

УДК: 551.594

DOI: 10.26907/rwp29.2025.494-498

ИССЛЕДОВАНИЯ РОЛИ ГРОЗОВОГО И ЛОКАЛЬНЫХ ТОКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ФОРМИРОВАНИИ СУТОЧНОЙ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВЫСОКОГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Д.В. Тимошенко, Г.В. Куповых, О.В. Белоусова

Южный федеральный университет, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42

E-mail: dmitrytim@sedu.ru

Аннотация. Предложена методика оценки параметров глобального (грозового) и локальных (турбулентный и конвективный) атмосферных токовых генераторов. Исследована взаимосвязь суточной динамики интенсивности токовых генераторов с характеристиками электродного эффекта в приземном слое. Проведено сравнение полученных результатов моделирования с данными высокогорных измерений.

Ключевые слова: электродный эффект; приземный слой, атмосфера, токовые генераторы.

RESEARCH OF THE ROLE OF LIGHTNING AND LOCAL CURRENT GENERATORS IN THE FORMATION OF DAILY VARIATION OF THE ELECTRIC FIELD IN ALPINE CONDITIONS

D.V. Timoshenko, G.V. Kupovukh, O.V. Belousova

Abstract. A method for estimating the parameters of global (thunderstorm) and local (turbulent and convective) atmospheric current generators is proposed. The interrelation of the current generators intensity daily dynamics with the characteristics of the electrode effect in the surface layer is investigated. The obtained simulation results are compared with the data of alpine measurements.

Keywords: the electrode effect; the surface layer, atmosphere, current generators.

Введение

Известно, что в условиях «хорошей погоды» в условиях незагрязнённой атмосферы суточный ход напряженности электрического поля в приземном слое определяется глобальной унитарной вариацией потенциала ионосферы вследствие изменения мощности глобального грозового генератора [1,2]. Одновременно с глобальными факторами в формировании пространственно-временной структуры электрического поля могут принимать участие локальные генераторы, обусловленные процессами турбулентного и конвективного переносов в приземном слое атмосферы [3,4]. Механизм их действия, основанный на явлении электродного эффекта в атмосфере [5], меняет электрическую структуру конвективно-турбулентного приземного слоя [6].

Цель работы – оценка мощности глобальных и локальных токовых генераторов на основе теоретических расчетов и экспериментальных данных об электрических параметрах приземного слоя.

Теоретические расчеты

Для оценки используется уравнение полного тока в приземном слое, дополненное соответствующими начальными и граничными условиями, представляющее собой результат совокупного действия локальных и глобального генераторов электрического поля [3, 4]:

$$\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} - \epsilon_0 D(t) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \epsilon_0 v(z) \frac{dE}{dz} + \lambda E = j(t), \quad (1)$$

где E – напряженность электрического поля, $D(t)$ – коэффициент турбулентной диффузии; $v(z)$ – скорость вертикального конвективного переноса; λ – электрическая проводимость атмосферы; $j(t)$ – плотность полного электрического тока; z_0 – параметр шероховатости; L – характерный масштаб электродного слоя, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Скорости турбулентного D и конвективного v переносов в соответствии с экспериментальными данными могут быть представлен как [6]:

$$\begin{aligned} D(t) &= D_0 \left(1 + \alpha \sin \left(\frac{\pi}{12}(t-3) + \phi \right) \right), \\ v(z) &= v_0 \frac{z}{L} \left(1 - \frac{z}{L} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

где D_0 – амплитудное значение, $\alpha = 0,2$ – безразмерный множитель, $t - BCV$ (по Гринвичу).

Оценка токовых генераторов различного типа можно осуществить при помощи параметра, характеризующего плотность мощности источника тока [7]:

$$S = j \cdot E. \quad (3)$$

Для оценки мощности глобального грозового генератора, используем решения уравнения полного тока на верхней границе электродного слоя. Полагаем в уравнении (1) $D_0 = 0$, $v_0 = 0$, в результате чего оно содержит только ток проводимости [3]: Тогда, суточные колебания мощности грозового генератора (функция плотности электрического тока) отражают глобальную унитарную вариацию потенциала ионосфера.

$$j(t) = j_0(1 - \alpha \sin(\omega t)). \quad (4)$$

Для оценки мощности локальных токовых генераторов в качестве естественного допущения будем считать плотность полного тока ($j=j_0$) в пределах электродного слоя величиной постоянной, соответствующей некоторой усредненной мощности глобального грозового генератора. Тогда, пространственно-временное распределение напряженности электрического поля для данного случая, определяется соотношением [4,6]:

$$E(z; t) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{\frac{-(k+3)\epsilon_0 \left(\frac{D_0}{L} + v_0 \right)}{L} t} \sin \left(\frac{\pi}{12}(t-3) \right) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{3k+2} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (5)$$

При оценке мощности токовых генераторов важным является значения соответствующего масштаба электродного слоя [6]. Характерные пространственные масштабы: $L_D = D\tau$, $L_v = v\tau$, которые соответствуют конвективно-турбулентному электродному слою, и соответственно, для оценки действия локальных генераторов [6]. В расчетах значения параметров принимались равными: $q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3\text{с}^{-1}$, $D_0 = 0,1 \text{ м}^2/\text{с}$, $V = 0,1 \text{ м}/\text{с}$, тогда получаем: $\tau \approx 300c$, $L_D = 30 \text{ м}$, $L_v = 30 \text{ м}$.

Экспериментальные данные

В периоды 1989-1992 гг. на высокогорных станциях Пик Чегет и в 2003-2004 гг. Пик Терскол ($43^0 16'$ северной широты и $42^0 30'$ восточной долготы), расположенных на высоте 3040 м и 3003 м н. у. м. в районе Эльбруса, соответственно, проводились одновременные измерения градиента потенциала (V') электрического поля, полярных проводимостей воздуха (λ_{\pm}) и плотности (j_0) полного электрической тока [8-11]. В высокогорной зоне практически полностью отсутствуют местные источники аэрозольного и радиоактивного загрязнений.

Применяя формулу (3) и проводя расчеты по формуле (4) с учетом (2), проведен сравнительный анализ экспериментальных (*exp*) данных и теоретических (*cal*) расчетов. При расчетах использовалось в качестве E_0 и j_0 значения, приведенные в таблицах 1-3 в различные периоды времени. Вычисления параметра S (нижние индексы соответствуют токам проводимости и конвективно-турбулентному току) проводилось по формулам

$$S = j_0 \cdot V', S_{np} = j_{np} \cdot V', S_{K+T} = S - S_{np}. \quad (6)$$

Экспериментальные данные и расчетные значения параметров S приведены в таблицах 1-3 ($E - \text{В}/\text{м}$; $\lambda_{\pm} - \text{ФСм}/\text{м}$; $j_0 - \text{пА}/\text{м}^2$, $S, nBm/m^3$).

Анализ данных таблиц 1-3 показывает, что суточный ход относительных величин $S^{exp} \%$, $S_{K+T}^{exp} \%$ и $S_{K+T}^{cal} \%$, $S_{K+T}^{cal} \%$ имеет синхронный характер, разница в значениях объясняется сложным условиям экспериментальных наблюдений. В то же время, теоретические значения мощности конвективно-турбулентного генератора (S_{K+T}^{cal}) в по абсолютной величине также близки к наблюдавшимися экспериментально (S_{K+T}^{exp}). Аналогичный вывод можно сделать

относительно абсолютных значений мощности грозового генератора в теоретическом и экспериментальном случаях (S^{cal} и S^{exp}). При этом в течение суток наблюдаются изменения данных параметров, качественно повторяющие суточные вариации напряженности электрического поля с утренним минимумом и вечерним максимумом.

Таблица 1. Параметр S (эксперимент и теория), Пик Чегет
(август-сентябрь, $E_{cp}=500$ В/м, $z = 1$ м)

| Параметры, | время, ч. (BCB) | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0–3 | 3–6 | 6–9 | 9–12 | 12–15 | 15–18 | 18–21 | 21–24 |
| E , В/м | 400 | 500 | 620 | 550 | 550 | 550 | 580 | 510 |
| λ_+ | 22 | 22 | 22 | 23 | 22 | 22 | 22 | 23 |
| λ_- | 27 | 18 | 16 | 19 | 19 | 18 | 19 | 22 |
| j_0 | 12 | 14 | 15 | 12 | 14 | 14 | 16 | 16 |
| S^{exp} | 4800 | 7000 | 9300 | 6600 | 7700 | 7700 | 9280 | 8160 |
| S_{np}^{exp} | 7200 | 10000 | 14880 | 12650 | 13200 | 12100 | 13920 | 11220 |
| S_{K+T}^{exp} | 2400 | 3000 | 5580 | 6050 | 5500 | 4400 | 4640 | 3060 |
| $S^{exp}, \%$ | 63 | 92 | 122 | 87 | 101 | 101 | 122 | 107 |
| $S_{np}^{exp}, \%$ | 60 | 84 | 125 | 106 | 110 | 101 | 117 | 94 |
| $S_{K+T}^{exp}, \%$ | 55 | 69 | 128 | 139 | 127 | 101 | 107 | 70 |
| S^{cal} | 1580 | 3800 | 5858 | 5904 | 4150 | 3486 | 4451 | 2313 |
| S_{K+T}^{cal} | 296 | 444 | 504 | 618 | 1448 | 1328 | 1564 | 1380 |
| $S^{cal}, \%$ | 36 | 93 | 138 | 145 | 102 | 83 | 109 | 67 |
| $S_{K+T}^{cal}, \%$ | 35 | 49 | 51 | 62 | 145 | 135 | 170 | 141 |

Таблица 2. Параметр S (эксперимент и теория), Пик Чегет
(апрель, $E_{cp}=500$ В/м, $z = 1$ м)

| Параметры, | время, ч. (BCB) | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 0–3 | 3–6 | 6–9 | 9–12 | 12–15 | 15–18 | 18–21 | 21–24 |
| E , В/м | 360 | 420 | 510 | 490 | 490 | 690 | 650 | 470 |
| λ_+ | 20 | 19 | 19 | 20 | 19 | 14 | 16 | 20 |
| λ_- | 14 | 13 | 14 | 16 | 16 | 8 | 10 | 13 |
| j_0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 | 9 |
| S^{exp} | 3240 | 3780 | 4590 | 4410 | 4410 | 5520 | 5200 | 4230 |
| S_{np}^{exp} | 4320 | 5460 | 8160 | 7840 | 7840 | 10350 | 10400 | 7050 |
| S_{K+T}^{exp} | 1080 | 1680 | 3570 | 3430 | 3430 | 4830 | 5200 | 2820 |
| $S^{exp}, \%$ | 63 | 92 | 122 | 87 | 101 | 101 | 122 | 107 |
| $S_{np}^{exp}, \%$ | 60 | 84 | 125 | 106 | 110 | 101 | 117 | 94 |
| $S_{K+T}^{exp}, \%$ | 55 | 69 | 128 | 139 | 127 | 101 | 107 | 70 |
| S^{cal} | 1311 | 3154 | 4862 | 4900 | 3444 | 2893 | 3694 | 1919 |
| S_{K+T}^{cal} | 245 | 368 | 418 | 512 | 1201 | 1102 | 1298 | 1145 |
| $S^{cal}, \%$ | 29 | 77 | 114 | 120 | 84 | 68 | 90 | 55 |
| $S_{K+T}^{cal}, \%$ | 29 | 40 | 42 | 51 | 120 | 112 | 141 | 117 |

Таблица 3. Параметр S (эксперимент и теория), Пик Терскол(август, $z = 1\text{м}$)

| Параметры, | время, ч. (BCB) | | | | | | | |
|----------------------|-----------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 0–3 | 3–6 | 6–9 | 9–12 | 12–15 | 15–18 | 18–21 | 21–24 |
| $E, \text{В/м}$ | 180 | 260 | 340 | 340 | 350 | 290 | 280 | 240 |
| λ_+ | 25 | 28 | 27 | 27 | 25 | 21 | 21 | 25 |
| λ_- | 9 | 9 | 9 | 8 | 7 | 7 | 6 | 8 |
| j_0 | 6 | 10 | 12 | 11 | 8 | 8 | 11 | 7 |
| S^{\exp} | 1080 | 2600 | 4080 | 3740 | 2800 | 2320 | 3080 | 1680 |
| S_{np}^{\exp} | 1080 | 2600 | 4 420 | 4080 | 3850 | 2320 | 1960 | 1920 |
| S_{K+T}^{\exp} | 0 | 0 | 340 | 340 | 1050 | 0 | 1120 | 240 |
| $S^{\exp}, \%$ | 40 | 97 | 150 | 139 | 104 | 86 | 115 | 62 |
| $S_{np}^{\exp}, \%$ | 42 | 102 | 155 | 160 | 151 | 91 | 77 | 75 |
| $S_{K+T}^{\exp}, \%$ | 0 | 0 | 88 | 88 | 271 | 0 | 290 | 62 |
| S^{cal} | 977 | 2349 | 3621 | 3649 | 2565 | 2155 | 2751 | 1430 |
| S_{K+T}^{cal} | 183 | 275 | 312 | 382 | 895 | 821 | 967 | 853 |
| $S^{cal}, \%$ | 39 | 95 | 148 | 150 | 105 | 88 | 112 | 58 |
| $S_{K+T}^{cal}, \%$ | 31 | 46 | 53 | 65 | 152 | 140 | 165 | 145 |

Таким образом, мощность локальных токовых генераторов вблизи поверхности земли значительна и сопоставима со вкладом глобального (грозового) генератора. Последний начинает играть основную роль на верхней границе и вне электродного слоя.

Заключение

В работе рассмотрен теоретический подход к оценке мощности токовых генераторов различного типа на основе данных об электрическом состоянии приземного слоя атмосферы. Сделана оценка мощности глобального грозового генератора, а также совместного действий локальных (конвективного и турбулентного) токовых генераторов в течение суток в приземном слое. Проведены расчеты мощности токовых генераторов по данным атмосферно-электрических наблюдений на высокогорных станциях в районе Эльбруса. Проведенный сравнительный анализ данных теоретических расчётов и натурного эксперимента показал их удовлетворительное совпадение. Таким образом, роль локальных генераторов в приземном слое сопоставима с воздействием грозового источника и ее необходимо учитывать при описании электрической структур вблизи поверхности земли.

Список литературы

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, Publ. – 1926. – No. 175. – P. 385–424.
2. Harrison R.G. The Carnegie curve // Surveys in Geophysics. – 2013. – No. 34 (2). – P. 209–232.
3. Аджиев А.Х., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57. – № 4. – С. 452–461.
4. 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. – No. 36. – №10. – С. 834–838.
5. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.

6. Белоусова О.В., Тимошенко Д.В., Куповых Г.В. Структура электрического поля в конвективно-турбулентном приземном слое атмосферы // Известия вузов. Северо-Кавказский. регион. Естественные науки. – 2024. – № 2.
7. Reiter R. Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity. – Elsevier: Amsterdam-London-New York-Tokyo, 1992. – 541 р.
8. Ваюшина Г.П., Куповых Г.В., Мартынов А.А., Соколенко Л.Г. и др. Результаты наблюдений за атмосферным электричеством на горной станции пик Чегет в Приэльбрусье // Труды ГГО. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1995. – Вып. 545. – С. 36–46.
9. Редин А.А., Куповых Г.В. К вопросу о происхождении глобальных и локальных вариаций электрического поля вблизи поверхности земли // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. – 2011. – № 1. – С. 87–90.
10. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 51. – №. 6. – С. 710–715.
11. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Вариации атмосферного электрического поля на высокогорных пунктах наблюдений // ДАН, Геофизика. – 2015. – Т. 462. – № 2. – С. 213–216.