – диэлектриче-

ская проницаемость вакуума, z – вертикальная координата от поверхности земли, индексом « ∞ » здесь и далее обозначены значения величин на верхней границе рассматриваемого электродного слоя.

Результаты численного моделирования классического электродного эффекта приведены в работах [3, 9]. В работе [4] получены приближенные аналитические решения в виде выражений для расчета распределений по высоте значений удельного числа отрицательных аэроионов и напряженности электрического поля:

$$n_2(z) = \frac{q}{\alpha n_1} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha n_1 z}{b_2 E_0}\right) \right). \quad (3)$$

$$E(z) = j / \lambda(z), \quad (4)$$

здесь $j = \lambda(\infty) \cdot E$ – плотность электрического тока, а значения проводимости воздуха $\lambda(z)$ на соответствующей высоте рассчитываются как:

$$\lambda(z) = e(b_1 n_1(z) + b_2 n_2(z)), \quad (5)$$

Для сравнительного анализа результатов модельных расчетов использованы значения параметров: $q = 4,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $b_{1,2} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

В результате получены распределения $n_{1,2}(z)$ и $E(z)$ при модульных значениях $E_0(z=0) = (100 - 500) \text{ В/м}$.

Анализ решений показывает, что высота классического электродного слоя растет с увеличением значений E_0 . При этом значения n_1 у поверхности земли уменьшаются, а параметр E_0 / E_∞ с ростом E_0 практически не изменяется.

В табл. 1 приведены значения параметров классического электродного слоя для различных условий на высотах 1 и 2 метра, где стандартно рекомендуется устанавливать измерительную аппаратуру. Как видно, данные вычислительных экспериментов [3, 9] и аналитических расчётов достаточно хорошо согласуются между собой. Изменения значений параметра n_1 / n_∞ при увеличении начальных значений E_0 находятся в пределах 5%. Изменения параметра n_2 / n_∞ – гораздо больше и достигают примерно 80% на рассматриваемых высотах. Параметр $E(z) / E_\infty$ с ростом начальных значений электрического поля увеличивается примерно на 40%, но затем это нивелируется с высотой.

Таблица 1

Значения параметров классического электродного слоя (ВЭ – вычислительный эксперимент, АР – аналитические расчёты)

Параметры	ВЭ	ВЭ	ВЭ
	АР	АР	АР
$E_0 (\text{В} \cdot \text{м}^{-1})$	-100	-200	-500
$n_1/n_\infty, z=1$	0,95	0,92	0,9
	1	1	1
$n_2/n_\infty, z=1$	0,37	0,17	0,06
	0,38	0,24	0,09

Окончание табл. 1

$E/E_{\infty, z=1}$	1,58	1,95	2,26
	1,43	1,63	1,83
$n_1/n_{\infty, z=2}$	0,97	0,94	0,9
	1	1	1
$n_2/n_{\infty, z=2}$	0,69	0,33	0,18
	0,62	0,38	0,19
$E/E_{\infty, z=2}$	1,21	1,65	2,11
	1,24	1,45	1,7
E_0/E_{∞}	2,22	2,33	2,43
	2	2	2

Экспериментальные профили $E(z)$ над морской поверхностью [10], в условиях устойчивой стратификации и свободной от аэрозоля атмосферы хорошо согласуются с модельными расчетами параметров классического электродного слоя, выполненными, как численными методами [9, 11], так по формулам, полученным методами математического моделирования [3]. В работе [4] приведены средние значения электрических параметров на высоте 1,5 метра: $\lambda_+ = 1,64 \cdot 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и $\lambda_- = 0,16 \cdot 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ при стандартном значении $E = -100 \text{ В/м}$ при небольшом загрязнении воздуха ($N = 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$). В работе [12] при скорости ветра менее $0,5 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ средние значения соответственно равны $\lambda_+ = 3,3 \cdot 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а значения λ_- равны $0,75 \cdot 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ на поверхности и $1,3 \cdot 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ на высоте 1,8 м. Параметр униполярности равен $n_1/n_2 = 2,75$. По модельным расчетам работы [9] это отношение равно 1,55. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов можно объяснить тем, что при измерениях не учитывалось искажение датчиками значений электрического поля. В сильном электрическом поле ($E = -400 \text{ В/м}$) в незагрязнённой атмосфере электрическая проводимость λ остается практически постоянной, а значения ее компонент меняется при увеличении расстояния от поверхности: λ_+ – убывает, λ_- – возрастает [13]. Объемный электрический заряд в электродном слое при этом остается положительным. Здесь также указана проблема влияния датчиков на измеренные значения E и λ .

Турбулентный электродный слой. Уравнения электродинамической модели приземного слоя атмосферы в приближении турбулентного электродного эффекта [3] записываются как:

$$\pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} \cdot n_{1,2} E) - \frac{\partial}{\partial z} (D_T(z) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z}) = q(z) - \alpha n_1 n_2, \quad (6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_1 - n_2)$$

Дополнительные условия на границах электродного слоя задаются как:

$$n_{1,2}(z = z_0) = 0, \quad n_{1,2}(z \rightarrow \infty) = \sqrt{q_{\infty}/\alpha}, \quad (7)$$

где $D_T = D_1 \cdot z$ – коэффициент турбулентной диффузии аэроионов, z_0 – параметр шероховатости земной поверхности.

Результаты численного моделирования турбулентного электродного эффекта приведены в работах [3, 15, 16]. В работе [5] в предположении $D_T = D_0 = const$ получены приближенные аналитические решения в виде выражений для расчета профилей аэроионов:

$$\begin{aligned} n_1(z) &= \frac{q}{\alpha n_\infty} (1 - e^{k_{12}(z-z_0)}), \quad k_{12} = \frac{b_1 E_0 - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_1 E_0)^2}}{2D_0}, \\ n_2(z) &= \frac{q}{\alpha n_\infty} (1 - e^{k_{22}(z-z_0)}), \quad k_{22} = \frac{-b_2 E_0 - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_2 E_0)^2}}{2D_0}. \end{aligned} \quad (8)$$

Используя закон Ома, значение полного тока j_0 в этой постановке задачи можно рассчитать на верхней границе вне электродного слоя:

$$j_0 = \lambda_\infty \cdot E_0, \quad \lambda_\infty = e(b_1 n_1(\infty) + b_2 n_2(\infty)), \quad (9)$$

где $n_{1,2}(\infty) = (q/\alpha)^{1/2}$ – асимптотические значения.

Предположив постоянным значение λ , уравнение для E с граничными условиями представлено как:

$$\begin{aligned} -\varepsilon_0 D_0 \frac{d^2 E}{dz^2} + \lambda E &= j_0, \\ E(z = z_0) &= E_0, \quad E(z \rightarrow \infty) = E_\infty. \end{aligned} \quad (10)$$

Откуда получен профиль напряжённости $E(z)$ электрического поля:

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

При наличии в атмосфере аэрозольных частиц концентрацией $N \gg n_{1,2}$ в правую часть первого уравнения в системе (6) вместо последнего слагаемого добавлен член $BNn_{1,2}$, отвечающий взаимодействию аэроионов с аэрозолем. Параметр $B = \frac{2\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + 2\eta_2}$ зависит от коэффициентов воссоединения аэроионов ($\eta_{1,2}$) с аэрозольными частицами. Соответственно изменено второе граничное условие:

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

Решением модельных уравнений в этом случае являются профили $n_{1,2}$:

$$\begin{aligned} n_1(z) &= \frac{q}{BN} (1 - e^{k_{11}(z-z_0)}), \quad k_{11} = \frac{b_1 E_0 - \sqrt{4D_0 BN + (b_1 E_0)^2}}{2D_0}, \\ n_2(z) &= \frac{q}{BN} (1 - e^{k_{21}(z-z_0)}), \quad k_{21} = \frac{-b_2 E_0 - \sqrt{4D_0 BN + (b_2 E_0)^2}}{2D_0}. \end{aligned} \quad (12)$$

Расчет профиля $E(z)$ осуществлялся по формуле (11) с учетом изменённых за счет аэрозольных частиц в атмосфере значений λ и λ_∞ , а, следовательно, и j_0 .

Для сравнения численных и аналитических моделей задавались следующие параметры: $D_1 = D_0$ от $0,01 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ до $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $v = 0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $E_0 = -100 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, $q_0 = 4,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{с}^{-1}$, N от 10^{10} м^{-3} до 10^{11} м^{-3} .

Значения параметров электродного эффекта для высот 0,5, 1 и 2 метров представлены в табл. 2. Как следует из представленных данных вычислительный эксперимент и аналитические расчёты качественно совпадают, а количественные различия объясняются более подробным учетом функциональных зависимостей параметров модели при численных расчетах [3, 15].

При проведении сравнительного анализа данных из табл. 1 и 2 установлено, что для случая интенсивного турбулентного переноса (при $D_1 = 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) увеличение аэрозольного загрязнения атмосферы приводит к уменьшению значений электродного эффекта по всем слое более, чем на 20 %, что на 5 % больше, чем при слабом турбулентном перемешивании (при $D_1 = 0,01 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$). При этом необходимо отметить, что значения параметров электродного эффекта при малых значениях D_1 , мало отличаются от значений при наблюдении нетурбулентного электродного эффекта.

Таблица 2

Значения параметров турбулентного электродного слоя в чистой атмосфере и при разных концентрациях аэрозоля

Параметры	$D_1 = 0,01 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$			$D_1 = 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$		
	N, м ³					
	0	10^{10}	10^{11}	0	10^{10}	10^{11}
Тип модели	ВЭ	ВЭ	ВЭ	ВЭ	ВЭ	ВЭ
	АП	АП	АП	АП	АП	АП
$n_1(0,5)/n_1(\infty)$	-	1,08	1,18	-	0,77	1,04
	-	0,75	0,87	-	0,20	0,44
$n_1(1)/n_1(\infty)$	1,00	1,03	1,06	0,78	0,85	1,04
	0,76	0,80	0,94	0,24	0,35	0,68
$n_1(2)/n_1(\infty)$	1,00	1,00	1,01	0,83	0,91	1,01
	0,95	1,00	1,00	0,38	0,58	0,90
$n_2(0,5)/n_2(\infty)$	-	0,71	1,20	-	0,62	0,99
	-	0,25	0,75	-	0,13	0,40
$n_2(1)/n_2(\infty)$	0,64	0,87	1,086	0,62	0,74	1,02
	0,19	0,50	0,94	0,14	0,25	0,64
$n_2(2)/n_2(\infty)$	0,8	0,96	1,01	0,73	0,83	1,01
	0,38	0,75	0,99	0,24	0,43	0,89
E_0/E_∞	-	1,77	1,12	-	1,57	1,07
	-	1,97	1,97	-	1,95	1,80
$E/E_\infty(0,5)$	-	1,62	1,11	-	1,55	1,07
	-	1,58	1,57	-	1,81	1,66
$E/E_\infty(1)$	1,84	1,53	1,10	2,12	1,52	1,06
	1,45	1,34	1,33	1,87	1,68	1,55
$E/E_\infty(2)$	1,59	1,41	1,09	1,99	1,49	1,06
	1,18	1,13	1,11	1,64	1,48	1,37

Конвективно-турбулентный электродный слой. При моделировании турбулентно-конвективного электродного слоя, в атмосфере с количеством аэрозольных частиц, которым можно пренебречь, также будем использовать указанные выше допущения. Система уравнений в чистой атмосфере с соответствующими граничными условиями имеет вид [6]:

$$\begin{aligned} (\nu \pm b_{1,2})E_0 \frac{dn_{1,2}}{dz} - D_0 \frac{d^2 n_{1,2}}{dz^2} &= q - \alpha n_\infty n_{1,2}, \\ n_{1,2}(z = z_0) &= 0, \quad n_{1,2}(z = z_\infty) = \sqrt{q_\infty / \alpha} = n_\infty, \end{aligned} \quad (13)$$

В работе [6] решения системы (13) получены в виде:

$$\begin{aligned} n_1(z) &= \frac{q}{\alpha n_\infty} \left(1 - e^{k_{12}(z-z_0)}\right), \quad k_{12} = \frac{(b_1 E_0 + \nu) - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_1 E_0 + \nu)^2}}{2D_0} \\ n_2(z) &= \frac{q}{\alpha n_\infty} \left(1 - e^{k_{22}(z-z_0)}\right), \quad k_{22} = \frac{-(b_2 E_0 - \nu) - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_2 E_0 - \nu)^2}}{2D_0}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для расчёта $E(z)$ использовалось уравнение для j_0 с граничными условиями в виде:

$$\begin{aligned} -\varepsilon_0 D_T(z) \frac{d^2 E}{dz^2} + \varepsilon_0 \nu \frac{dE}{dz} + \lambda E &= j_0, \\ E(z = z_0) &= E_0, \quad E(z \rightarrow \infty) = E_\infty. \end{aligned} \quad (15)$$

Откуда получен профиль электрического поля [6]:

$$E(z) = (E_0 - E_\infty) \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon_0 \nu - \sqrt{(\varepsilon_0 \nu)^2 + 4\lambda \varepsilon_0 D_0}}{2\varepsilon_0 D_0} (z - z_0)\right) + E_\infty. \quad (16)$$

При рассмотрении модели турбулентно-конвективного электродного слоя с учетом наличия в нем аэрозоля при условии, что $N \gg n_{1,2}$ в правую часть модельного уравнения в системе (13) так же, как и в системе (6), вместо последнего слагаемого добавляется член $BNn_{1,2}$, который описывает взаимодействие аэрионов с аэрозолем. Решениями полученной системы уравнений, являются выражения [6]:

$$\begin{aligned} n_1(z) &= \frac{q}{BN} \left(1 - e^{m_{12}(z-z_0)}\right), \quad m_{12} = \frac{(b_1 E_0 + \nu) - \sqrt{4D_0 BN + (b_1 E_0 + \nu)^2}}{2D_0}, \\ n_2(z) &= \frac{q}{BN} \left(1 - e^{m_{22}(z-z_0)}\right), \quad m_{22} = \frac{-(b_2 E_0 - \nu) - \sqrt{4D_0 BN + (b_2 E_0 - \nu)^2}}{2D_0}. \end{aligned} \quad (17)$$

Распределение $E(z)$ рассчитывается, как и для случая в отсутствии аэрозоля, с помощью выражения (16).

Для моделирования структуры турбулентно-конвективного электродного слоя заданы следующие значения параметров модели: $D_1 = D_0 = 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, υ от $-0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ до $0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $E_0 = -100 \text{ В/м}$, $q_0 = 4,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, N от 10^{10} м^{-3} до 10^{11} м^{-3} ,

Результаты модельных расчетов представлены в табл. 3, из которой следует удовлетворительное совпадение результатов вычислительного эксперимента [14] и аналитических расчётов. В случае, когда конвективный член отрицателен ($\upsilon = -0,2 \text{ мс}^{-1}$), т.е., направлен вниз, происходит уменьшение характерного масштаба распределения электродинамических характеристик. Из анализа данных расчетов видно, что величина E_0/E_∞ во всем слое, как и его высота уменьшается более чем на 10%.

Таблица 3

Значения параметров конвективно-турбулентного электродного слоя

Параметры	$\upsilon = -0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$			$\upsilon = 0,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$		
	N, м ⁻³					
	0	10 ¹⁰	10 ¹¹	0	10 ¹⁰	10 ¹¹
Тип модели	ВЭ	ВЭ	ВЭ	ВЭ	ВЭ	ВЭ
	АР	АР	АР	АР	АР	АР
$n_1(0,5)/n_1(\infty)$	0,77	0,82	1,07	0,56	0,71	1,02
	0,64	0,67	0,73	0,01	0,06	0,23
$n_1(1)/n_1(\infty)$	0,88	0,91	1,07	0,64	0,79	1,02
	0,88	0,89	0,93	0,17	0,12	0,40
$n_1(2)/n_1(\infty)$	0,97	0,98	1,04	0,71	0,85	1,00
	1,00	0,99	1,00	0,29	0,27	0,65
$n_2(0,5)/n_2(\infty)$	0,58	0,67	1,02	0,41	0,58	0,97
	0,77	0,62	0,70	0,01	0,03	0,20
$n_2(1)/n_2(\infty)$	0,71	0,79	1,05	0,50	0,69	1,00
	0,88	0,85	0,90	0,02	0,05	0,37
$n_2(2)/n_2(\infty)$	0,84	0,90	1,04	0,60	0,78	0,99
	1,00	0,98	1,00	0,03	0,10	0,60
E_0/E_∞	1,83	1,60	1,10	2,26	1,52	1,06
	1,82	1,95	1,98	1,95	1,47	1,05
$E/E_\infty(0,5)$	1,75	1,56	1,10	2,19	1,51	1,06
	1,30	1,34	1,36	1,93	1,47	1,05
$E/E_\infty(1)$	1,69	1,55	1,09	2,14	1,49	1,05
	1,11	1,11	1,13	1,92	1,47	1,04
$E/E_\infty(2)$	1,6	1,50	1,09	2,04	1,46	1,04
	1,01	1,01	1,02	1,89	1,46	1,04

Рассмотрим экспериментальные данные исследований электродного эффекта при различной степени устойчивости атмосферы, проведенных в работах [4] и [12]. Установлено, что параметр униполярности уменьшается с увеличением скорости ветра. При большой степени турбулентного перемешивания значения параметров λ_+ и λ_- становятся близки. Это полностью совпадает с теоретическими результатами, полученными в работах [3, 5, 9, 15, 16]. В работе [17] были проведе-

ны результаты измерений на высоте 1 м над океанической поверхностью. При значениях $E_0 = -150 \text{ В/м}$, коэффициента турбулентности $0,08 \text{ м}^2/\text{с}$ и концентрации аэрозольных частиц в пределах $(2-4) \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$, средние значения электрических параметров составили: $n_1/n_\infty = 0,86$, $n_2/n_\infty = 0,50$, $n_1/n_2 = 0,78$. Модельные расчеты турбулентного электродного слоя [3] дают значения $n_1/n_\infty = 0,94$, $n_2/n_\infty = 0,51$, $n_1/n_2 = 1,85$. Если учесть наличие небольших концентраций аэрозольных частиц в эксперименте, которые, согласно модельным представлениям, уменьшают значения $n_{1,2}/n_\infty$, то совпадение теоретических и экспериментальных результатов можно считать вполне удовлетворительными.

В работе [18] измерялись число аэроионов в чистой атмосфере на высоте ~ 1 м и, в результате, получено, что при сильных электрических полях более -500 В/м (но не приводящих к коронному разряду) их удельные концентрации уменьшаются. В теории это объясняется тем, что в сильном электрическом поле классический электродный эффект может преобладать над влиянием турбулентного переноса [3]. В работе [19] получено, что в слабом электрическом поле (менее -100 В/м) n_+ и n_- уменьшаются с высотой в метровом слое, и этот эффект более резко выражен в ночные часы. Это связано с уменьшением количества радиоактивных эманаций из почвы.

Для решения проблемы постоянства суммарной проводимости с высотой в работе [20] был повторен эксперимент [18] в условиях близких к условиям [19]. При средних значениях $E = -115 \text{ В/м}$ и суммарной проводимости $\lambda = 1,1 \cdot 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ результаты хорошо согласуются с измерениями [18]: параметры n_1 и n_2 и параметр униполярности уменьшаются до высоты ≈ 1 м, а последний также уменьшается при усилении ветра.

Заключение. Сравнительный анализ расчетных данных позволяет сделать выводы об обоснованности и пригодности применения методик получения приближенных аналитических выражений методами математического моделирования в различных метеорологических и физических условиях. Это обусловлено корректностью сделанных допущений на основании физических соображений, которая подтверждается хорошей степенью соответствия полученных приближенных аналитических и численных решений реальным электрическим процессами, протекающим в приземном слое атмосферы.

Степень согласия результатов численного моделирования и приближенных аналитических расчетов, а также их соответствие экспериментальным данным говорят о возможности использования полученных формул на практике, в том числе для оценок результатов атмосферно-электрического мониторинга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г., Куповых Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики - атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов: монография. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2015. – 206 с.
2. Куповых Г.В., Тимошенко Д.В., Клово А.Г., Кудринская Т.В. Влияние электродного эффекта на суточные вариации электрического поля атмосферы в приземном слое // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 36, № 10. – С. 834-838.
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., 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.

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.
6. Куповых Г.В., Белоусова О.В., Тимошенко Д.В., Клово А.Г., Кудринская Т.В. Электродинамическая модель турбулентно-конвективного приземного слоя: приближенные аналитические решения // Матер. IX Всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2023. – С. 488-496.
7. Куповых Г.В., Белоусова О.В., Клово А.Г. Приближенные аналитические решения уравнений электродного эффекта в атмосфере // Сб. докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции (Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года). Электронное издание. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. – С. 544-548.
8. Белоусова О.В., Тимошенко Д.В., Куповых Г.В. Математическое моделирование электрической структуры турбулентно-конвективного приземного слоя // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2023. – № 3 (51). – С. 12-19.
9. Hoppel W.A. Theory of the electrode effect // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1967. – Vol. 29, No. 6. – P. 709-721.
10. Crozier W.D. Atmospheric electrical profiles below three meters // Journal of Geophysical Research. – 1965. – Vol. 70. – P. 2785-2792.
11. Muhleisen R. Electrode effect measurements above the sea // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1961. – Vol. 20. – P. 79-81.
12. Pluvinage P., Stahl P. La conductibilité électrique de l'air sur l'inlandsis Groenlandais // Annales de Géophysique. – 1953. – Vol. 9. – P. 34-43.
13. Ruhnke L.H. Electrical conductivity of air on the Greenland ice cap // Journal of Geophysical Research. – 1962. – Vol. 67. – P. 2767-2772.
14. Болдырев А.С., Редин А.А., Куповых Г.В., Морозов В.Н. Электродинамическая модель конвективно-неустойчивого атмосферного приземного слоя // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Спецвыпуск. Физика атмосферы. – 2010. – С. 23-28.
15. Hoppel W.A. Electrode effect: comparison of the theory and measurement // In: Planetary Electrodynamics, 2 / S.C. Coroniti and J. Hughes; ed. – Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1969. – P. 167-181.
16. Willet J.C. An analysis of the electrode effect in the limit of strong turbulent mixing // Journal of Geophysical Research. – 1978. – Vol. 83. – P. 402-408.
17. Hoppel W.A., Gathman S.G. Experimental determination of the eddy diffusion coefficient over the open ocean from atmospheric electrical measurements // Journal of Physical Oceanography. – 1972. – Vol. 2. – P. 248-254.
18. Adkins C.J. The small ion concentration and space charge near the ground // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1959. – Vol. 85. – P. 237-252.
19. Law J. The ionization of the atmosphere near the ground in fair weather // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1963. – Vol. 89. – P. 107-121.
20. Higazi K.A., Chalmers J.A. Measurements of atmospheric electrical conductivity near the ground // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1966. – Vol. 28. – P. 327-330.

REFERENCES

1. Shuleykin V.N., Shchukin G.G., Kupovykh G.V. Razvitiye metodov i sredstv prikladnoy geofiziki - atmosferno-elektricheskiy monitoring geologicheskikh neodnorodnostey i zon geodinamicheskikh protsessov: monografiya [Development of methods and means of applied geophysics - atmospheric-electric monitoring of geological heterogeneities and zones of geodynamic processes: monograph]. Saint Petersburg: Izd-vo RGGMU, 2015, 206 p.
2. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V. Vliyaniye elektrodnoy effekta na sutochnyye variatsiiy elektricheskogo polya atmosfery v prizemnom sloe [Influence of the electrode effect on daily variations of the atmospheric electric field in the surface layer], *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2023, Vol. 36, No. 10, pp. 834-838.
3. Kupovykh G.V., Morozov V.N., Shvarts Ya.M. Teoriya elektrodnoy effekta v atmosfere [Theory of the electrode effect in the atmosphere], Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 123 p.
4. Kupovykh G.V., Klovo A.G., Grivtsov V.V., Belousova O.V. Modelirovaniye 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.

5. Belousova O.V., Kupovykh G.V., Klovo A.G., Grivtsov V.V. Rezultaty modelirovaniya elektrodinamicheskoy struktury turbulentnogo prizemnogo sloya [Results of modeling the electrodynamic structure of the turbulent surface layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4 (228), pp. 245-253.
6. Kupovykh G.V., Belousova O.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V. Elektrodinamicheskaya model' turbulentno-konvektivnogo prizemnogo sloya: priblizhennye analiticheskie resheniya [Electrodynamic model of the turbulent-convective surface layer: approximate analytical solutions], *Mater. IX Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii po atmosfernomu elektrichestvu* [Materials of the IX All-Russian Scientific Conference on Atmospheric Electricity]. Saint Petersburg: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2023, pp. 488-496.
7. Kupovykh G.V., Belousova O.V., Klovo A.G. Priblizhennye analiticheskie resheniya uravneniy elektrodnoogo effekta v atmosfere [Approximate analytical solutions of the equations of the electrode effect in the atmosphere], *Sb. dokladov XXVIII Vserossiyskoy otkrytoy nauchnoy konferentsii (Yoshkar-Ola, 16–19 maya 2023 goda)* [Collection of reports of the XXVIII All-Russian Open Scientific Conference (Yoshkar-Ola, May 16–19, 2023)]. Electronic edition. Yoshkar-Ola: Povolzhskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet, 2023, pp. 544-548.
8. Belousova O.V., Timoshenko D.V., Kupovykh G.V. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskoy struktury turbulentno-konvektivnogo prizemnogo sloya [Mathematical modeling of the electrical structure of the turbulent-convective surface layer], *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy* [Radio engineering and telecommunication systems], 2023, No. 3 (51), pp. 12-19.
9. Hoppel W.A. Theory of the electrode effect, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1967, Vol. 29, No. 6, pp. 709-721.
10. Crozier W.D. Atmospheric electrical profiles below three meters, *Journal of Geophysical Research*, 1965, Vol. 70, pp. 2785-2792.
11. Muhleisen R. Electrode effect measurements above the sea, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1961, Vol. 20, pp. 79-81.
12. Pluvinage P., Stahl P. La conductibilitie electrique de l'air sur l'inlandsis Groenlandais, *Annales de Géophysique*, 1953, Vol. 9, pp. 34-43.
13. Ruhnke L.H. Electrical conductivity of air on the Greenland ice cap, *Journal of Geophysical Research*, 1962, Vol. 67, pp. 2767-2772.
14. Boldyrev A.S., Redin A.A., Kupovykh G.V., Morozov V.N. Elektrodinamicheskaya model' konvektivno-neustoychivogo atmosfernogo prizemnogo sloya [Electrodynamic model of a convective-unstable atmospheric surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. Spetsvyпуск. Fizika atmosfery* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural Sciences. Special issue. Atmospheric physics], 2010, pp. 23-28.
15. Hoppel W.A. Electrode effect: comparison of the theory and measurement, In: *Planetary Electrodynamics*, 2, S.C. Coroniti and J. Hughes; ed. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1969, pp. 167-181.
16. Willet J.C. An analysis of the electrode effect in the limit of strong turbulent mixing, *Journal of Geophysical Research*, 1978, Vol. 83, pp. 402-408.
17. Hoppel W.A., Gathman S.G. Experimental determination of the eddy diffusion coefficient over the open ocean from atmospheric electrical measurements, *Journal of Physical Oceanography*, 1972, Vol. 2, pp. 248-254.
18. Adkins C.J. The small ion concentration and space charge near the ground, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1959, Vol. 85, pp. 237-252.
19. Law J. The ionization of the atmosphere near the ground in fair weather, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1963, Vol. 89, pp. 107-121.
20. Higazi K.A., Chalmers J.A. Measurements of atmospheric electrical conductivity near the ground, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1966, Vol. 28, pp. 327-330.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

Белуsoва Ольга Васильевна – Южный федеральный университет; email: obelousova@sfedu.ru, г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371705; кафедра физико-математических основ инженерного образования; ассистент.

Belousova Olga Vasilyevna – Southern Federal University; e-mail: obelousova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371705; Department of Engineering Education Physical and Mathematical foundations; assistant.