

19. *Beytuganov M.N. Nesmeyanov P.A. Issledovanie vozmozhnosti provotsirovaniya elektrorazryadnykh yavleniy plazmennymi obrazovaniyami* [Research on the possibility of provoking electric discharge phenomena by plasma formations], *Sb. trudov 6 Rossiyskoy konferentsii po atmosfernomu elektrichestvu* [Collection of papers of the 6th Russian Conference on Atmospheric Electricity]. Nizhniy Novgorod, 2007, pp. 142-144.
20. *Beytuganov M.N. Initsirovanie iskusstvennykh molniy kak metod predotvrashcheniya grada* [Initiation of artificial lightning as a method of preventing hail], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, No. 1 (51), pp. 38-43.

Бейтуганов Мусаби Ногманович – Северо-Кавказская военизированная служба, Росгидромет; e-mail: bmn3112m@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79289104874; начальник отдела активных воздействий СКВС; д.ф.-м.н.

Чочаев Хизир Хусейнович – Северо-Кавказская военизированная служба, Росгидромет; e-mail: gradskvs@rambler.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79280819577; начальник Службы; к.ф.-м.н.

Beituganov Musabi Nogmanovich – North Caucasian Paramilitary Service, Roshydromet; e-mail: bmn3112m@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79289104874; head of the Department of Active Effects of the CFS; dr. of phys. and math. sc.

Chochaev Khizir Huseynovich – North Caucasian Paramilitary Service, Roshydromet; e-mail: gradskvs@rambler.ru; Nalchik, Russia; phone: +79280819577; head of Service; cand. of phys. and math. sc.

УДК 551.594.1

DOI 10.18522/2311-3103-2026-4-180-190

О.В. Белоусова

ГЛОБАЛЬНЫЕ И ЛОКАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ ЭЛЕКТРОДНОМ СЛОЕ

Представлена математическая модель структуры приземного электродного слоя атмосферы, учитывающая совместное действие глобальных и локальных генераторов электрического поля. Пространственно-временное моделирование основано на сопряжении гармонических тригонометрических функций суточного хода для локального турбулентного обмена и для плотности глобального полного тока. При моделировании поведения электрического поля использованы аналитические решения уравнений электродного эффекта в атмосфере. Предложенный подход заключается в пошаговой подстановке мгновенных значений плотности полного электрического тока и коэффициента турбулентной диффузии, полученных из уравнений их периодического изменения для конкретного часа суток, в аналитические формулы стационарного пространственного распределения характеристик турбулентного электродного слоя. Правомочность использования квазистационарного приближения строго обоснована существенным различием (более чем на два порядка) временных масштабов установления электрического равновесия среды и периода суточного хода глобального токового генератора. Установлено, что совмещенный режим моделирования адекватно воспроизводит синергетическое расширение размаха суточной кривой напряжённости (градиента потенциала) электрического поля и деформацию его профиля, характерную для летнего сезона в высокогорье. Достоверность полученных теоретических результатов подтверждена путем их сравнения с экспериментальными данными натурных измерений на высокогорной станции Пик Чегет (43° 16' с. ш. и 42° 30' в. д.), расположенной в Приэльбрусье на высоте 3040 м н. у. м. Анализ продемонстрировал хорошее количественное и хронологическое соответствие значений расчетных экстремумов наблюдаемой суточной вариации напряжённости электрического поля в летний сезон. Полученные результаты могут быть непосредственно использованы для повышения точности интерпретации данных геофизического мониторинга.

Математическое моделирование; приземный слой, атмосфера; электродный эффект; электрическое поле; аэроионы, ионизация; суточный ход.

O.V. Belousova

GLOBAL AND LOCAL VARIATIONS OF THE ELECTRIC FIELD
IN THE SURFACE ELECTRODE LAYER

The paper presents a mathematical model of the atmospheric surface electrode layer structure, taking into account the combined action of global and local electric field generators. Spatiotemporal modeling is based on the conjugation of harmonic trigonometric functions of the diurnal cycle for local turbulent exchange and for the global total current density. When modeling the behavior of the electric field, analytical solutions of the electrode effect equations in the atmosphere are used. The proposed approach consists of a step-by-step substitution of the total electric current density and the turbulent diffusion coefficient instantaneous values, obtained from the equations of their periodic variation for a specific hour of the day, into analytical formulas for the stationary spatial distribution of the turbulent electrode layer characteristics. The validity of using the quasi-stationary approximation is strictly substantiated by the significant difference (by more than two orders of magnitude) between the time scales of establishing electrical equilibrium in the medium and the period of the global current generator diurnal variation. It was established that the combined modeling mode adequately reproduces the synergistic expansion of the electric field strength (potential gradient) diurnal curve range and the deformation of its profile, characteristic of the summer season in the high mountains. The reliability of the obtained theoretical results was confirmed by their comparison with experimental data from in-situ measurements at the alpine station of Peak Cheget (430 16' N and 420 30' E), located in the Elbrus region at altitudes of 3040 m above sea level. The analysis demonstrated good quantitative and chronological agreement between the calculated extremes values and the observed diurnal variations in electric field during the summer season. The results obtained can be directly used to improve the accuracy of geophysical monitoring data interpretation.

Mathematical modeling; surface layer; atmosphere; electrode effect; electric field; aeroions; ionization; diurnal variation.

Введение. Исследование электродинамических процессов в приземном слое является одной из важных и практически значимых проблем физики атмосферы. Пространственно-временная структура электрического поля определяются влиянием глобальной электрической цепи (ГЭЦ) и электродным эффектом, интенсивность влияния которого зависит от метеорологических условий, в частности от степени турбулентного перемешивания [1–8]. Традиционные подходы к моделированию обычно рассматривают коэффициент турбулентной диффузии как стационарную функцию высоты, что упрощает вычисления, но не отражает реальную суточную динамику. Интенсивность турбулентного обмена претерпевает существенные изменения в течение суток под воздействием солнечной радиации и термической конвекции.

Аналитическое и численное моделирование электродинамических процессов, формирование пространственной структуры приземного электродного слоя в различных геофизических условиях выполнены в работах [9–13]. Экспериментальные [14–17] и теоретические [18–23] исследования структуры приземного электродного слоя формируют базу для математического моделирования. В работах [15, 16] используются методы численного моделирования электродинамических процессов в рамках теории электродного эффекта, а в работе [17] сочетаются методы комплексного математического моделирования и сопоставления с экспериментальными данными. Анализ суточного хода напряженности электрического поля атмосферы, представленный в работах [20, 21, 23], выполнен с использованием нестационарных моделей приземного электродного слоя с учетом действия глобальных и локальных факторов. Это позволяет объяснить наблюдаемые на практике аномалии в суточном ходе напряженности электрического поля, которые невозможно обосновать исключительно действием глобального генератора. В частности, наложение динамически меняющегося локального турбулентного переноса на унитарную вариацию приводит к деформации глобальной суточной вариации (кривой Карнеги) электрического поля – смещению временных экстремумов и генерации дополнительных пиков [8]. Математическое описание этих эффектов, подкрепленное натурными экспериментами, необходимо для проверки теоретических моделей и повышения точности интерпретации данных геофизического мониторинга.

В связи с этим актуальной задачей является детальное исследование влияния нестационарных турбулентных процессов на электрические характеристики приземного слоя.

В данной работе использован комбинированный подход к описанию электродинамической структуры приземного слоя атмосферы, синтезирующий нестационарные эмпирические закономерности и аналитические модели [18, 19].

Моделирование временного хода глобального токового генератора и суточный ход интенсивности турбулентного перемешивания реализуется аналогично подходу, примененному в работе [16], в виде тригонометрических функций, отражающих фазоамплитудные параметры соответствующих периодических изменений. Высотные профили электрических характеристик рассчитываются по полученным ранее аналитическим решениям математической модели стационарного турбулентного электродного эффекта, предложенной в работе [18], где в качестве базовой системы используются линеаризованные ионизационно-рекомбинационные уравнения и закон Ома.

Математическая модель. В условиях чистой атмосферы суточный ход электрического поля в приземном слое определяются, с одной стороны унитарной вариацией потенциала ионосферы, связанной в основном с колебаниями мощности глобального грозового генератора [1, 2, 5, 7]. С другой стороны, на величину и динамику электрических характеристик атмосферы вблизи поверхности земли влияет действие электродного эффекта, зависящего от метеорологических условий [5–8].

Математическое обоснование подстановки нестационарных временных зависимостей в аналитические профили стационарной модели базируется на квазистационарном приближении. Физическая правомерность такого шага обусловлена существенным различием временных масштабов протекающих процессов: время электрической релаксации приземной атмосферы (характерное время установления электрического равновесия в электродном слое) составляет порядка 100 секунд [6], а период суточных изменений интенсивности турбулентного обмена и глобального токового генератора (кривая Карнеги) составляет 24 часа. Поскольку временной масштаб изменения внешних факторов превышает на порядки время внутренней электродинамической релаксации среды, электрическая структура приземного слоя успевает подстраиваться под текущие значения турбулентности и полного тока.

Уравнение полного тока, описывающее суточный ход напряженности электрического поля в условиях совместного действия глобального и локального (турбулентного) токовых генераторов в приземном слое, имеет следующий вид [16, 17]:

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

где D – коэффициент турбулентной диффузии; λ – удельная электрическая проводимость атмосферы; j – плотность полного электрического тока; z – высота от земной поверхности, t – время; ε_0 – электрическая постоянная.

Следовательно, пространственное распределение напряженности электрического поля, концентраций аэроионов и объемного заряда в каждый конкретный момент времени с высокой точностью описывается аналитическими решениями стационарной модели, в которых параметры $j(t)$ и $D(t)$ выступают в качестве медленно меняющихся во времени квазипостоянных функций.

Функции изменения по времени плотности полного электрического тока (в соответствии с глобальной унитарной вариацией) и коэффициента турбулентного переноса (в слое 0,5–2 м) задавались следующим образом [16, 17]:

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

$$D(t) = D_0 - 0,028 \sin(\omega(t - 3)) - 0,043 \cos(\omega(t - 3)), \quad (3)$$

где $\alpha = 0,2$ – безразмерный множитель, $t - BCB$ (всемирное скоординированное время по Гринвичу).

Нестационарная модель для определения суточных вариаций напряженности электрического поля в турбулентном приземном слое в условиях чистой атмосферы как следствие действия глобальных (2) и локальных (3) факторов, приведена в работах [16, 17]. Установлено, что в суточном ходе электрического поля в турбулентном приземном слое происходит запаздывание по времени (на 2–3 ч) наступления утреннего минимума и вечернего максимума по сравнению с унитарной вариацией [8]. При этом абсолютные величины амплитудных значений напряженности электрического поля относительно среднего значения возрастают от 20% до 40% при усилении турбулентного перемешивания [16, 17].

Для проведения моделирования используем решение уравнения (1) в квазистационарном виде для напряженности электрического поля из работы [18] с учетом выражений (2) и (3) для разных комбинаций зависимостей $D(t)$ и $j(t)$:

$$E(z, t) = \left(E_0 - \frac{j(t)}{\lambda_\infty} \right) e^{-\frac{(z-z_0)\sqrt{\frac{\lambda}{\varepsilon_0 D(t)}}}{\lambda_\infty}} + \frac{j(t)}{\lambda_\infty}, \quad (4)$$

здесь E_0 значение напряженности электрического поля у поверхности земли, λ_∞ асимптотическое значение удельной электрической проводимости. Зависимости $D(t)$ и $j(t)$ представим в виде набора дискретных значений с шагом 1 час.

Рассмотрим следующие режимы моделирования:

(а) в (4) плотность полного электрического тока принимается величиной постоянной в каждый момент времени $j(t) = \text{const} = j_0$ при переменном коэффициенте турбулентной диффузии $D(t)$;

(б) в (4) коэффициент турбулентной диффузии принимается постоянным $D(t) = \text{const} = D_0$ при переменной плотности тока $j(t)$;

(в) в общем случае выражения для $D(t)$ и $j(t)$ сохраняют исходный вид (2) и (3) в выражении (4).

Проведем расчеты электрического поля, применяя выражения (4), (5) и (6) с заданными параметрами, характерными для высокогорных условий [8]:

$$b_1 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}, \quad b_2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}, \quad \alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}, \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, \\ q = 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}, \quad E_0 = -500 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}, \quad j_0 = 22 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}, \quad \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}, \\ \lambda_\infty = 15,8 \cdot 10^{-14} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}, \quad D_0 = 0,053 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Используем полученные ранее аналитические выражения для концентраций $n_{1,2}$ полярных аэроионов [18]:

$$n_1(z) = \frac{q}{\alpha n_\infty} (1 - e^{k_{12}(z-z_0)}), \quad k_{12} = \frac{b_1 E_0 - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_1 E_0)^2}}{2D_0}, \\ n_2(z) = \frac{q}{\alpha n_\infty} (1 - e^{k_{22}(z-z_0)}), \quad k_{22} = \frac{-b_2 E_0 - \sqrt{4D_0 \alpha n_\infty + (b_2 E_0)^2}}{2D_0}, \quad (5)$$

где $b_{1,2}$ – подвижности полярных аэроионов, α – коэффициент рекомбинации, q – скорость ионизации воздуха, e – элементарный заряд, n_∞ асимптотическое значение концентраций аэроионов. В случаях (а) и (в) в выражения (5) вместо параметра D_0 подставлялось соответствующее значение $D(t)$ в каждом временном интервале.

Удельная электрическая проводимость и ее асимптотическое значение рассчитывались для каждой комбинации параметров (а, б, в) моделирования на соответствующей высоте по следующим аналитическим выражениям [18]:

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

$$\lambda_{\infty} = e n_{\infty} (b_1 + b_2), \quad (6)$$

где $n_{\infty} = \sqrt{q/\alpha}$ – асимптотическое значение концентрации полярных ионов.

Глобальная унитарная вариация напряженности электрического поля представлена в относительных единицах как отношение абсолютных значений с шагом дискретизации 1 час к среднесуточному по формуле:

$$E_{\text{отн}}^{\text{унит}} = E_{\text{отн}}^{\text{унит}} / E_{\text{ср.сут.}}^{\text{унит}};$$

$$E_{\text{ср.сут.}} = \frac{j(t)}{\lambda}. \quad (7)$$

Расчеты выполнены на трех высотах: $z = 0,5 \text{ м}$, $z = 1 \text{ м}$ и $z = 2 \text{ м}$. Для каждого уровня проведен вычислительный эксперимент во всех режимах моделирования. В выражения (4) и (5), в зависимости от выбранного режима моделирования, подставлены либо значения $D(t)$ и $j(t)$, рассчитанные по (2) и (3) с шагом дискретизации 1 час, либо постоянные значения, заданные в параметрах моделирования.

Результаты. Относительные значения напряженности электрического поля $E_{\text{отн}} = E(t) / E(t)_{\text{ср.сут.}}$ (отношение часовых значений к среднесуточному по соответствующему режиму моделирования) на высотах 0,5 м, 1,0 м и 2,0 м, приведены в табл. 1. На рис. 1-3 приведен суточный ход напряженности электрического поля при различных режимах моделирования на указанных высотах.

На основе сравнительного анализа данных моделирования суточного хода электрического поля ($E_{\text{отн}}$) на высотах 0,5 м, 1,0 м и 2,0 м и глобальной унитарной вариации ($E_{\text{отн}}^{\text{унит}}$) установлено, что изменение высоты расчётной точки (наблюдения) существенно влияет на амплитуду исследуемых процессов. А именно, увеличение высоты точки наблюдения приводит к существенному увеличению размаха суточных колебаний. Наибольшая амплитуда регистрируется на высоте 2,0 м в режимах, учитывающих изменяющийся во времени коэффициент турбулентной диффузии $D(t)$.

В режиме постоянного коэффициента турбулентной диффузии D_0 при изменяющейся плотности тока $j(t)$ (кривая 3) на всех высотах отмечается наименьшая амплитуда суточных изменений со сглаженными, слабо выраженными экстремумами.

Режим динамической турбулентной диффузии $D(t)$ при постоянной плотности тока j_0 (кривая 2) формирует глубокий утренний минимум строго в 5 ч ВСВ, достигая 60% на высоте 0,5 м и 52% на высоте 2,0 м. Высокий вечерний максимум этой кривой регистрируется в интервале 17–18 ч ВСВ на высоте 0,5 м 112% и смещается чётко на 17 ч ВСВ 127% с ростом высоты до 2,0 м.

Совместный учёт динамических параметров $D(t)$ и $j(t)$ (кривая 4) сохраняет временные положения экстремумов (минимум в 5 ч ВСВ, максимум в 17 ч ВСВ), но существенно увеличивает размах колебаний. На высоте 2,0 м это приводит к наиболее сильному падению относительной напряжённости поля утром (до 43%) и её максимальному росту в вечернее время (до 134%).

Таблица 1

Суточный ход электрического поля $E_{отн}$ при различных режимах моделирования

$t, \text{ч}$ $z, \text{м}$		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
(a)	0,5	1,05	1,01	0,95	0,86	0,74	0,60	0,68	0,82	0,92	0,99	1,03	1,06
	1,0	1,05	0,98	0,89	0,77	0,62	0,49	0,55	0,71	0,85	0,95	1,02	1,08
	2,0	1,02	0,93	0,82	0,69	0,57	0,52	0,54	0,64	0,77	0,88	0,98	1,07
(б)	0,5	1,00	0,99	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,98	0,99	1,00
	1,0	0,99	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,95	0,96	0,98	0,99
	2,0	0,99	0,97	0,95	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	0,96	0,98
(в)	0,5	1,05	1,01	0,95	0,85	0,71	0,56	0,64	0,80	0,91	0,98	1,03	1,07
	1,0	1,06	0,98	0,88	0,74	0,57	0,42	0,49	0,67	0,82	0,93	1,02	1,08
	2,0	1,03	0,92	0,79	0,63	0,49	0,43	0,45	0,55	0,70	0,84	0,96	1,06
$E_{отн}^{унит}$		1,00	0,95	0,90	0,86	0,83	0,81	0,80	0,81	0,83	0,86	0,90	0,95

$t, \text{ч}$ $z, \text{м}$		12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
(a)	0,5	1,08	1,10	1,11	1,11	1,12	1,12	1,12	1,11	1,11	1,10	1,09	1,07
	1,0	1,12	1,15	1,17	1,19	1,20	1,20	1,20	1,19	1,18	1,16	1,14	1,10
	2,0	1,13	1,18	1,22	1,25	1,27	1,28	1,27	1,26	1,24	1,20	1,16	1,10
(б)	0,5	1,01	1,02	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,02	1,01
	1,0	1,01	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,05	1,04	1,03	1,01
	2,0	1,00	1,03	1,05	1,06	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07	1,05	1,03	1,01
(в)	0,5	1,09	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,13	1,13	1,12	1,11	1,10	1,08
	1,0	1,13	1,17	1,19	1,21	1,22	1,23	1,23	1,22	1,21	1,19	1,16	1,12
	2,0	1,15	1,21	1,26	1,30	1,32	1,33	1,33	1,32	1,29	1,25	1,20	1,12
$E_{отн}^{унит}$		1,00	1,05	1,10	1,14	1,17	1,19	1,20	1,19	1,17	1,14	1,10	1,05

Заметное расхождение кривых 2 и 4 на всех рассматриваемых высотах показывает, что вклад временных вариаций плотности электрического тока $j(t)$ в общую изменчивость суточного хода является весьма существенным. Наложение вариаций тока $j(t)$ на динамическую диффузию $D(t)$ (кривая 4) приводит к дополнительному сильному увеличению, как утреннего минимума, так и вечернего максимума. Таким образом, в то время как временной ход коэффициента турбулентной диффузии $D(t)$ выступает в качестве основного локального фактора, формирующего структуру и фазу суточной вариации электрического поля, изменчивость плотности тока $j(t)$ выполняет функцию амплитудного модулятора. Эти два фактора действуют синергетически, определяя результирующую локальную динамику электрического поля в приземном электродном слое.

Глобальная унитарная вариация электрического поля (кривая 1) демонстрирует экстремумы в 6 ч ВСВ (минимум) и 18 ч ВСВ (максимум). Модели, учитывающие динамический коэффициент турбулентной диффузии $D(t)$ (кривые 2 и 4), показывают систематическое опережение утреннего экстремума на 1 час (сдвиг на 5 ч ВСВ), что обусловлено локальными приземными метеорологическими процессами. Вечерний максимум модели

на всех высотах практически совпадает с фазой глобальной унитарной вариации (17–18 ч ВСВ). При этом расчетный профиль при полном учёте динамических параметров $D(t)$ и $j(t)$ (кривая 4) на высоте 2,0 м наиболее сильно отклоняется от глобальной унитарной вариации, значительно превышая её по размаху: колебания составляют от 43% до 133% против 80% и 120% соответственно.

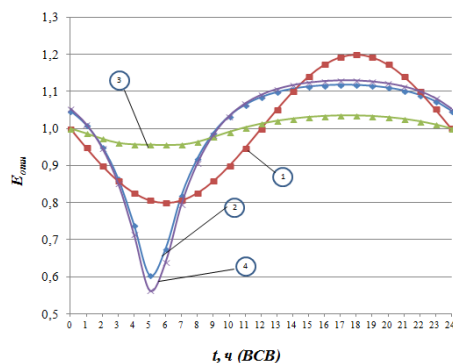


Рис. 1. Суточный ход электрического поля при различных режимах моделирования на высоте 0,5 м: 1 – глобальная унитарная вариация, 2 – режим $D(t)$ и j_0 , 3 – режим D_0 и $j(t)$, 4 – режим $D(t)$ и $j(t)$

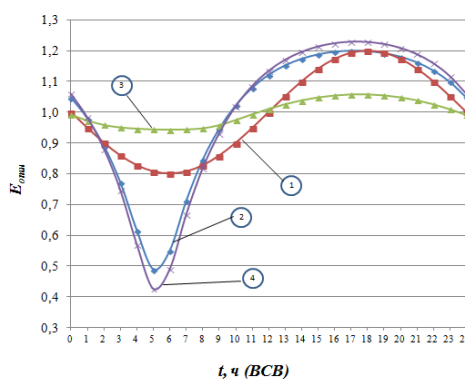


Рис. 2. Суточный ход электрического поля при различных режимах моделирования на высоте 1 м: 1 – глобальная унитарная вариация, 2 – режим $D(t)$ и j_0 , 3 – режим D_0 и $j(t)$, 4 – режим $D(t)$ и $j(t)$

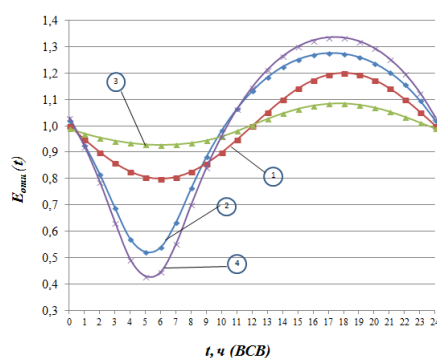


Рис. 3. Суточный ход электрического поля при различных режимах моделирования на высоте 2 м: 1 – глобальная унитарная вариация, 2 – режим $D(t)$ и j_0 , 3 – режим D_0 и $j(t)$, 4 – режим $D(t)$ и $j(t)$

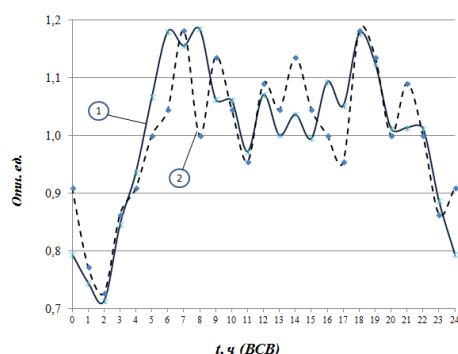


Рис. 4. Суточный ход электрических характеристик атмосферы на Пике Чегет (летний период): 1 – $E_{отн}$, 2 – $j_{отн}$

На рис. 4 приведен суточный ход напряженности (градиента потенциала) электрического поля $E_{отн}$ и плотности полного электрического тока $j_{отн}$ по данным натурных наблюдений [8] на высокогорной станции Пик Чегет ($43^{\circ} 16'$ с. ш. и $42^{\circ} 30'$ в. д.), расположенной в Приэльбрусье на высоте 3040 м н. у. м. Относительная плотность тока рассчитывалась как $j_{отн} = j(t) / j(t)_{ср.сут.}$ (отношение часовых значений к среднесуточному).

При сопоставлении результатов моделирования и экспериментальных данных [8] выявлено совпадение по фазе суточных колебаний. Расчётные минимумы для режимов, учитывающих динамическую диффузию (кривые 2 и 4 на рис. 1 и 3 при 5 ч ВСКВ) совпадают по фазе с экспериментально зафиксированным суточным минимумом на Пике Чегет, приходящимся на 2 ч ВСКВ. Возникающий временной сдвиг (около 3 часов) находится в рамках допустимой погрешности и обусловлен суточной динамикой локального ветрового режима высокогорной станции.

Расчётные кривые, учитывающие динамическую диффузию (кривые 2 и 4 на рис. 1 и 3), формируют протяжённую волну повышенных значений в интервале 11–21 ч ВСКВ с пологим пиком в районе 17–18 ч ВСКВ. Это демонстрирует точное временное совпадение с главным вечерним максимумом натурных измерений на Пике Чегет (16–19 ч ВСКВ с абсолютным пиком в 18 ч ВСКВ), где значение напряженности электрического поля достигает своего пика в 118% (в 6, 8 и 18 ч ВСКВ). Отсутствие в модели выраженного дневного пика (фиксируемого в эксперименте в 06–11 ч ВСКВ) физически обосновано принятыми в расчётах условиями устойчивой стратификации приземного слоя, при которых, согласно данным [17], дополнительный максимум нивелируется.

Анализ показывает, что полученная в ходе моделирования амплитуда колебаний поля качественно согласуется с реальными измерениями, отражая сильное влияние локальных факторов по мере удаления от поверхности земли. В утреннем минимуме (5 ч ВСКВ) на высоте 0,5 м расчётное относительное значение падает до 60% (кривая 2) и 56% (кривая 4) от среднего уровня, а на высоте 2,0 м – до 52% (кривая 2) и 43% (кривая 4). В вечернем максимуме (17 ч ВСКВ) значения электрического поля поле повышаются до 112% (кривая 2) и 113% (кривая 4) на высоте 0,5 м, а на высоте 2,0 м – до 127% (кривая 2) и 134% (кривая 4). Столь значительный размах суточных колебаний на двух метрах (от 43% до 133% от среднесуточного значения) свидетельствует о резком усилении влияния турбулентных процессов при удалении от подстилающей поверхности.

Полученный в ходе моделирования эффект увеличения утреннего минимума поля с ростом высоты (значение относительной напряженности падает с 56 % на высоте 0,5 м до 43% на высоте 2,0 м для комплексного режима) качественно подтверждает выводы работы [17], где отмечено, что усиление турбулентного перемешивания приводит к росту амплитудных значений вариаций электрического поля. Анализ результатов моделирования показывает, что определяющим локальным фактором является суточная изменчивость

коэффициента турбулентной диффузии $D(t)$, которая формирует саму структуру и фазу суточного хода поля за счёт перераспределения объемных зарядов. В то же время, явное расхождение кривых 2 и 4 доказывает существенный синергетический вклад глобального фактора – временных вариаций плотности тока $j(t)$. Накладываясь на локальную турбулентность, вариации тока выступают в роли амплитудного модулятора, который значительно усиливает экстремумы и увеличивает общий размах колебаний по мере удаления от земной поверхности.

Таким образом, комплексное временное, амплитудное и пространственное сопоставление результатов моделирования и натурных измерений позволяют сделать вывод об эффективности предложенного подхода. Проведённый анализ подтверждает правомерность применения квазистационарной модели, а также применимость полученных аналитических решений для расчёта и прогнозирования поведения электрического поля в турбулентном приземном электродном слое.

Заключение. В работе проведено моделирование суточной динамики электрических характеристик приземного слоя атмосферы. Предложенный подход основан на квазистационарном сопряжении временных гармонических зависимостей локальных и глобальных факторов с аналитическими решениями уравнений электродного эффекта. Физическая правомерность методики расчета обоснована существенным различием временных масштабов установления электрического равновесия среды и периода суточного хода внешних генераторов. Разработанная расчетная схема позволила выявить определяющую роль временного хода турбулентного обмена, приводящего к значительному расширению амплитудного диапазона и деформации профиля суточных колебаний электрического поля по сравнению с глобальной унитарной вариацией. Достоверность полученных теоретических результатов подтверждена путем сравнения с экспериментальными данными натурных измерений в высокогорных условиях, продемонстрировав временное совпадение расчетных экстремумов с ходом суточной вариации электрического поля в летний период.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mauchly S.J. Studies in atmosphere electricity based on observations made on the Carnegie (1915-1921) // *Researches of the Department of Terrestrial Magnetism*. Washington: Carnegie Institution. – 1926. – P. 385-424.
2. Harrison R.G. The Carnegie curve // *Surveys in Geophysics*. – 2013. – Vol. 34, No. 2. – P. 209-232.
3. Adzhiev A. Kh, Kupovykh G.V. Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the vicinity of Mt. Elbrus // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2015. – Vol. 51, No. 6. – P. 633-638.
4. Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Gritsov V.V. The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – 913 052041. – 6 p.
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. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя: монография. – СПб.: Астерион, 2017. – 307 с.
8. Куповых Г.В. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 114 с.
9. Куповых Г.В., Морозов В.Н. Турбулентный электродный эффект в приземном слое // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение № 3*. – 2003. – С. 55-62.
10. Редин А.А., Клово А.Г., Куповых Г.В. Электродинамическая модель атмосферного приземного слоя // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2009. – № 8. – С. 93-106.
11. Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer // *Journal of Electrostatics*. – 2013. – Vol. 71. – P. 305-311.
12. Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Редин А.А. Исследования ионизационного состояния приземного слоя атмосферы в разных геофизических условиях // *Метеорология и гидрология*. – 2018. – № 4. – С. 77-85.

13. Свидельский С.С., Литвинова В.С., Куповых Г.В., Клово А.Г. Формирование структуры атмосферного электродного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 130-141.
14. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V. Electrodynamics models in atmospheric surface layer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 698 044034. – 8 p.
15. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Kudrinskaya T.V., Klovo A.G. Modeling of the atmospheric electric field local variations in the turbulent surface layer // Journal of Physics: IOP Conference Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity. – 2020. – 1604 012003. – 5 p.
16. Timoshenko D.V., Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V. Daily dynamics of the electric field in the turbulent surface air layer under the action of local factors // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2025. – Vol. 38, No. 1. – P. 77-82.
17. Adzhiev A.Kh., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Diurnal Variations of the Electric Field in the Atmospheric Boundary Layer // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2021. – Vol. 57, No. 4. – P. 397-405.
18. 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. 245253.
19. Куповых Г.В., Белоусова О.В., Клово А.Г. Приближенные аналитические решения уравнений электродного эффекта в атмосфере // Сб. докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн». – Йошкар-Ола, 2023. – С. 544-548.
20. Куповых Г.В., Тимошенко Д.В., Кудринская Т.В., Клово А.Г., Белоусова О.В. Локальные вариации электрического поля в турбулентном приземном слое // Матер. IX Всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2023. – С. 497-503.
21. Тимошенко Д.В., Куповых Г.В. Исследование глобальных и локальных вариаций электрических характеристик турбулентного приземного слоя атмосферы // Тр. ГГО им. А.И. Воейкова. – СПб., 2025. – Вып. 619. – С. 115-128.
22. Тимошенко Д.В., Куповых Г.В., Белоусова О.В. Анализ электродинамической модели приземного слоя атмосферы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2024. – № 4. – С. 104-112.
23. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V. Electrode effect on the daily variation in the atmospheric electric field in the surface air layer // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2024. – Vol. 37, No. 1. – P. 94-98.

REFERENCES

1. Mauchly S.J. Studies in atmosphere electricity based on observations made on the Carnegie (1915-1921), Researches of the Department of Terrestrial Magnetism. Washington: Carnegie Institution, 1926, pp. 385-424.
2. Harrison R.G. The Carnegie curve, *Surveys in Geophysics*, 2013, Vol. 34, No. 2, pp. 209-232.
3. Adzhiev A. Kh, Kupovykh G.V. Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the vicinity of Mt. Elbrus, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, No. 6, pp. 633-638.
4. Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Grivtsov V.V. The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 913 052041, 6 p.
5. Morozov V.N. Atmosfernoe elektrichestvo [Atmospheric electricity], *Atmosfera. Spravochnik (spravochnye dannye, modeli)* [Atmosphere. Handbook (reference data, models)]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, pp. 394-408.
6. Kupovykh G.V., Morozov V.N., Shvarts Ya.M. Teoriya elektrodnoy efekta v atmosfere [Theory of the Electrode Effect in the Atmosphere]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1998, 123 p.
7. Morozov V.N., Kupovykh G.V. Matematicheskoe modelirovanie global'noy atmosfernoy elektricheskoy tsepi i elektrichestva prizemnogo sloya: monografiya [Mathematical modeling of the global atmospheric electric circuit and surface layer electricity: monograph]. Saint Petersburg: Asterion, 2017, 307 p.
8. Kupovykh G.V. Elektrodinamicheskie protsessy v prizemnom sloe atmosfery [Electrodynamics processes in the surface layer of the atmosphere]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, 114 p.
9. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Turbulentnyy elektrodnyy effekt v prizemnom sloe [Turbulent electrode effect in the surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. Prilozhenie* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences. App. No. 3], 2003, pp. 55-62.
10. Redin A.A., Klovo A.G., Kupovykh G.V. Elektrodinamicheskaya model' atmosfer'nogo prizemnogo sloya [Electrodynamics model of the atmospheric surface layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 8, pp. 93-106.

11. Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer, *Journal of Electrostatics*, 2013, Vol. 71, pp. 305-311.
12. Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Redin A.A. Issledovaniya ionizatsionnogo sostoyaniya prizemnogo sloya atmosfery v raznykh geofizicheskikh usloviyakh [Studies of the ionization state of the atmospheric surface layer under various geophysical conditions], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2018, No. 4, pp. 77-85.
13. Svidel'skiy S.S., Litvinova V.S., Kupovykh G.V., Klovo A.G. Formirovanie struktury atmosfernogo elektrodnoogo sloya [Formation of the structure of the atmospheric electrode layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5, pp. 130-141.
14. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V. Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 698 044034, 8 p.
15. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Kudrinskaya T.V., Klovo A.G. Modeling of the atmospheric electric field local variations in the turbulent surface layer, *Journal of Physics: IOP Conference Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity*, 2020, 1604 012003, 5 p.
16. Timoshenko D.V., Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V. Daily dynamics of the electric field in the turbulent surface air layer under the action of local factors, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2025, Vol. 38, No. 1, pp. 77-82.
17. Adzhiev A.Kh., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Diurnal Variations of the Electric Field in the Atmospheric Boundary Layer, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 4, pp. 397-405.
18. Belousova O.V., Kupovykh G.V., Klovo A.G., Grivtsov V.V. Rezul'taty modelirovaniya elektrodinamicheskoy struktury turbulentnogo prizemnogo sloya [Results of simulation of electrodynamic structure of turbulent surface layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4 (228), pp. 245253.
19. Kupovykh G.V., Belousova O.V., Klovo A.G. Priblizhennyye analiticheskie resheniya uravneniy elektrodnoogo effekta v atmosfere [Approximate analytical solutions of the electrode effect equations in the atmosphere], *Sb. dokladov XXVIII Vserossiyskoy otkrytoy nauchnoy konferentsii «Rasprostraneniye radiovoln»* [Proceedings of the XXVIII All-Russian Open Scientific Conference "Radio Wave Propagation"], Yoshkar-Ola, 2023, pp. 544-548.
20. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Kudrinskaya T.V., Klovo A.G., Belousova O.V. Lokal'nye variatsii elektricheskogo polya v turbulentnom prizemnom sloe [Local variations of the electric field in a turbulent surface layer], *Mater. IX Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii po atmosfernomu elektrichestvu* [Proceedings of the IX All-Russian Scientific Conference on Atmospheric Electricity]. Saint Petersburg: VKA im. A.F. Mozhayskogo, 2023, pp. 497-503.
21. Timoshenko D.V., Kupovykh G.V. Issledovanie global'nykh i lokal'nykh variatsiy elektricheskikh kharakteristik turbulentnogo prizemnogo sloya atmosfery [Investigation of global and local variations of electrical characteristics of the turbulent surface layer of the atmosphere], *Tr. GGO im. A.I. Voeykova* [Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory]. Saint Petersburg, 2025, Issue 619, pp. 115-128.
22. Timoshenko D.V., Kupovykh G.V., Belousova O.V. Analiz elektrodinamicheskoy modeli prizemnogo sloya atmosfery [Analysis of the electrodynamic model of the atmospheric surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences], 2024, No. 4, pp. 104-112.
23. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V. Electrode effect on the daily variation in the atmospheric electric field in the surface air layer, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2024, Vol. 37, No. 1, pp. 94-98.

Белусова Ольга Васильевна – Южный федеральный университет; e-mail: obelousova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79281727171.

Belousova Olga Vasil'evna – Southern Federal University; e-mail: obelousova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281727171.