

Суточная динамика напряженности электрического поля в турбулентном приземном слое под действием локальных факторов

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

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

Поступила в редакцию 22.05.2024;
после доработки 03.09.2024;
принята к печати 04.09.2024

Настоящая работа посвящена исследованию влияния суточной динамики турбулентных процессов в приземном слое атмосферы на суточную динамику напряженности электрического поля в этом слое. Согласно существующей практике моделирования электродного приземного слоя атмосферы при наличии турбулентных процессов коэффициент турбулентной диффузии в пределах электродного слоя является функцией высоты и имеет стационарный характер; задается такая зависимость исходя из гидродинамических представлений. Предложена математическая модель динамики напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы в случае турбулентного электродного эффекта. Основным уравнением модели служит уравнение полного тока в приземном слое, полученное в приближении сильного турбулентного перемешивания и описывающее электродинамику этого слоя как результат действия совокупности локального и глобального токовых генераторов. Рассматривается нестационарный характер турбулентного обмена с целью подтверждения ранее выявленных авторами эффектов в суточной динамике напряженности электрического поля приземного слоя в условиях стационарной турбулентности. Для описания суточной динамики турбулентных процессов использованы данные градиентных измерений в высокогорных условиях Приэльбрусья. Получена зависимость коэффициента турбулентной диффузии от времени, с учетом которой в результате решения уравнения полного тока найдено уточненное выражение для суточной динамики напряженности поля. Установлено появление сдвига по времени суточных экстремумов, изменение их амплитуды и возникновение дополнительных экстремумов, зависящих от значений электрического поля. Все перечисленные эффекты сопоставимы с глобальной унитарной вариацией и увеличиваются с усилением напряженности электрического поля. Результаты исследований могут быть полезны для решения ряда прикладных задач геофизики, в частности мониторинга электрического поля атмосферы и анализа данных атмосферно-электрических измерений.

Ключевые слова: приземный слой, атмосфера, турбулентная диффузия, электродный слой, электрическое поле; surface layer, atmosphere, turbulent diffusion, electrode layer, electric field.

Введение

Суточная динамика напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы определяется множеством факторов, которые можно разделить на глобальные, зависящие от параметров глобальной электрической цепи, и локальные, зависящие от географических (широта, высота над уровнем моря) и метеорологических параметров [1–4]. В работах [5–7] теоретически исследованы суточные вариации напряженности электрического поля в турбулентном приземном слое вследствие изменений во времени значений глобального тока, которые

повторяют по характеру полученную экспериментально кривую Карнеги [8, 9]. Из общих уравнений электродного эффекта [5] следует уравнение для полного электрического тока, содержащее коэффициент турбулентной диффузии в качестве множителя при старшей производной напряженности электрического поля. В указанных работах основное внимание уделялось изучению влияния глобальной унитарной вариации на суточный ход напряженности электрического поля приземного слоя. Интенсивность турбулентного переноса рассматривалась фиксированной в пределах электродного слоя (приземного слоя атмосферы высотой до 30 м, где наблюдается электродный эффект). С целью представления различных случаев турбулентного переноса в пределах электродного слоя брались различные значения коэффициента турбулентной диффузии, приводившие к временным сдвигам утреннего

* Дмитрий Владимирович Тимошенко (dmitrytim@yandex.ru); Геннадий Владимирович Куповых (kupovykh@sfnu.ru); Татьяна Владимировна Кудринская (tvkudrinskaya@sfnu.ru).

и вечернего экстремумов на графике напряженности поля и изменению временных и амплитудных значений указанных экстремумов с ростом турбулентности. Их временное смещение наблюдалось относительно характеристик суточного хода плотности полного тока. Диапазон смещений составлял от 1 до 3 ч [5–7]. Наличие турбулентных явлений в приземном слое атмосферы влияет на оптические свойства нижних слоев атмосферы, создавая неоднородность плотности воздушных слоев [10]. В частности, термически наведенная турбулентность в атмосфере ведет к изменению характеристик распространения лазерного излучения [11]. Отдельно необходимо отметить влияние на оптические и электрические свойства приземной атмосферы процессов турбулентной диффузии в сочетании с наличием аэрозольных частиц [12].

Возникает необходимость более детального изучения описанных особенностей поведения напряженности поля, установления их точных причин. Это, в свою очередь, требует уточнения исследуемой математической модели путем обоснования и включения в модель закономерности, отражающей реальное поведение коэффициента турбулентной диффузии в течение суток в результате анализа экспериментальных данных.

Цель настоящей работы – исследование влияния нестационарных турбулентных процессов в приземном слое атмосферы на суточную динамику напряженности электрического поля вблизи поверхности земли.

Экспериментальные данные

В качестве основы для выявления экспериментальной закономерности суточного изменения коэффициента турбулентной диффузии использованы данные градиентных измерений (160) температуры и скорости ветра для пунктов, расположенных в высокогорной зоне Приэльбрусья.

На основе анализа временных рядов значений коэффициента турбулентной диффузии D с перио-

дом в одни сутки для первой гармоники были рассчитаны амплитудные и фазовые значения и проведена оценка ее вклада в среднесуточную дисперсию D . Временные ряды для D составлялись в рамках модели планетарного пограничного слоя Л.Р. Орленко [13]. Толщина приземного слоя предполагалась в диапазоне от 0,5 до 2 м. Соотношение, описывающее вариации интенсивности турбулентных процессов в приземном слое в течение суток, имеет вид

$$D = D_0 + A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right) + B \cdot \cos\left(\frac{\pi}{12}t\right), \quad (1)$$

где $D_0 = 0,053 \text{ м/с}^2$ – среднее значение коэффициента турбулентной диффузии (экспериментально определенное для всего периода измерений); t – время, ч; $A = -0,028 \text{ м/с}^2$ и $B = -0,043 \text{ м/с}^2$ – коэффициенты (фаза 2,2).

Следует отметить, что первая гармоника (соответствующая суточной компоненте) ряда значений скорости ветра учитывает 80–90% от общей дисперсии (т.е. суммарного изменения данной величины), что явно свидетельствует о наличии периодической (суточной) компоненты в рядах D .

На рис. 1 показан суточный ход, усредненный за период наблюдений (экспериментальные точки), и кривая, смоделированная с помощью гармонического анализа с учетом первой гармоники (сплошная линия). Данные приведены для района наблюдения на горной метеостанции Пик Чегет (3040 м н.у.м., Приэльбрусье). Видно, что турбулентные процессы в приземном слое достигают максимальной интенсивности в районе полудня. Это объясняется максимумом потока солнечной энергии на земную поверхность, который является одним из факторов формирования воздушных потоков в атмосфере в это время суток. При этом данный максимум отличается по времени от суточного максимума напряженности электрического поля под действием глобальной вариации потенциала ионосферы, который имеет место в период с 20:00 до 21:00 местного времени [3]. Такое несовпадение интенсивности действия

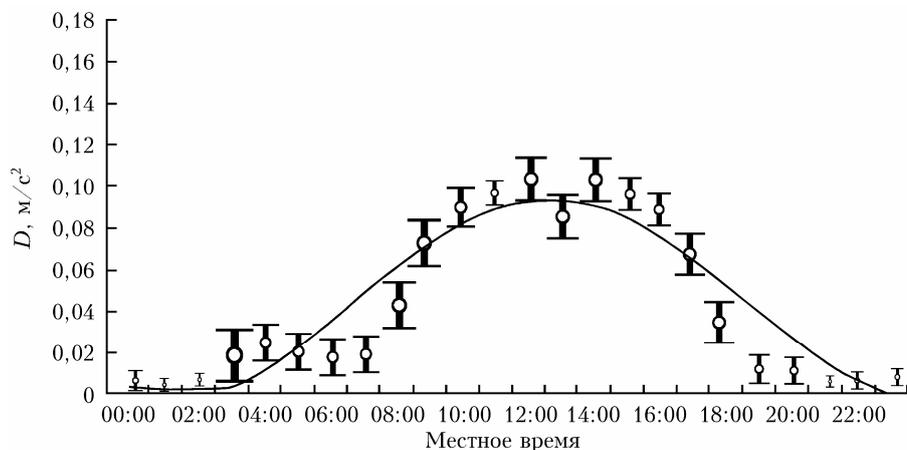


Рис. 1. Суточный ход коэффициента турбулентной диффузии в слое 0,5–2 м

глобального (грозового) и локального (турбулентного) токового генераторов в результате может приводить к изменению времени наступления суточных экстремумов напряженности электрического поля.

Построение и анализ модели

Поставим задачу определения пространственно-временной зависимости напряженности электрического поля $E(z, t)$ в приземном слое в случае нестационарного характера D , предполагая постоянство плотности тока на верхней границе электродного слоя. В этом случае уравнение полного тока в приземном слое можно записать в виде [5]:

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

где правая часть, представляющая собой полный ток j на верхней границе электродного слоя, является постоянной величиной; λ — электрическая проводимость воздуха, которую также примем постоянной; z — высота.

Начальные и граничные условия для уравнения (1) будем рассматривать в виде

$$E|_{t=0} = E_0 e^{-\frac{z}{L}}, \quad E|_{z=0} = E_0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_{z=z_\infty} = 0, \quad (3)$$

где E_0 — напряженность электрического поля у поверхности земли.

Теоретическую оценку характерной высоты турбулентного слоя можно сделать на основании представления коэффициента турбулентной диффузии как $D(z) = D_1 z$ (для нейтральной стратификации приземного слоя) и времени электрической релаксации как $\tau = (q\alpha)^{-1/2}$. Тогда получаем высоту $L = D_1 \tau = 10-30$ м (τ — время релаксации электрического поля — 250 с) при интенсивности ионообразования $q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, коэффициент рекомбинации аэроионов $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}$ для интенсивности турбулентного переноса $D_1 = 0,01-0,1 \text{ м/с}$.

В качестве закономерности, описывающей суточные вариации D , примем соотношение, аналогичное формуле (1):

$$D(t) = D_0 + A \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3)\right) + B \cos\left(\frac{\pi}{12}(t-3)\right), \quad (4)$$

где аргумент входящих в (4) функций берется в виде $(t-3)$ с целью обеспечить совпадение локальной временной шкалы пунктов наблюдения с часовым поясом по Гринвичу (UT). Представление коэффициента при старшей производной уравнения полного тока (2) функцией вида (4) превращает указанную формулу в уравнение с переменными коэффициентами. Для преобразования (1) воспользуемся известным соотношением

$$\begin{aligned} A \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3)\right) + B \cos\left(\frac{\pi}{12}(t-3)\right) &= \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3) + \varphi\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\varphi = -\arccos \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}$.

С учетом представления (4) исходное уравнение (2) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} - \left(D_0 + \sqrt{A^2 + B^2} \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3) + \varphi\right) \right) \times \\ \times \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + 4\pi\lambda E = 4\pi j. \end{aligned} \quad (6)$$

Дифференциальный оператор уравнения (6) относительно координаты удовлетворяет условиям Штурма—Лиувилля, поэтому начально-краевая задача (3)—(6) допускает решение методом разделения переменных [14]. Для приведения граничных условий (3) к однородным выполним замену $E - E_0 = E_1(z, t)$. Уравнение (6) при указанной замене имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_1}{\partial t} - \left(D_0 + \sqrt{A^2 + B^2} \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3) + \varphi\right) \right) \frac{\partial^2 E_1}{\partial z^2} + 4\pi\lambda E_1 = \\ = 4\pi(j - \lambda E_0), \end{aligned} \quad (7)$$

$$E_1|_{t=0} = E_0(e^{-z/L} - 1), \quad (8)$$

$$E_1|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial E_1}{\partial z} \right|_{z=L} = 0. \quad (9)$$

В результате получаем неоднородную начально-краевую задачу для уравнения параболического типа (7) относительно неизвестной функции $E_1(z, t)$ с неоднородным начальным условием (8) и однородными граничными условиями (9). Неизвестную функцию представим в виде ряда

$$E_1 = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \Phi_n(z), \quad (10)$$

где функции $\{\Phi_n(z)\}_{n=1}^{\infty}$ являются решением задачи Штурма—Лиувилля

$$-D_0 \frac{d^2 \Phi}{dz^2} = \mu \Phi(z) \quad (11)$$

с граничными условиями

$$\Phi(0) = \Phi(L) = 0. \quad (12)$$

Собственные числа и собственные функции задачи (7) имеют вид

$$\mu_n = \left(\frac{\pi(2n-1)}{2L} \right)^2, \quad \Phi_n(z) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{\pi(2n-1)}{2L} z. \quad (13)$$

Для определения функций $\{T_n(t)\}_{n=1}^{\infty}$ необходимы подстановка ряда (10) в уравнения (7) и начальные условия (8) (условия (9) выполняются автоматически). Соответствие коэффициентов при базисном наборе $\{\Phi_n(z)\}_{n=1}^{\infty}$ приводит к составлению следующей задачи Коши для определения функций $T_n(t)$:

$$T_n'(t) + D(t)\mu_n T_n(t) = \alpha_n \quad (14)$$

с начальным условием

$$T_n(0) = \beta_n, \quad (15)$$

где функции α_n и β_n представляют собой коэффициенты разложения соответственно начального условия (8) и правой части уравнения (7) по системе собственных функций $\{\Phi_n(z)\}_{n=1}^{\infty}$.

Решение неоднородной краевой задачи (7)–(9), описывающее суточные вариации электрического поля $E(z, t)$, задается рядом Фурье

$$E(t, z) = E_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{L}} \beta_n \times \\ \times \left(e^{-\left(\frac{\pi(2n-1)}{2L}\right)^2 \left(2t - \frac{1}{\omega} \sin \omega t\right)} + e^{-\left(2t - \frac{1}{\omega} \sin \omega t\right)} \right) \times \\ \times \int e^{-\left(\frac{\pi(2n-1)}{2L}\right)^2 \left(2t - \frac{1}{\omega} \sin \omega t\right)} dt \sin \frac{\pi(2n-1)}{2L} z. \quad (16)$$

Результаты моделирования

В соответствии с нашей методикой вначале рассмотрим поведение суточной вариации напряженности электрического поля, когда закон суточных вариаций $D(t)$ совпадает с унитарной вариацией (кривой Карнеги) [8, 9]:

$$D = D_0(2 - \cos(\omega t + \varphi_0)), \quad (17)$$

где начальную фазу φ_0 принимаем равной нулю. При выборе для D представления (17) оператор задачи (2)–(3) также является оператором Штурма–Лиувилля, а задача допускает решение методом Фурье. Подробно решение представлено в [3]. Суточный ход напряженности поля приземного слоя, полученный в результате решения, представлен на рис. 2. Из сравнения с кривой Карнеги (рис. 2) видно совпадение качественного характера суточной вариации напряженности поля и глобальной унитарной вариации.

Рис. 2 показывает, что учет нестационарного характера коэффициента турбулентной диффузии приводит к появлению равных по амплитуде, но смещенных по времени (с 09:00 к 07:00 UT) утреннего минимума и вечернего максимума (с 21:00 к 19:00 UT) в суточной вариации напряженности электрического поля относительно унитарной вариации.

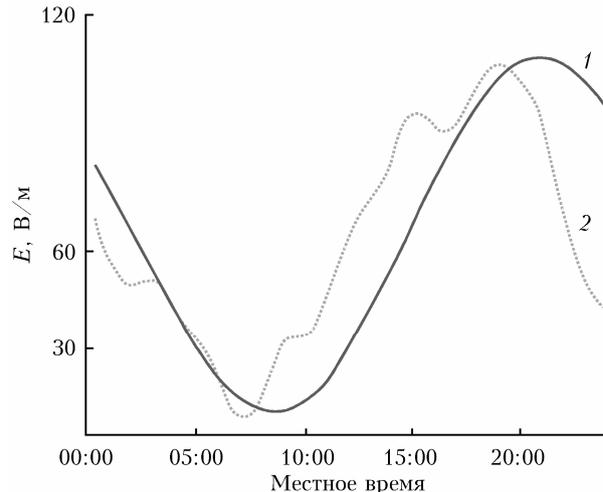


Рис. 2. Суточная вариация электрического поля на высоте 2 м: 1 — кривая Карнеги; 2 — расчетная вариация напряженности электрического поля

Перейдем к анализу результатов моделирования напряженности электрического поля в соответствии с соотношением (4). Этот случай является обобщением соотношения (17), поскольку параметры, входящие в выражение (4), как показано в [15, 16], принимают различные значения в разных пунктах наблюдения, поэтому профиль $E(z, t)$ также будет меняться в зависимости от места наблюдений. Суточный ход $E(z, t)$ в данном случае описывается решением (16), которое принимает вид [3, 17, 18]:

$$E(t) = E_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{32}{(2n-1)L} \times \right. \right. \\ \times \left. \left. \left(\frac{0,2j_0(\sin(\omega t)(D\mu_n + 4\pi\lambda) - \omega \cos(\omega t) + \omega e^{-(D\mu_n + 4\pi\lambda)t})}{(D\mu_n + 4\pi\lambda)^2 + \omega^2} \right) \right) \right] \times \\ \times \sin \frac{\pi(2n-1)}{2L} z. \quad (18)$$

В работе [3] проведена оценка скорости сходимости решения (18), показывающая, что для определения значений напряженности поля с точностью не ниже $o(z_2)$ достаточно взять три первых члена ряда (18).

Далее рассмотрим пример суточных вариаций электрического поля по формуле (4) со значениями параметров $D_0 = 0,053$; $A = -0,028$; $B = -0,043$. Дополнительно заметим, что высокогорным условиям соответствуют большие значения напряженности электрического поля вблизи поверхности наблюдения, поэтому рассмотрим значения E_0 в диапазоне от 200 до 500 В/м [19, 20]. На рис. 3 приведены локальные суточные вариации $E(z, t)$ и кривая Карнеги.

Анализ построенных локальных суточных вариаций электрического поля показывает усиление

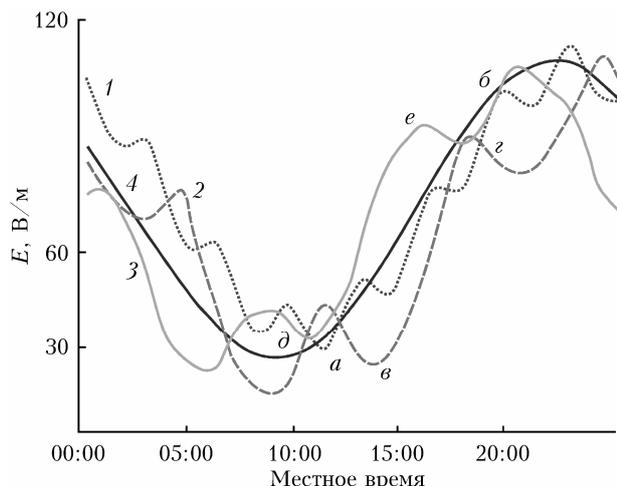


Рис. 3. Суточные вариации электрического поля на высоте 2 м в соответствии с (4): $E_0 = -200$ (1); -300 (2); -500 В/м (3); 4 — кривая Карнеги

отмеченных ранее эффектов: смещение по времени утреннего минимума и вечернего максимума, а также увеличение по амплитуде возникших дополнительных экстремумов: минимумы *а, в, д* на кривых 1, 2 и 3 и максимумы *б, г, е*, на кривых 1, 2 и 3 соответственно. С увеличением напряженности электрического поля описанные эффекты также возрастают.

Заключение

Для исследования суточной динамики напряженности электрического поля в условиях турбулентных процессов высокой интенсивности использована экспериментально найденная зависимость коэффициента турбулентной диффузии от времени. Данный подход применен авторами с целью подтверждения ранее выявленных особенностей поведения напряженности поля приземного слоя в случае стационарного характера турбулентной диффузии под действием глобальной унитарной вариации. Показано совпадение качественного характера выявленных особенностей: временных сдвигов утреннего и вечернего экстремумов, а также изменения амплитудных значений на суточном графике напряженности поля. Обнаружено появление дополнительных экстремумов на графике напряженности поля, не наблюдавшихся под действием глобальной унитарной вариации в случае стационарной турбулентной диффузии. Смещение экстремумов суточной вариации напряженности электрического поля по времени объясняется разными периодами интенсивности локальных и глобальных возмущений электрического поля.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Южного федерального университета.

Список литературы

1. Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 394–408.

2. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя. СПб.: Астерион, 2017. 307 с.

3. 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. DOI: 10.31857/S0002351521040027.

4. Шаталова М.В., Мареев Е.А., Клименко В.В., Кутерин Ф.А., Николл К.А. Экспериментальное исследование суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля // Изв. вузов. Радиофиз. 2019. Т. 62, № 3. С. 205–210.

5. 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. 2018. Вып. 662. С. 37–41.

6. Kurovukh G., Klovo A., Timoshenko D. The atmospheric electric field variations in the surface layer // Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), 1–6 July 2019. IEEE, 2019. P. 580–583. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810367.

7. Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В. Суточные и сезонные вариации невозмущенного электрического поля и их связь с изменчивостью геофизических величин на юге Западной Сибири // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 213–222.

8. 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.

9. Harrison R.G. The Carnegie curve // Surv. Geophys. 2013. V. 34, N 2. P. 209–232.

10. Носов В.В., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В. Доказательство гипотезы Хопфа о структуре турбулентности (памяти Татарского) // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 1. С. 12–18. DOI: 10.15372/AOO20230102.

11. Агафонцев М.В., Герасимова Л.О., Рейно В.В., Шестернин А.Н. Исследование конвективной турбулентности над нагретой поверхностью методом скоростной термографии // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 7. С. 584–590. DOI: 10.15372/AOO20230707.

12. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гуцин Р.А., Даценко О.И. Электрические процессы в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях // Оптика атмосф. и океана. 2024. Т. 37, № 6. С. 461–467. DOI: 10.15372/AOO20240603.

13. Орленко Л.Р. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 270 с.

14. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1999. 736 с.

15. Морозов В.Н. Влияние генераторов электрического поля, действующих в верхних слоях атмосферы на электричество приземного слоя // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 2022. № 605. С. 58–91.

16. Морозов В.Н. Распределение электрического поля, создаваемого ионосферным генератором, в нижних слоях атмосферы // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 2012. № 565. С. 205–215.

17. Калинин А.В., Григорьев Е.Е., Жидков А.А., Терентьев А.М. Классификация и свойства решений системы уравнений теории классического электродного эффекта // Изв. вузов. Радиофиз. 2013. Т. 56, № 11, 12. С. 829–852.

18. Калинин А.В., Слюняев Н.Н., Мареев Е.А., Жидков А.А. Стационарные и нестационарные модели глобальной электрической цепи: корректность, аналити-

ческие соотношения, численная реализация // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2014. Т. 50, № 3. С. 355–364.

19. *Mareev E.A., Volodin E.M.* Variation of the global electric circuit and ionospheric potential in a general

circulation model // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, N 24. P. 9009–9016.

20. *Pulinets S., Davidenko D.* Ionospheric precursors of earthquakes and global electric circuit // Adv. Space. Res. 2014. V. 53, N 5. P. 709–723.

D.V. Timoshenko, G.V. Kupovykh, T.V. Kudrinskaya. **Daily dynamics of the electric field in the turbulent surface air layer under the action of local factors.**

This work studies the effect of the daily dynamics of turbulent processes on the daily dynamics of the electric field in the surface air layer. When modeling, the coefficient of turbulent diffusion within the electrode layer is specified as a stationary function of altitude in view of hydrodynamic concepts. A mathematical model of the dynamics of the electric field intensity in the surface air layer in the case of a turbulent electrode effect is suggested. The main equation of the model is the equation of the total current in the surface layer, which has been derived in the approximation of strong turbulent mixing and describes the electrodynamics of the surface layer under the combined action of local and global current generators. The work examines the non-stationary nature of turbulent exchange in order to confirm the previously identified effects in the daily dynamics of the electric field strength in the surface layer under stationary turbulence. To describe the daily dynamics of turbulent processes, gradient measurements in high-altitude conditions of the Elbrus region were used. Processing of the measurement data enables deriving the time dependence of the turbulent diffusion coefficient from the solution of the total current equation. Taking into account this dependence, the expression for the daily dynamics of the field strength was refined. Time shifts of the daily extremes, a change in their amplitude, and the appearance of additional extremes depending on the electric field strength have been established. All these effects are comparable to the global unitary variation and increase with the electric field strength. The results can be useful for solving a number of applied geophysical problems, in particular, monitoring the electric field of the atmosphere and analyzing atmospheric-electrical measurement data.