

К ВОПРОСУ О ПРОИСХОЖДЕНИИ ЛОКАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Куповых Г.В., Болдырев А.С., Редин А.А., Левченко М.Н.

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия (Ростовская область, 347928, г. Таганрог, ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44), e-mail: boldyrev@sfedu.ru

В работе рассматривается вопрос о происхождении локальных вариаций атмосферного электрического поля вблизи поверхности земли. Рассмотрена система уравнений для моделирования нестационарных электрических процессов в горизонтально-однородном турбулентном приземном слое. Исследуется возможная причина локальных вариаций электрического поля в свободном от аэрозоля приземном слое по реальным экспериментальным данным, полученным на высокогорной станции пик Чегет. Теоретические расчеты показали возникновение дополнительного максимума электрического поля в период (06 - 09 UT) вследствие суточной вариации коэффициента турбулентной диффузии. Проводится сравнение экспериментальных данных и теоретических расчетов. Сделан вывод о том, что появление дополнительного максимума в суточном ходе электрического поля может быть обусловлено метеорологическими условиями.

Ключевые слова: электрическое поле, атмосфера, электродный эффект, суточный ход, эксперимент.

ABOUT GENERATION OF LOCAL VARIATIONS OF ELECTRIC FIELD NEAR THE SURFACE

Kupovykh G.V., Boldyrev A.S., Redin A.A., Levchenko M.N.

Southern Federal University, Taganrog, Russia (Rostov region, 347928, Taganrog, GSP-17A, Nekrasovsky 44), e-mail: boldyrev@sfedu.ru

The problem of generation of the atmospheric electric field local variations near the surface is observed in the paper. System of equations for non-stationary electric processes in horizontally-homogenous turbulent surface layer is described. The possible reason of electric field local variations in free of aerosol surface layer is investigated by the real experimental data received at the alpine station on the Peak Cheget. Theoretical calculations showed the generation of additional electric field maximum during (06–09 UT) period caused by day-variation of turbulent diffusion coefficient. The comparison of experimental data and theoretical results is made. It is stated that generation of additional maximum in diurnal electric field variation could be caused by meteorological conditions.

Keywords: electric field, atmosphere, electrode effect, diurnal variations, experiment.

Для моделирования нестационарных электрических процессов в горизонтально-однородном турбулентном приземном слое можно использовать следующую систему уравнений [1,5]:

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} n_{1,2} E) - \frac{\partial}{\partial z} \left[D_T(z, t) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right] = q - \alpha n_1 n_2, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = 4\pi e(n_1 - n_2),$$

где $n_{1,2}$ – объемная концентрация легких ионов (аэроионов), $b_{1,2}$ – их подвижность, E – напряженность электрического поля, D_T – коэффициент турбулентной диффузии аэроионов,

q – интенсивность ионообразования, α – коэффициент рекомбинации аэроионов, E_0 – значение напряженности электрического поля у поверхности земли.

Система (1) может быть приведена к следующему виду:

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

Вариации плотности электрического тока $j_o(t)$ определяются нестационарностью электрических полей выше приземного слоя, то есть обуславливаются глобальными вариациями потенциала ионосферы, вызываемыми грозowymi токовыми генераторами или генераторами, находящимися в верхних слоях атмосферы.

Пусть плотность электрического тока задается в виде: $j_o(t) = j_o e^{i\omega t}$. Если характерный временной масштаб изменения коэффициента турбулентного обмена много больше ω_o^{-1} , его можно считать постоянным во времени.

Для исследования влияния нестационарных турбулентных процессов на электрическое поле у поверхности земли предположим, что коэффициент турбулентного обмена $D_T(z, t)$ зависит от времени следующим образом [8]:

$$D_T(z, t) = D_1(1 - e^{-t/T})z, \quad (3)$$

Здесь T – характерное время протекания метеорологических процессов. Учитывая, что время жизни аэроиона ($\tau = (q_\infty \cdot \alpha)^{-1/2}$) составляет 250 с при $\omega\tau \ll 1$, уравнения (1) и (2) переходят в стационарные. Для ионизационно-рекомбинационных уравнений (1) условие квазистационарности выполняется всегда, то для уравнения (2), описывающего поведение напряженности электрического поля, это условие может не выполняться. Например, в условиях повышенной концентрации аэрозольных частиц в приземном слое время жизни тяжелого иона может составлять 1500–2000 с [2,7].

В случае $\tau > T$ рассмотрим квазистационарный вариант уравнений (1) и (2) в отсутствии аэрозольных частиц в атмосфере. В представлении (3) время t выступает как свободный параметр, принимающий значения от 1 ч до 12 ч, а для других характерные значения: $T = 3$ ч, $D_1 = 0,2$ м/с.

Полагая значения параметров в уравнениях (1) и (2) равными $b_1 = 1,2 \cdot 10^{-4}$, $b_2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$, $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $E_0 = -100 \text{ В м}^{-1}$. Граничные условия зададим в виде: $n_{1,2}(z = z_0) = 0$, $n_{1,2}(\infty) = (q/\alpha)^{1/2}$, $E(z = z_0) = E_0$, где $z_0 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – параметр шероховатости земной поверхности.

Расчитанные значения электрических характеристик в приземном слое представлены в виде значений на высотах 0,01; 0,1; 1 и 10 м у поверхности земли (таблица 1).

В целом анализ полученных решений свидетельствует о переходе электрической структуры приземного слоя от классического ($n_2 < n_1$) к турбулентному ($n_2 \approx n_1$) электродному эффекту [1,5,9] при значениях турбулентной диффузии выше $0,05 \text{ м}^2/\text{с}$. Временной ход коэффициента турбулентной диффузии особенно сильно проявляется в значениях $n_{1,2}$ вблизи поверхности до высот не более метра. На высоте 1 м и выше концентрация положительных аэроионов становится практически постоянной. Электродный эффект ($E(z)/E_\infty$) начинает заметно меняться в пределах 10 % на высотах 0,1–1 м. Поведение концентраций отрицательных аэроионов полностью определяется электрическим полем [2].

Таблица 1

Значения электрических параметров вблизи поверхности земли при коэффициенте турбулентной диффузии (5.35)

$t, \text{ ч}$	1	2	3	6	9	12
$n_1 \times 10^{-9}, \text{ ионов}/\text{м}^3,$ $z = 0,01 \text{ м}$	0,69	0,31	0,3	0,18	0,15	0,14
$n_2 \times 10^{-9}, \text{ ионов}/\text{м}^3,$ $z = 0,01 \text{ м}$	0,08	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
$E/E_\infty,$ $z = 0,01 \text{ м}$	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27
$n_1 \times 10^{-9}, \text{ ионов}/\text{м}^3,$ $z = 0,1 \text{ м}$	2,1	1,35	0,99	0,73	0,65	0,59
$n_2 \times 10^{-9}, \text{ ионов}/\text{м}^3,$ $z = 0,1 \text{ м}$	0,93	0,51	0,31	0,22	0,19	0,18
$E/E_\infty,$ $z = 0,1 \text{ м}$	2,23	2,26	2,29	2,29	2,31	2,31
$n_1 \times 10^{-9}, \text{ ионов}/\text{м}^3,$ $z = 1 \text{ м}$	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1

$n_2 \times 10^{-9}$, ионов/ м^3 , $z = 1\text{м}$	1,51	1,66	1,73	1,76	1,79	1,81
E/E_∞ , $z = 1\text{м}$	1,94	2,02	2,08	2,11	2,12	2,12
$n_1 \times 10^{-9}$, ионов/ м^3 , $z = 10\text{м}$	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
$n_2 \times 10^{-9}$, ионов/ м^3 , $z = 10\text{м}$	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
E/E_∞ , $z = 10\text{м}$	1,25	1,39	1,48	1,55	1,59	1,6

Исследуем возможную причину локальных вариаций электрического поля в свободном от аэрозоля приземном слое по реальным экспериментальным данным, полученным на высокогорной станции пик Чегет [3,4,10]. В зимнее время (декабрь – апрель) суточный ход электрического поля имеет утренний минимум (00 - 03) UT и вечерний максимум (15 - 21) UT, так же как и кривая Карнеги [1]. В летние месяцы (июнь – сентябрь) вечерний максимум смещается к (18 - 21) UT, и появляется второй максимум в (06 - 09) UT (см. таблица 2, строки 2,3). Концентрация аэрозольных частиц при этом не превышает 10^9 м^{-3} , и скорость ионизации в атмосфере около 20 пар ионов/ $\text{м}^3\text{с}$ [6].

Средние значения коэффициента турбулентности, рассчитанные по метеорологическим данным, составили $0,08-0,09 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$ на высоте одного метра от поверхности земли, причем зимой значения коэффициента практически постоянны, тогда как летом коэффициент турбулентности имеет суточный ход (таблица 2, строка 4). Все расчеты проделаны для условий «хорошей погоды».

Атмосферно-электрические наблюдения над океаном происходят в условиях близких к классическому электродному эффекту (горизонтальная скорость ветра невелика) при постоянной ионизации воздуха и практическом отсутствии аэрозольных частиц. Характерная толщина классического электродного слоя составляет 2–3 метра. Среднее значение электродного эффекта (E/E_∞) равно 1,4 на высоте 1 метр и 1,1 на высоте 2 метра. Эти соотношения почти не зависят от значений электрического поля на верхней границе электродного слоя. В таких условиях унитарная вариация хорошо проявляется по данным измерений (таблица 1, строка 1).

Континентальные наблюдения за атмосферным электричеством обычно проводятся в условиях действия турбулентного электродного эффекта. При этом вариации интенсивности ионообразования и концентрации аэрозольных частиц в атмосфере оказывают существенное влияние на электрическое состояние приземного слоя [6]. Однако ни влияние аэрозоля, ни

действие атмосферной радиоактивности не могут быть причиной устойчивых периодических возмущений электрического поля, тогда как суточные вариации коэффициента турбулентности обуславливают локальную изменчивость электрических параметров вблизи поверхности земли.

Летние значения коэффициента турбулентности, рассчитанные для пика Чегет, приведены в таблице 2, строка 4. В этот период вариации метеорологических величин наиболее значительны, по сравнению с зимними месяцами. Используя квазистационарный вариант системы (1), промоделирована унитарная вариация электрического поля на высоте 1 метра, где обычно устанавливаются датчики. Рассчитанные значения электродного эффекта и электрического поля на высоте 1 метр приведены там же (строки 5,6).

Таблица 2

Суточные вариации электрического поля и коэффициента турбулентной диффузии (высота 1 м от поверхности) на пике Чегет

N	UT	00-03	03-06	06-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-00
1.	$E/\langle E \rangle$	0,9	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,0
2.	$E/\langle E \rangle$	0,7	0,8	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,0
3.	$E/\langle E \rangle$	0,8	0,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0
4.	D	0.04	0.10	0.18	0.16	0.12	0.10	0.03	0.03
5.	E/E_{∞}	1,9	2,1	2,4	2,2	2,1	2,1	1,8	1,8
6.	$E/\langle E \rangle$	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,1

Обозначения: строка 1 – кривая Карнеги; 2 – апрель; 3,4 – август – сентябрь; 5 – электродный эффект, соответствующий значениям D ; 6 – электрическое поле на высоте 1 м, соответствующее значениям D ; $\langle E \rangle$ – среднесуточное значение.

Теоретические расчеты показывают возникновение дополнительного максимума электрического поля в период (06 - 09 UT) вследствие суточной вариации коэффициента турбулентной диффузии.

Таким образом, сравнение экспериментальных данных и теоретических расчетов позволяет сделать вывод, что появление дополнительного максимума в суточном ходе электрического поля может быть обусловлено метеорологическими условиями. Этот эффект может проявляться на континентальных пунктах наблюдения, в условиях турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы.

Список литературы

1. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. 137 с.
2. Болдырев А.С., Клово А.Г., Куповых Г.В. О взаимодействии аэрозольных частиц с аэроионами в приземном слое атмосферы // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2006. Т. 64. № 9–2. С. 63-64.
3. Ерохин В.Н., Канаев А.С., Куповых Г.В. и др. Анализ результатов синхронных измерений E в Приэльбрусье и на Кольском полуострове // Результаты исследований по международным геофизическим проектам. Магнитосферные исследования. М., 1990. № 15. С. 44-47.
4. Кудринская Т.В., Болдырева К.А., Новикова О.В., Пестов Д.А., Болдырев А.С., Редин А.А., Князева З.М. Исследование вариаций атмосферного электрического поля на разных уровнях у земли // Научная мысль Кавказа. 2012. № 4. С. 95-98.
5. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
6. Новикова О.В., Редин А.А., Болдырев А.С., Болдырева К.А., Пестов Д.А. Электродинамическая модель приземного слоя атмосферы с учетом массопереноса радона в грунте и над поверхностью земли // Научная мысль Кавказа. 2012. № 4. С. 98-102.
7. Редин А.А., Куповых Г.В., Клово А.Г., Болдырев А.С. Математическое моделирование электродинамических процессов в приземном слое в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. Т. 121. № 8. С. 111-121.
8. Boldyrev A., Kupovykh G., Redin A. Surface layer electrodynamic structure according to the meteorological state. Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Electronic Computer Technology 2010 International Conference on Electronic Computer Technology, ICECT 2010. Kuala Lumpur, 2010. С. 247-251.
9. Boldyreff A., Kupovykh G., Redin A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer // Journal of Electrostatics. Elsevier. 71. 2013. P. 305-311.
10. Kupovykh G., Boldyrev A. Alpine Atmospheric Electricity Monitoring on the Peak Terskol in 2004-2005. International Conference on Atmospheric Electricity ICAE 2007. Beijing. China.

Рецензенты:

Илюхин А.А., д.ф-м.н., профессор, профессор кафедры математического анализа Таганрогского государственного педагогического института имени А.П. Чехова, г. Таганрог.

Жорник А.И., д.ф-м.н., профессор, профессор кафедры теоретической, общей физики и технологии Таганрогского государственного педагогического института имени А.П. Чехова, г. Таганрог.