

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 634—643.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):634—643.

Научная статья

УДК 551.510.42:551.594

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-634-643

## **Влияние аэрозольного загрязнения воздуха на суточные вариации электрического поля вблизи поверхности земли**

***Дмитрий Владимирович Тимошенко,  
Геннадий Владимирович Куповых***

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, dmitrytim@sfedu.ru

*Аннотация.* В работе приводятся результаты математического моделирования суточных вариаций напряженности электрического поля в условиях наличия аэрозольного загрязнения. Рассматривается приземный слой, в котором происходит совместное действие нестационарного турбулентного переноса (локальный турбулентный токовый генератор) и глобального грозового генератора. Проводятся сопоставительные расчеты значений электродного эффекта, плотности тока проводимости и турбулентного тока при различных значениях концентрации аэрозоля. Установлено влияние концентрации аэрозоля на время наступления суточных экстремумов напряженности электрического поля и их амплитудные значения. Показано, что аэрозольное загрязнение воздуха является значимым фактором, влияющим на электрическое состояние приземного слоя атмосферы.

*Ключевые слова:* аэрозоль, приземный слой, электродный эффект, напряжённость электрического поля, проводимость, электрический ток.

*Для цитирования:* Тимошенко Д. В., Куповых Г. В. Влияние аэрозольного загрязнения воздуха на суточные вариации электрического поля вблизи поверхности земли // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 634—643. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-634-643.

Original article

## **The effect of aerosol air pollution on diurnal variations in the electric field near the earth's surface**

***Dmitry V. Timoshenko, Gennady V. Kupovykh***

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, dmitrytim@sfedu.ru

*Summary.* The paper presents the results of mathematical modeling of the electrical characteristics of the turbulent surface layer of the atmosphere, in particular, the daily variations in electric field strength in the presence of aerosol pollution. The surface layer is considered, in which the combined action of an unsteady turbulent transport (a local turbulent current generator) and a global thunderstorm generator occurs. The method for calculating the electrical characteristics of the surface layer is based on the spatial and temporal distribution of the electric field strength obtained from solving the total current equation for the surface layer of the atmosphere. This distribution contains the electrical conductivity of the air as one of the parameters. This allows us to consider the effect of aerosol concentration on the electrical characteristics of

the atmosphere through a change in the electrical conductivity of the air, for which the dependence of the latter on the aerosol concentration is used.

The issue of determining the scale of the electrode layer in a clean atmosphere and in the presence of aerosol contamination is investigated. Comparative calculations of the values of the electrode effect, the conductivity current density, and the turbulent current are performed at different aerosol concentrations. The effect of aerosol concentration on the time of onset of diurnal extremes of electric field strength and their amplitude values has been established. In general, it is shown that aerosol air pollution is a significant factor shaping the electrical state of the surface layer of the atmosphere.

The obtained results should be taken into account when identifying global disturbances in the electric field against the background of local variability in the characteristics of the surface electrode layer.

**Keywords:** aerosol, surface layer, atmosphere, electrode effect, turbulence, electric field strength, conductivity, electric current

*For citation:* Timoshenko D. V., Kupovykh G. V. The effect of aerosol air pollution on diurnal variations in the electric field near the earth's surface *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(634—643). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-634-643. (In Russ.).

## Введение

Формирование пространственно-временной структуры электрического поля в приземном электродном слое происходит под воздействием глобальных токовых источников, в частности грозowego генератора, и локальных метеорологических факторов. Антропогенное воздействие, проявляющееся, прежде всего, в появлении аэрозольного загрязнения приземного воздуха, также воздействует на его электрические характеристики, уменьшая значения электрической проводимости воздуха [1—8].

Теоретические исследования суточной динамики электрического поля в чистой атмосфере проводились в работах [9—15], центральной идеей которых было последовательное включение в математическую модель приземного электродного слоя глобальных и локальных факторов. В рамках данной работы распределение аэрозоля в пределах электродного слоя принимается равномерным и не зависящим от времени [1]. Суточные вариации интенсивности турбулентного переноса рассматриваются по локальному времени в пределах электродного слоя. Концентрация аэрозоля и интенсивность турбулентного переноса принимаются в качестве локальных факторов.

Получены смещения во времени экстремумов суточной вариации напряженности электрического поля в приземном слое при независимом действии грозowego и турбулентного генераторов. Выражения для суточного хода напряженности электрического поля в обоих случаях содержали электрическую проводимость в качестве одного из параметров.

В работе [15], основываясь на полученных в [14] зависимостях электрической проводимости от концентрации аэрозольных частиц, построена суточная вариация электрического поля вблизи поверхности земли. Как показали исследования, в условиях высокой концентрации аэрозоля наблюдалось ослабление эффектов временного смещения экстремумов в суточном ходе напряженности электрического поля и уменьшение их амплитудных значений.

Целью данной работы является исследование влияния концентрации аэрозольных частиц на суточную динамику приземного электрического поля под воздействием совместного действия глобального и локального токовых генераторов.

### Суточная динамика электрического поля в турбулентном приземном слое при наличии аэрозоля

В работе [12] исследовалось пространственно-временное распределение электрического поля в приземном слое с учетом одновременного действия глобальной унитарной вариации плотности электрического тока и локальных метеопараметров, представленных временной зависимостью коэффициента турбулентного переноса в условиях чистой атмосферы. Пространственно-временное распределение электрического поля ( $E$ ) было получено в результате решения начально-краевой задачи для уравнения полного тока:

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} - \varepsilon_0 D(t) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \lambda E = j(t), \quad (1)$$

$$E|_{t=0} = E_0 e^{-\frac{z}{L}}, \quad E|_{z=z_0} = E_0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_{z=L} = 0, \quad (2)$$

где предполагается, что полный ток ( $j$ ) и интенсивность турбулентного переноса ( $D$ ) одновременно имеют нестационарный характер:

$$j(t) = j_0 (1 - 0,2 \sin \omega t), \quad (3)$$

$$D(t) = D_0 (1 + 0,05 \sin \omega(t + 3)) \quad (4)$$

распределение электрического поля:

$$E(z) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{\frac{-(k+3)\varepsilon_0 D_0}{L^2} t} \sin(\omega(t-3)) \left( \frac{z}{z_0} \right)^{3k} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (5)$$

Здесь  $\lambda$  — электрическая проводимость воздуха;  $z_0 = 2,5 \times 10^{-3}$  м — параметр шероховатости земной поверхности;  $L$  — характерный масштаб электродного слоя;  $E_0$  — напряженность электрического поля у поверхности земли,  $t$  — время по Гринвичу (ВСВ),  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная.

Отметим, что соотношение (1) получено в условиях чистой атмосферы и содержит величину масштаба  $L$  турбулентного электродного слоя. При этом методики расчета масштаба электродного слоя в чистой атмосфере и при наличии аэрозоля отличаются [11, 12]:

Для чистой атмосферы:

$$L_1 = \sqrt{D_0 \tau_1}. \quad (4)$$

В условиях аэрозольного загрязнения:

$$L_2 = \sqrt{D_0 \tau_1 \tau_2 / \sqrt{(\tau_1^2 + 4\tau_2^2)}}, \quad (5)$$

где  $\tau_1 = (q\alpha)^{-1/2}$  — время жизни ионов проводимости с учетом взаимной рекомбинации,  $\tau_2 = 1/BN$  — время жизни ионов за счет их присоединения к аэрозольным частицам. Характерные масштабы электродного слоя представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характерные масштабы электродного слоя  
Characteristic scales of the electrode layer

$D_0, \text{м}^2/\text{с}$	$L_1, \text{м}$	$N, \text{м}^{-3}$	$L_2, \text{м}$
0,05	3,9	$10^{10}$	3,3
0,1	5,6	$10^{10}$	4,5
0,05	3,9	$10^{11}$	2,7
0,1	5,6	$10^{11}$	2,5

Согласно табл. 1, увеличение концентрации ( $N$ ) аэрозольных частиц ведет к уменьшению масштаба электродного слоя в сравнении с условиями чистой атмосферы. Влияние аэрозольных примесей на распределение электрического поля будем учитывать с помощью входящего в уравнение (1) параметра электрической проводимости воздуха. С этой целью воспользуемся следующей зависимостью электрической проводимости от концентрации аэрозольных частиц в турбулентном электродном слое при условии постоянного коэффициента турбулентной диффузии, полученного в [11]:

$$\lambda = \frac{eq}{BN} \left( b_1 (1 - \exp k_{11} (z - z_0)) + b_2 (1 - \exp k_{21} (z - z_0)) \right), \quad (6)$$

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

Здесь  $q$  — скорость ионизации воздуха;  $B = 2\eta_1\eta_2/(\eta_1 + 2\eta_2)$  — параметр, характеризующий воссоединение аэроионов с аэрозольными частицами,  $\eta_1 = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ ,  $\eta_2 = 4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ .

Формула (6) справедлива для аэрозольных частиц размера 0,001—0,4 мкм (ядра Айткена), оказывающих наибольшее влияние на электрические характеристики приземного слоя [7, 8].

На рис. 1 представлены графики суточной вариации напряженности электрического поля приземного слоя в условиях аэрозольного загрязнения ( $E_0 = -100 \text{ В/м}$ ). Анализ графиков на рис. 1 показывает, что присутствие аэрозоля влияет на время проявления суточных экстремумов напряженности электрического поля по сравнению с чистой атмосферой: с ростом концентрации аэрозоля происходит сдвиг утреннего минимума (с 04.00 до 05.30 ВСВ); дневной максимум также смещается в более позднее время (с 10.30 к 11.30 ВСВ); для вечернего максимума смещение происходит в более раннее время (с 22.30 к 20.00 ВСВ).

Кроме того, с увеличением концентрации аэрозоля с  $10^{10} \text{ м}^{-3}$  до  $10^{11} \text{ м}^{-3}$  наблюдается снижение величины напряженности электрического поля в течение суток, диапазон уменьшения составляет от 20 до 30 %.

В условиях сильного электрического поля ( $E_0 = -500 \text{ В/м}$ ) также происходит смещение суточных экстремумов напряженности электрического поля (рис. 2): утренний минимум с 03.00 до 05.00 ВСВ; дневной максимум с 09.00 до 11.00 ВСВ;

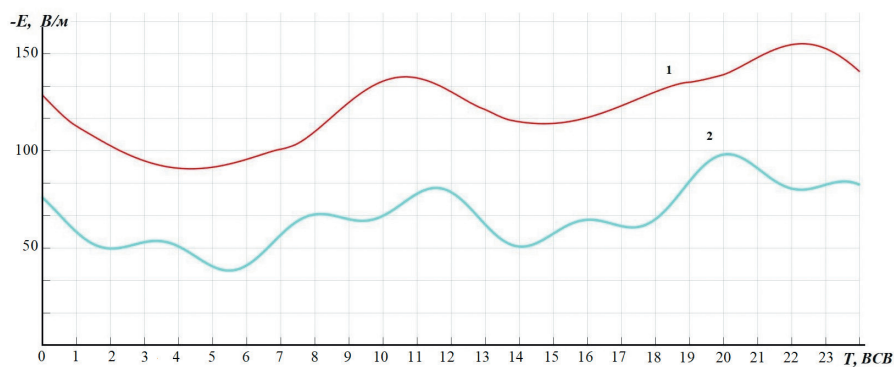


Рис. 1. Суточный ход электрического поля 1 —  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ;  
2 —  $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ,  $D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $E_0 = -100 \text{ В/м}$ , высота 1 м.

Fig. 1. Daily course of the electric field 1 —  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ;  
2 —  $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ,  $D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $E_0 = -100 \text{ В/м}$ , high 1 m.

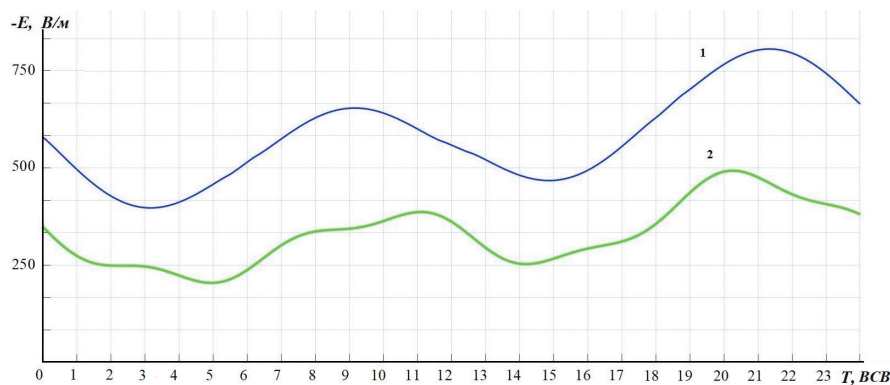


Рис. 2. Суточный ход электрического поля 1 —  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ;  
2 —  $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ,  $D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $E_0 = -500 \text{ В/м}$ , высота 1 м.

Fig. 1. Daily course of the electric field 1 —  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ;  
2 —  $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ,  $D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $E_0 = -500 \text{ В/м}$ , high 1 m.

вечерний максимум также смещается на более раннее время (с 21.30 до 20.00 BCB). Как и в предыдущем случае ( $E_0 = -100 \text{ В/м}$ ) с ростом концентрации аэрозоля с  $10^{10} \text{ м}^{-3}$  до  $10^{11} \text{ м}^{-3}$  происходит уменьшение значений напряженности электрического поля в течение суток до 30 %. На кривой 1 рис. 2 ( $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ) дневной максимум является более выраженным, чем в более слабом электрическом поле.

Отметим, что временные сдвиги экстремумов суточной вариации электрического поля в чистой атмосфере являлись результатом увеличения интенсивности турбулентного переноса [6—7]. Однако смещение экстремумов носило односторонний характер: в сторону более позднего времени. Можно высказать

предположение, что в условиях аэрозольного загрязнения рассогласование положения экстремумов во времени связано с суперпозицией суточного хода интенсивности турбулентного переноса, максимум которого приходится на полдень по местному времени, и унитарной вариацией электрического поля.

### Структура приземного электродного слоя при наличии аэрозоля

Проведенная оценка влияния концентрации аэрозоля на суточный ход напряженности электрического поля дает основание изучить влияние аэрозоля на характеристики приземного электродного слоя. В работе [9] исследована электрическая структура турбулентного приземного слоя в условиях чистой атмосферы, проведены оценки величины электродного эффекта (отношение напряженности электрического поля вблизи поверхности земли к значению на верхней границе электродного слоя,  $E_0 / E_\infty$ ), значений тока проводимости и турбулентного тока.

Для оценки параметров электродного слоя используем соотношение (5), а также само уравнение (1), учитывая физический смысл входящих в него слагаемых, соответствующих:  $j_T = \varepsilon_0 D(t, z) \partial^2 E / \partial z^2$  — турбулентному току;  $j_{np} = \lambda(z) E$  — току проводимости. Таким образом, зная распределение напряженности электрического поля (1), путем подстановки в соответствующее выражение можно рассчитать конкретную электрическую характеристику приземного слоя. Отметим, что в ходе проведения описанных расчетов необходимо учитывать масштаб электродного слоя, который для чистой атмосферы определяется соотношением (4), а в условиях аэрозольного загрязнения — соотношением (5).

В табл. 2 приведены результаты моделирования суточной динамики параметров электродного слоя на высоте 2 м для случая чистой атмосферы (столбцы «б/а») и при наличии аэрозоля концентрацией  $10^{10} \text{ м}^{-3}$ . Расчеты производились для трехчасовых интервалов.

Таблица 2

Параметры приземного электродного слоя в чистой атмосфере (б/а) и при наличии аэрозоля (а) с концентрацией  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$

Parameters of the surface electrode layer in a clean atmosphere (w/a) and in the presence of aerosol (a) with concentration  $N = 10^{10} \text{ м}^{-3}$

$E_0 = -100 \text{ В/м}, D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$						
Часы	$E_0/E_\infty$		$j_{np}, \text{ пА/м}^2$		$j_T, \text{ пА/м}^2$	
	б/а	а	б/а	а	б/а	а
0	1,93	1,69	3,88	3,22	2,54	2,26
3	1,91	1,68	3,82	3,17	2,32	2,06
6	1,78	1,56	3,55	2,94	2,23	1,98
9	1,89	1,66	3,43	2,84	1,77	1,57
12	1,97	1,73	3,43	2,84	1,35	1,20
15	2,36	2,07	3,21	2,66	2,25	2,00
18	2,57	2,26	4,34	3,60	2,73	2,42
21	2,49	2,19	5,12	4,24	3,39	3,01

Данные табл. 2 показывают снижение значений электрических характеристик приземного слоя в условиях загрязненной атмосферы по сравнению с чистой: для величины электродного эффекта ( $E_0 / E_\infty$ ) в диапазоне 12—15 %%; для плотности тока проводимости диапазон снижения составляет 15—20 %%; для плотности турбулентного тока — менее 10 %%. Данный результат можно объяснить тем, что величина электрической проводимости непосредственно не входит в выражение для плотности турбулентного тока, а лишь в выражение для второй производной напряженности электрического поля.

В табл. 3 приводятся результаты моделирования суточной динамики электрических параметров электродного слоя в условиях возросшей концентрации аэрозоля ( $10^{11} \text{ м}^{-3}$ ). Сравнение с соответствующими значениями в чистой атмосфере показывает, что уменьшение величины электродного эффекта в данном случае выражено более заметно и составляет порядка 25 % от значений в чистой атмосфере. Такой же диапазон снижения наблюдается у величины плотности тока проводимости (до 25 %). Значения плотности турбулентного тока уменьшаются в данном случае в диапазоне 12—15 %%, что говорит о меньшем влиянии концентрации аэрозоля на интенсивность турбулентного тока.

Таблица 3

Параметры приземного электродного слоя в чистой атмосфере (б/а) и при наличии аэрозоля (а) с концентрацией  $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$

Parameters of the surface electrode layer in a clean atmosphere (w/a) and in the presence of aerosol (a) with concentration  $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$

$E_0 = -100 \text{ В/м}, D_0 = 0,05 \text{ м}^2/\text{с}, N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$						
BCB, ч	$E_0 / E_\infty$		$j_{np}, \text{ пА/м}^2$		$j_T, \text{ пА/м}^2$	
	б/а	а	б/а	а	б/а	а
0	1,77	1,32	3,96	2,97	2,32	2,00
3	1,75	1,31	3,21	2,40	1,97	1,73
6	1,72	1,29	2,79	2,09	1,65	1,45
9	1,93	1,44	2,39	1,79	1,49	1,31
12	1,69	1,26	2,87	2,15	1,36	1,19
15	1,63	1,22	4,46	3,34	2,69	2,36
18	1,55	1,19	5,71	4,28	2,61	2,29
21	1,34	1,18	6,83	5,12	3,51	2,91

Сравнение значений электрических характеристик из табл. 2 и табл. 3 при наличии аэрозоля показывает, что с увеличением концентрации аэрозоля с  $10^{10} \text{ м}^{-3}$  до  $10^{11} \text{ м}^{-3}$  происходит уменьшение величины электродного эффекта в среднем от 20 до 60 %%; для плотности тока проводимости диапазон уменьшения значений составляет от 10 до 20 %%; для плотности турбулентного тока — от 7 до 10 %% соответственно.

Таким образом, вычислительный эксперимент показывает, что наряду с суточной вариацией напряженности электрического поля, наличие в приземной



атмосфере аэрозольных примесей оказывает заметное влияние на динамику электрических характеристик приземного слоя.

### Заключение

Результаты математического моделирования показали, что наличие в приземном слое аэрозольных частиц уменьшает значения электрической проводимости воздуха. Как следствие этого — уменьшается толщина электродного слоя и значения его параметров.

Влияние аэрозольного загрязнения воздуха на суточный ход напряжённости электрического поля у поверхности земли выражается в смещении по времени появления утреннего минимума, а также дневного и вечернего максимумов. Характер смещения при этом отличается: для утреннего и дневного экстремумов время наступления меняется на более позднее, а для вечернего максимума — соответственно на более раннее. Также отмечается уменьшение как амплитудных, так и среднесуточных значений напряжённости электрического поля с увеличением концентрации аэрозоля.

Полученные результаты следует учитывать при выделении глобальных возмущений электрического поля на фоне локальной изменчивости характеристик приземного электродного слоя.

### Список литературы

1. Морозов В. Н. Атмосферное электричество. Атмосфера / Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат. 1991. С. 394—408.
2. Брикар Дж. Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества / Проблемы электричества атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1969. С. 68—105.
3. Шварц Я. М. Электропроводность воздуха и аэрозоль Труды ГГО // 1980. Вып. 401. С. 136—140.
4. Аджиев А. Х., Куповых Г. В. Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. № 6. С. 710—715. doi: 10.7868/S0002351515060024.
5. Зайнетдинов Б. Г. Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе. // Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 47—61.
6. Зайнетдинов Б. Г., Морозов В. Н., Занюков В. В. Влияние аэрозольных частиц в приземном слое воздуха на элементы глобальной электрической цепи в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2024. № 5. С. 409—414. doi: 10.15372/AOO20241021.
7. Морозов В. Н., Палей А. А., Писанко Ю. В. и др. Экспериментальные и теоретические исследования влияния аэрозольных частиц субмикронного аэрозоля на электричество приземного слоя // Труды ГГО. 2018. № 590. С. 27—47.
8. Морозов В. Н., Палей А. А., Писанко Ю. В. Роль ионизации в образовании и эволюции субмикронных аэрозольных частиц // Оптика атмосферы и океана. 2020. № 5. С. 368—382. doi: 10.15372/AOO20207983.
9. Морозов В. Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. СПб.: РГТМУ. 2011. 254 с.
10. Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Монография. Таганрог. Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
11. Белоусова О. В., Куповых Г. В., Клово А. Г. и др. Результаты моделирования электродинамической структуры турбулентного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 4(228). С. 245—253. doi: 10.18522/1026-2237-2022-2-57-63.



12. Тимошенко Д. В., Куповых Г. В., Кудринская Т. В. Динамика суточного хода электрического поля в турбулентном приземном слое вследствие действия локальных факторов // *Оптика атмосферы и океана*. 2024. №11. С. 321—339. doi: 10.15372/AOO20241110.
13. Аджиев А. Х., Куповых Г. В., Тимошенко Д. В. и др. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. № 4. С. 452—461. doi: 10.31857/S0002351521040027.
14. Куповых Г. В., Тимошенко Д. В., Клово А. Г. и др. Влияние электродного эффекта на суточные вариации электрического поля атмосферы в приземном слое // *Оптика атмосферы и океана*. 2023 № 10. С. 834—838. doi: 10.15372/AOO20231007.
15. Тимошенко Д. В., Куповых Г. В. Исследования пространственно-временной изменчивости электрической структуры турбулентного приземного слоя // *Труды ГГО*. 2024. Вып. 613. С. 156—168.

### References

1. Morozov V. N. *Atmosfernoe elektrichestvo = Atmospheric Electricity*. Atmosphere. Handbook (reference data, models). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991: (394—408). (In Russ).
2. Brikar J. *Vlianie radioaktivnosti I zagriaznenij na elementi atmosferного elektrichestva = The influence of radioactivity and contamination on atmospheric electricity elements*. Problems of Atmospheric Electricity. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1969: (68—105). (In Russ).
3. Schwartz J. M. Electrical conductivity of air and aerosol. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 1980; (401): (136—140). (In Russ).
4. Adzhiev A. Kh., Kupovykh G. V. Measurements of the atmospheric electric field in the highlands of Elbrus. *Izvestia RAN. Fizika atmosfery i okeana = News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and the ocean*. 2015; (6): (710—715). doi: 10.7868/S0002351515060024. (In Russ).
5. Zainetdinov B. G. The results of observations of the electrical characteristics of the surface layer of the atmosphere in the polar region. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2018; (588): (47—61). (In Russ).
6. Zainetdinov B. G., Morozov V. N., Zanyukov V. V. Influence of aerosol particles in the near-ground air layer on elements of the global electrical circuit in the atmosphere. *Optica atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and the ocean*. 2024; (5): (409—414). doi: 10.15372/AOO20241021. (In Russ).
7. Morozov V. N., Paley A. A., Pisanko Yu. V., et al. Experimental and theoretical studies of the influence of submicron aerosol particles on the electricity of the surface layer. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2018; (590): (27—47). (In Russ).
8. Morozov V. N., Paley A. A., and Pisanko Yu. V. The role of ionization in the formation and evolution of submicron aerosol particles. *Optica atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and the ocean*. 2020; (5): (368—382). doi: 10.15372/AOO20207983. (In Russ).
9. Morozov V. N. *Matematicheskoe modelirovanie atmosferно-elektricheskikh processov s uchetom vliyania aerosolnih chastic i radioaktivnih veshstv = Mathematical modeling of atmospheric electrical processes taking into account the influence of aerosol particles and radioactive substances*. St. Petersburg: Publishing house of RGGMU, 2011: 254 p. (In Russ).
10. Kupovykh G. V., Morozov V. N., Schwartz J. M. *Teoria elektrodного effecta v atmosphere = Theory of the electrode effect in the atmosphere*. Taganrog: Publishing house of TRTU. 1998: 123 p. (In Russ).
11. Belousova O. V., Kupovykh G. V., Klovo A. G. et al. Results of Modeling the Electrodynamics Structure of the Turbulent Surface Layer. *Izvestiya UFU. Tehnicheskie nauki = SFU News. Technical Sciences*. 2020; (4): (245—253). doi:10.18522/1026-2237-2022-2-57-63. (In Russ).
12. Timoshenko D. V., Kupovykh G. V., Kudrinskaya T. V. Dynamics of the daily course of the electric field in a turbulent surface layer due to the action of local factors. *Optica atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and the ocean*. 2024; (11): (321—339). doi: 10.15372/AOO20241110. (In Russ).
13. Adzhiev A. Kh., Kupovykh G. V., Timoshenko D. V. et al. Diurnal variations of the electric field in the surface layer of the atmosphere. *Izvestia RAN. Fizika atmosfery i okeana = News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and the ocean*. 2021; (4): (452—461). doi: 10.31857/S0002351521040027. (In Russ).
14. Kupovykh G. V., Timoshenko D. V., Klovo A. G., et al. Influence of the electrode effect on diurnal variations of the atmospheric electric field in the surface layer. *Optica atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and the ocean*. 2023; (10): (834—838). doi: 10.15372/AOO20231007. (In Russ).

15. Timoshenko D. V., Kupovykh G. V. Studies of the spatiotemporal variability of the electrical structure of the turbulent surface layer. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2024; (613): (156—168). (In Russ).

### ***Информация об авторах***

*Тимошенко Дмитрий Владимирович*, кандидат физико-математических наук, доцент, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, доцент, dmitrytim@sfn.edu.ru.

*Куповых Геннадий Владимирович*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических основ инженерного образования, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, профессор, kupovykh@sfn.edu.ru.

### ***Information about authors***

*Dmitry Vladimirovich Timoshenko* PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Associate Professor.

*Gennady Vladimirovich Kupovykh* Doctor of science in Physics and Mathematics, Professor, chairman of the Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Professor.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 07.07.2025*

*Принята к печати после доработки 16.11.2025*

*The article was received on 07.07.2025*

*The article was accepted after revision on 16.11.2025*