

УДК 551.594

Влияние электродного эффекта на суточные вариации электрического поля атмосферы в приземном слое

Г.В. Куповых[✉], Д.В. Тимошенко, А.Г. Клово, Т.В. Кудринская*

*Институт компьютерных технологий и информационной безопасности ЮФУ
347928, г. Таганрог, Ростовская обл., пер. Некрасовский, 44, ГСП-17А*

Поступила в редакцию 11.05.2023 г.;
после доработки 4.07.2023 г.;
принята к печати 24.08.2023 г.

Для решения общих и специальных задач наземного мониторинга электрического поля атмосферы необходимо выделение глобальных факторов на фоне локальной изменчивости получаемых данных. Глобальная унитарная вариация потенциала ионосферы, наблюдаемая в суточном ходе электрического поля, искажается за счет электродного эффекта вблизи поверхности земли. Установлено, что структура образующегося электродного слоя сильно зависит от степени турбулентного перемешивания, удельной проводимости воздуха и высоты измерений электрического поля. Для моделирования суточного хода напряженности электрического поля использовано уравнение для полного электрического тока, вытекающее из теории электродного эффекта приземного слоя атмосферы. Результаты проведенных исследований могут быть полезны для решения ряда прикладных задач геофизики, в частности мониторинга электрического поля атмосферы.

Ключевые слова: электрическое поле, атмосфера, приземный слой, электродный эффект, проводимость, турбулентный перенос, суточные вариации; electric field, atmosphere, surface layer, electrode effect, conductivity, turbulent transport, diurnal variations.

Введение

Глобальная атмосферно-электрическая цепь схематически представляется как контур, включающий в себя проводящие слои ионосферы, атмосферы и земной поверхности [1]. Основным источником тока являются грозовые генераторы, действующие в экваториальной зоне, которые поддерживают баланс токов зарядки и разрядки, существование атмосферного электрического поля и обуславливают его пространственно-временную структуру [1–5]. Несколько меньший вклад в вариации электрического поля дают магнитосферный генератор в высокоширотной зоне и ионосферное динамо [1–3].

Унитарная вариация электрического поля (кривая Карнеги) с минимумом в 04:00–05:00 UTC и максимумом в 18:00–20:00 UTC — основное подтверждение функционирования глобального токового генератора в атмосфере [4–8]. Кривая Карнеги явилась результатом наблюдений над океаном, где влияние электрических свойств земной поверхности минимально. На вариации электрического поля в континентальных пунктах наблюдений сильно влияют локальные факторы, прежде всего аэрозольное

загрязнение приземного воздуха. Но даже там, где отсутствует значительное антропогенное воздействие, например в высокогорных условиях, происходит смещение суточного хода электрического поля и появляются дополнительные экстремумы, положения во времени которых зависят от метеоусловий в приземном слое [9, 10]. Кроме этого на потенциал ионосферы влияет действующий в пограничном слое атмосферы конвективный токовый генератор [11]. Таким образом, вариации атмосферного электрического поля в приземном слое, с одной стороны, носят глобальный характер, а с другой — обусловлены действием множества локальных факторов (аэрозольные примеси, турбулентное перемешивание, радиационный фон, ионизация приземного воздуха).

Электродным эффектом называют процесс или совокупность процессов, происходящих вблизи электрода, который помещен в ионизированную среду, и приводящих к появлению зависимости электрических характеристик атмосферы от расстояния до поверхности электрода вблизи него. В атмосферном электричестве электродом считают поверхность Земли. Электродный эффект является ключевым механизмом, формирующим электрические характеристики приземного слоя атмосферы [12]. Высота приземного слоя существенно зависит от интенсивности турбулентного перемешивания приземного воздуха, при этом в пределах слоя могут происходить значительные изменения параметров электрического поля [13, 14].

* Геннадий Владимирович Куповых (kupovykh@sfedu.ru); Дмитрий Владимирович Тимошенко (dmitrytim@yandex.ru); Александр Георгиевич Клово (klovo_ag@mail.ru); Татьяна Владимировна Кудринская (tvkudrinskaya@sfedu.ru).

В работах [15–17] показано, что изменения значений коэффициента турбулентного перемешивания в течение суток могут создавать локальные возмущения в электрическом поле, равные по значению его глобальной унитарной вариации. В публикациях [2, 3] теоретически исследованы процессы изменения электрического поля атмосферы при включении или выключении токового источника. Выявлен сдвиг по времени между колебаниями значений плотности электрической тока и потенциала ионосферы, который является следствием разной проводимости воздуха в различных географических районах. В приземном слое также обнаружен сдвиг по фазе между временным ходом электрического поля и изменениями глобального электрического тока [18].

В работах [19–22] получены аналитические решения уравнения для полного электрического тока в области действия электродного эффекта. Анализ решений показал, что при различной толщине классического электродного слоя колебания электрического поля и тока совпадают по времени, но различаются по амплитуде. В устойчиво стратифицированном приземном слое с увеличением степени турбулентного перемешивания происходит смещение на 2–3 ч максимумов и минимумов суточной вариации электрического поля относительно колебаний плотности тока.

Цель настоящей работы – методами математического моделирования исследовать влияние параметров электродного эффекта в приземном слое на суточный ход электрического поля вблизи поверхности земли в различных условиях.

Методы исследования

Уравнение для плотности полного вертикального электрического тока в турбулентном электродном слое [12–14] может быть представлено (в системе СГС) в виде [22]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + 4\pi\lambda(z)E - D_T(z, t)\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = 4\pi j(t), \quad (1)$$

т.е. плотность полного вертикального тока j определяется током проводимости (второе слагаемое в уравнении (1), турбулентным током (третье слагаемое) и скоростью изменения электрического поля (первое слагаемое). Здесь E – напряженность электрического поля, λ – электрическая проводимость воздуха, $D_T(z, t)$ – коэффициент турбулентной диффузии; t – время; z – высота наблюдения.

Глобальные вариации полного электрического тока определяются изменениями во времени потенциала ионосферы, обусловленного в основном действиями грозových токовых генераторов. Временной ход напряженности электрического поля зависит от вариаций полного тока, а его вертикальный профиль – от локальных параметров электродного слоя.

В классическом (нетурбулентном) электродном слое колебания электрического поля и тока совпадают по времени, но различаются по амплитуде в зависимости от параметров атмосферы [22].

Для решения уравнения (1) в турбулентном случае запишем граничные и начальные условия:

$$E|_{z \rightarrow 0} = E_0, \quad E|_{t=0} = E(0, z),$$

$$\left. \left(\frac{\partial E}{\partial t} + 4\pi\lambda E \right) \right|_{z \rightarrow \infty} = 4\pi j_0(t). \quad (2)$$

Закон суточного изменения плотности электрического тока зададим в виде гармонической функции

$$j(t) = j_0(1 - \alpha \sin(\omega t)), \quad \omega = 2\pi/T. \quad (3)$$

Соотношения (1)–(3) представляют собой математическую модель турбулентного электродного эффекта в приземном слое атмосферы.

При $\alpha = 0,2$ и $T = 24$ ч функция $j(t)$ имеет вид волны с амплитудой 20% (отклонения от среднего значения) с минимумом в 06:00 UTC и максимумом в 18:00 UTC, что достаточно хорошо согласуется с унитарной вариацией потенциала ионосферы [4, 5–8, 22].

В работе [22] в предположении постоянных значений электрической проводимости воздуха ($\lambda = \text{const}$) и коэффициента турбулентного переноса ($D_T = D_0 = \text{const}$) методом Фурье [23] решена задача (1), (2) в турбулентном электродном слое. Суточный ход напряженности электрического поля вследствие заданной функции вариации плотности электрического тока (3) на его верхней границе имеет вид

$$E(t) = E_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{A}{(2n-1)L((D_0\mu_n + 4\pi\lambda)^2 + \omega^2)} \right) \right] \times$$

$$\times \sin \frac{\pi(2n-1)}{2L} z,$$

$$A = 6,4 j_0 \left(\sin(\omega t)(D_0\mu_n + 4\pi\lambda) - \omega \cos(\omega t) + \omega e^{-(D_0\mu_n + 4\pi\lambda)t} \right),$$

$$\mu_n = \left(\frac{\pi(2n-1)}{2L} \right)^2, \quad (4)$$

где E_0 – напряженность электрического поля в начальный момент времени; L – характерная высота турбулентного электродного слоя; μ_n – собственные числа задачи.

Полученная зависимость (4) дает не только общее представление о поведении электрического поля, но и содержит множество параметров модели, определяемых электродным эффектом вблизи поверхности земли. Локальные вариации электрического поля в приземном слое могут быть обусловлены объемным зарядом вследствие электродного эффекта и влиянием турбулентного переноса.

Результаты и обсуждение

Используя выражение (4), исследуем пространственно-временные закономерности электрического поля за счет варьирования следующих параметров

модели: характерная толщина турбулентного электродного слоя L , высота измерения электрического поля z , электрическая проводимость воздуха λ и коэффициент турбулентной диффузии D_0 .

Промоделируем вариацию электрического поля на разных высотах над уровнем земли. Отметим, что, согласно принятой практике атмосферно-электрических наблюдений [10, 22], измерительные приборы обычно устанавливаются на земле или на небольшой высоте (z от нуля до нескольких метров). Напряженность электрического поля в условиях «хорошей погоды» меняется от десятков до сотен вольт на метр вследствие орографии местности и разных метеорологических условий [9, 10, 22]. Полученные вариации электрического поля (стандартного для равнины [12, 13] и усиленного, например, в горах [9, 10, 12]) на разной высоте представлены на рис. 1.

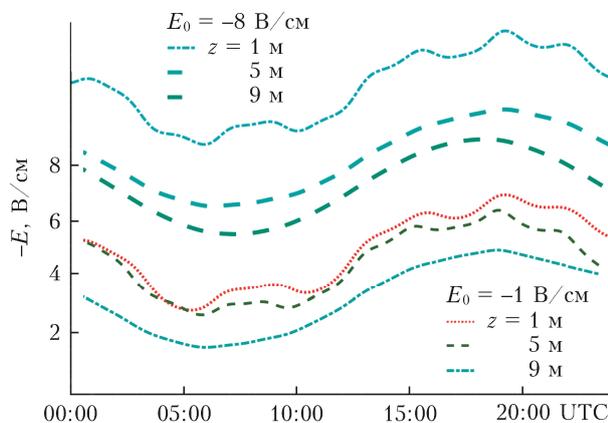


Рис. 1. Суточная вариация стандартного и сильного электрического поля на разных высотах относительно поверхности земли ($L = 10$ м) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.10>)

Сравнение вариаций напряженности электрического поля на различных высотах его измерения для случаев стандартного (-1 В/см) и сильного (-8 В/см) полей показывают, что с увеличением высоты в обоих случаях происходит общее сглаживание графика вариации (уходят второстепенные экстремумы) и уменьшение амплитуды вариаций (от 30–35% до примерно 15%). При этом временные координаты утреннего минимума и вечернего максимума сохраняются. Максимальное сглаживание происходит вблизи верхней границы электродного слоя, где вариация электрического поля практически повторяет изменения плотности тока [22].

Эффект общего сглаживания кривой вариации становится еще более выраженным в сильном электрическом поле, что можно объяснить преобладанием классического электродного эффекта над турбулентным. В целом электродный эффект ослабевает с высотой, что приводит к уменьшению амплитудных вариаций электрического поля.

Рассмотрим вопрос о влиянии электрической проводимости воздуха на структуру вариации электрического поля. В результате моделирования по-

лучено, что с увеличением λ от $2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ наблюдается усиление амплитуды суточных вариаций электрического поля от 15 до 35% при максимальной проводимости (рис. 2). Происходит сглаживание кривой вариации (исчезают промежуточные экстремумы, вызванные наличием турбулентного члена). При этом время суточных экстремумов напряженности электрического поля сохраняются.

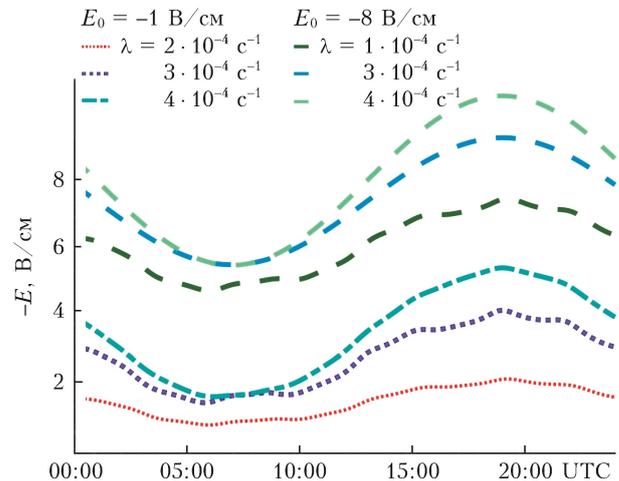


Рис. 2. Суточная вариация электрического поля на высоте 1 м в зависимости от электрической проводимости воздуха ($L = 10$ м) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.10>)

Перечисленные эффекты отчетливее проявляются в случае сильного электрического поля (-8 В/см), что является следствием усиления классического электродного эффекта (т.е. электрического поля) в сравнении с турбулентным переносом при фиксированных значениях параметров последнего.

Наиболее интересен вопрос о влиянии степени турбулентного перемешивания на пространственно-временные характеристики электрического поля. Коэффициент турбулентного переноса D_0 рассматривался в диапазоне от нормальных ($0,01 \text{ м}^2/\text{с}$) до повышенных значений ($0,1 \text{ м}^2/\text{с}$). В случае стандартного электрического поля (-1 В/см) усиление турбулентного переноса привело к значительному временному смещению суточных экстремумов: при высоких значениях D_0 смещение утренних минимумов достигает четырех часов в сторону полудня, а смещение вечерних максимумов — трех часов в сторону полуночи. Также увеличиваются амплитуды вариаций электрического поля (рис. 3). В сильном электрическом поле (-8 В/см) не наблюдаются дополнительные изменения ни по времени, ни по амплитуде. Следовательно, причиной амплитудных и временных изменений в данном случае является турбулентный электродный эффект.

Рассмотрим влияние толщины (высоты) электродного слоя. Известно [3, 12], что существует пропорциональная зависимость между величиной D_0 и максимальным значением L . Поэтому наряду с анализом рассмотренных выше параметров ниже

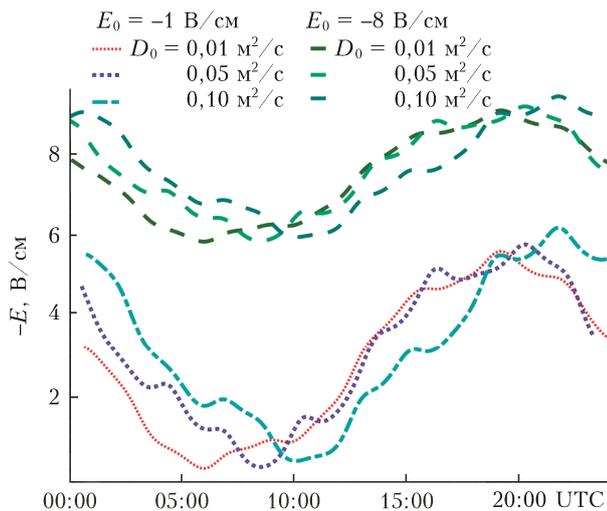


Рис. 3. Суточные вариации электрического поля на высоте 1 м в зависимости от турбулентного переноса (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.10>)

приведены результаты моделирования вариации различных электрических полей при $D_0 = 0,01 \text{ м}^2/\text{с}$ (рис. 4).

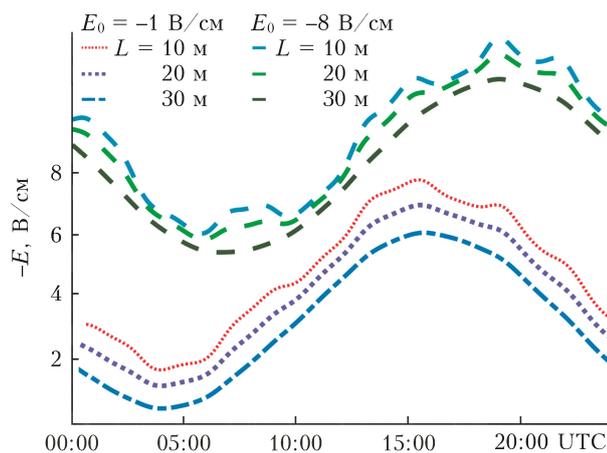


Рис. 4. Суточные вариации электрического поля на высоте 1 м при разных значениях L (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.10>)

Анализ кривых для $E_0 = -1 \text{ В/см}$ показывает, что с увеличением L происходит сглаживание кривой вариации, при этом амплитудные и временные характеристики сохраняются. В случае сильного электрического поля $E_0 = -8 \text{ В/см}$ сглаживание кривой вариации с высотой более заметно, что объясняется увеличением влияния классического электродного эффекта. Суточный ход моделируемого электрического поля становится ближе к глобальной унитарной вариации.

Заключение

Рассмотренная математическая модель глобального суточного хода электрического поля в приземном слое атмосферы показала существенное влия-

ние локальных параметров электродного слоя не только на его значения, но и на временную структуру вариаций. На напряженность электрического поля влияет тип (классический или турбулентный) электродного эффекта, толщина электродного слоя, высота измерений, значения проводимости воздуха и интенсивность турбулентного переноса. Все перечисленные локальные факторы создают возмущения электрического поля, сопоставимые с глобальной унитарной вариацией, и в значительной степени меняют ее пространственно-временные характеристики в области действия электродного эффекта у поверхности земли.

Полученные результаты представляют интерес при решении задач электродинамики приземного слоя атмосферы.

Список литературы

1. Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 394–408.
2. Морозов В.Н. Модель нестационарного электрического поля в нижней атмосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2005. Т. 45, № 2. С. 268–278.
3. Морозов В.Н., Кутовых Г.В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя. СПб.: Астерион, 2017. 307 с.
4. Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180, № 5. С. 527–534.
5. Williams E.R., Mareev E.A. Recent progress on the global electrical circuit // Atmos. Res. 2014. V. 135–136. P. 208–227.
6. Liu C., Williams E.R., Zipser E.J., Burns G. Diurnal variation of global thunderstorms and electrified shower clouds and their contribution to the global electrical circuit // J. Atmos. Sci. 2010. V. 67, N 2. P. 309–323.
7. Mach D.M., Blakeslee R.J., Bateman M.G. Global electric circuit implications of combined aircraft storm electric current measurements and satellite-based diurnal lightning statistics // J. Geophys. Res. 2011. V. 59, N 1. P. 183–204.
8. Harrison R.G. The Carnegie curve // Surv. Geophys. 2013. V. 34, N 2. P. 209–232.
9. Аджиев А.Х., Кутовых Г.В. Вариации атмосферного электрического поля на высокогорных пунктах наблюдений // Докл. РАН. Геофизика. 2015. Т. 462, № 2. С. 213–216.
10. Аджиев А.Х., Кутовых Г.В. Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2015. Т. 51, № 6. С. 710–715.
11. Мареева О.В., Мареев Е.А., Калинин А.В., Жидков А.А. О роли конвективного генератора в глобальной электрической цепи // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 21. С. 115–118.
12. Кутовых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
13. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V. Electrodynamical processes models in atmospheric surface layer // CATPID-2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 698. 8 p.

14. Свидельский С.С., Литвинова В.С., Куповых Г.В., Клово А.Г. Формирование структуры атмосферного электродного слоя // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2020. № 5. С. 130–141.
15. Kurovykh G.V. Global variations of ionospheric potential in surface layer // Proc. 11th International Conference on Atmospheric Electricity. Alabama, 1999. P. 555–558.
16. Редин А.А., Куповых Г.В. К вопросу о происхождении глобальных и локальных вариаций электрического поля вблизи поверхности земли // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2011. № 1. С. 87–90.
17. Зайнетдинов Б.Г., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Формирование суточных вариаций атмосферного электрического поля вблизи поверхности Земли в различных метеорологических условиях // Тр. Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. Вып. 674. Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. 2020. С. 176–180.
18. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 114 с.
19. Клово А.Г., Куповых Г.В., Свидельский С.С., Тимошенко Д.В. Моделирование глобальных вариаций электрического поля в приземной атмосфере // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. Вып. 662. Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. 2018. С. 37–41.
20. Kurovykh G., Klovo A., Timoshenko D. The atmospheric electric field variations in the surface layer // Rus. Open Conf. on Radio Wave Propagation (RWP), 1–6 July 2019, Kazan. IEEE, 2019. P. 580–583.
21. Kurovykh G.V., Timoshenko D.V., Kudrinskaya T.V., Klovo A.G. Modeling of the atmospheric electric field local variations in the turbulent surface layer // J. Phys.: IOP Conf. Ser. 2020. V. 1604. P. 012003
22. Аджиев А.Х., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2021. Т. 57, № 4. С. 452–461.
23. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. СПб.: Лань, 2003. 831 с.

G.V. Kurovykh, D.V. Timoshenko, A.G. Klovo, T.V. Kudrinskaya. Electrode effect action on the daily variation in atmospheric electric field in surface air layer.

To solve general and special problems of ground-based monitoring of the atmospheric electric field, it is necessary to identify global factors against the local variability of the monitoring data. The global unitary variation in the ionospheric potential, observed in the daily variation in the electric field, is distorted under the electrode effect near the earth's surface. The structure of the resulting electrode layer strongly depends on the degree of turbulent mixing, the specific conductivity of air, and the altitude of electric field measurement. Based on the equation for the total electric current, which follows from the theory of electrode effect of the surface air layer, we simulated daily variations in the electric field at different altitudes under different meteorological conditions. They revealed the dependence of the position and magnitude of the global extreme points of the electric field on the turbulent mixing coefficient, the electrical conductivity of air, and the electrode layer altitude. Our results can be useful for solving applied problems in geophysics, in particular, atmospheric electric field monitoring.