

Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 474—483.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(80):474—483.

Научная статья

УДК 551.594(23.03)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-474-483

Исследования распределения электрического поля в геометрически неоднородном электродном слое в высокогорных условиях

Дмитрий Владимирович Тимошенко,

Геннадий Владимирович Куповых, Татьяна Владимировна Кудринская

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: dmitrytim@sfedu.ru

Аннотация. Проведен сравнительный анализ данных экспериментов по синхронным измерениям напряженности электрического поля вблизи поверхности земли и на разных высотных строениях с результатами расчетов в рамках модели приземного электродного слоя с неоднородной поверхностью. Рассмотрено представление коэффициента искажения напряженности электрического поля в виде произведения геометрической и электродной компонент. Для описания геометрической неоднородности применялась математическая модель эллипсоида на плоскости. Для учета влияния электродного эффекта использованы приближенные аналитические решения для различных типов метеоусловий. Получено хорошее совпадение теоретических расчетов с результатами измерений на горных станциях. Предложенный подход может быть положен в основу методики имитационного моделирования поверхности сложного рельефа при обработке данных атмосферно-электрических измерений.

Ключевые слова: напряжённость электрического поля, электродный эффект, приземный слой, коэффициент искажения, турбулентность.

Для цитирования: Тимошенко Д. В., Куповых Г. В., Кудринская Т. В. Исследования распределения электрического поля в геометрически неоднородном электродном слое в высокогорных условиях // Гидрометеорология и экология. 2025. № 80. С. 474—483. doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-474-483.

Original article

Researches of electric field distribution in a geometrically inhomogeneous electrode layer in high altitude conditions

Dmitry V. Timoshenko, Gennady V. Kupovykh, Tatiana V. Kudrinskaya

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, E-mail: dmitrytim@sfedu.ru

Summary. A comparative analysis of experimental data on synchronous measurements of electric field strength near the earth's surface and at different high-rise buildings is carried out with the results of calculations using the model of a surface electrode layer with an inhomogeneous surface.

The issue of matching model and experimental values of the electric field strength distortion in the surface layer of the atmosphere in the presence of irregularities of arbitrary shape in the measurement

area is investigated. The previously proposed representation of the reduction coefficient as a product of geometric and electrode components is considered. A theoretical justification for the reduction coefficient is given, as well as a description of experiments to determine electric field distortions due to geometric inhomogeneity of the measuring area. The paper describes experiments that establish electric field strength distortions caused by the presence of inhomogeneities on the Earth's surface in the form of buildings or devices for installing measuring sensors. Numerical experiments have been carried out to replace rectangular inhomogeneities with ellipsoid-shaped inhomogeneities of the corresponding parameters. The good consistency of theoretical and experimental data confirms the hypothesis that the reduction coefficient can be represented as a product of geometric and field components. The calculated electrical characteristics of a turbulent surface layer with an inhomogeneous electrode surface in the form of an ellipsoidal elevation have been studied and compared with observations conducted under conditions similar to the model ones. The cases of stationary and non-stationary coefficients of turbulent transport are considered, assuming the independence of geometric and electrical factors of electric field distortion.

The representation of the electric field strength reduction coefficient as a product of geometric and electrode components is considered. A mathematical model of an ellipsoid on a plane was used to describe geometric inhomogeneity. Approximate analytical solutions for various types of weather conditions were used to account for the effect of the electrode effect. A good agreement was obtained between the theoretical calculations and the measurement results at mining stations. The proposed approach can be used as the basis for the simulation of the surface of a complex relief when processing atmospheric and electrical measurement data.

Keywords: the electrode effect, the surface layer of the atmosphere, the reduction coefficient, turbulence.

For citation: Timoshenko D. V., Kupovykh G. V., Kudrinskaya T. V. Researches of electric field distribution in a geometrically inhomogeneous electrode layer in high altitude conditions. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(80):(474—483). doi: 10.33933/2713-3001-2025-80-474-483. (In Russ.).

Введение

При проведении атмосферно-электрических наблюдений в приземном слое атмосферы одной из задач является сравнение данных о напряженности электрического поля, полученных в разных пунктах и при различных способах размещения датчиков.

Теория электродного эффекта, описывающая электрическое состояние атмосферы вблизи поверхности земли, изначально была построена для поверхности плоского электрода [1]. В то же время реальные измерения обычно проводятся на некотором возвышении. В первую очередь это связано с особенностью установки измерительных датчиков, располагающихся в специальных будках, на мачтах и крышах зданий [2, 3]. Кроме того, необходимо учитывать естественные возвышенности, которые могут присутствовать вблизи или на территории измерительных площадок.

Указанные факторы могут приводить к искажению значений измеряемых электрических параметров атмосферы, в первую очередь, напряженности электрического поля (градиента потенциала).

Для корректной интерпретации данных измерения и расчетов искажений электрического поля, возникающих в условиях сложной геометрии земной поверхности, в [4, 5] рассмотрены математические модели в форме краевых задач для ионизационно-рекомбинационных уравнений электродного эффекта в областях, имеющих неоднородность в форме верхней половины сферы [2] и верхней

половины эллипсоида [3] над плоской поверхностью. Решение указанных краевых задач позволило получить пространственные распределения напряженности электрического поля вблизи электрода с соответствующим типом неоднородности.

В практике атмосферно-электрических наблюдений для интерпретации результатов измерений напряженности электрического поля в условиях сложного рельефа местности состоит в использовании так называемого коэффициента редукции (K_p), который понимается как коэффициент пересчета значений, измеренных на некоторой высоте (при возможно сложной геометрии установки датчика) к значениям, полученным в идеальных условиях равнины [2]. В работе [3] приведены одни из первых данных по экспериментальному исследованию зависимости коэффициента редукции от величины измеряемого электрического поля $K_p(E)$, полученные при синхронных измерениях напряженности электрического поля двумя датчиками (электростатическими флюксметрами): на уровне земли (E_1) и на крыше зданий (E_2), и исследованы статистические взаимосвязи между рядами наблюдений. В качестве теоретической интерпретации зависимости $K_p(E)$ предложено представление коэффициента искажения в виде произведения геометрического множителя и отдельно его электродной составляющей.

В настоящей работе используются результаты экспериментов по синхронным измерениям напряженности электрического поля на двух уровнях (E_1 и E_2), проводившихся на станциях Кызбурун (Баксанское ущелье, 600 м н. у. м.) и Пик Чегет (3040 м н. у. м. в районе Эльбруса). На горных станциях практически отсутствуют аэрозольное и радиоактивное загрязнения воздуха, сильные источники ионизации, что позволяет минимизировать число факторов, искажающих электрическое поле.

Целью работы является анализ результатов экспериментальных данных по измерению напряженности электрического поля на разных высотах в различных условиях с использованием модели пространственно-неоднородного электродного эффекта.

Содержание и результаты экспериментов

Содержание экспериментов состояло в измерении напряженности электрического поля непосредственно вблизи земной поверхности (первый датчик, E_1) и на крыше здания (второй датчик, E_2) флюксметрами фирмы Vaisala.

Иллюстрация расположения датчиков на измерительных площадках Пик Чегет и Кызбурун приведена на рис. 1 и рис. 2.

Для станции Кызбурун высота расположения второго датчика составляла 4 м, расстояние между зданием и первым датчиком по горизонтали — 10 м, высота первого датчика над земной поверхностью — 0,5 м.

На станции Пик Чегет высота второго датчика составляла 6 м, расстояние между зданием и первым датчиком по горизонтали — 7 м, высота первого датчика над земной поверхностью — 0,5 м.

Таким образом, чистый перепад высот между первым и вторым датчиком составлял 3,5 м для станции Кызбурун и 5,5 м для станции Пик Чегет.



Рис. 1. Расположение измерительных датчиков на измерительной площадке Пик Чегет.

Fig. 1. Location of measuring sensors at the measuring site of Cheget Peak.



Рис. 2. Расположение измерительных датчиков на измерительной площадке Кызбурун.

Fig. 2. Location of measuring sensors at the measuring site of Kyzburun.

Идея описываемых экспериментов состоит в изучении искажений электрического поля, вызванных геометрическими неоднородностями, присутствующими на измерительной площадке в виде зданий или иных объектов. С целью учета этих искажений один из датчиков ставился на уровне земли, а второй — на крыше здания. В качестве математической модели геометрически неоднородного

электрода принимается эллипсоид с несовпадающими главными осями, позволяющий учесть пространственную асимметрию.

Наряду с геометрической моделью неоднородного электрода в виде эллипсоидальной поверхности для оценки искажений электрического поля используется идея «коэффициента редукции», позволяющая выделить среди факторов, порождающих искажение, непосредственно связанные с геометрией электрода (расстановки датчиков), и факторы действия электродного эффекта.

Коэффициент редукции K_p электрического поля — это отношение значений напряжённости электрического поля в геометрически искажённых условиях к его эталонному значению на равнине. Коэффициент редукции вводят для унификации данных атмосферно-электрических наблюдений, которые проводятся на сети наземных станций. Напряжённость электрического поля (градиент потенциала) обычно измеряется на некоторой высоте от поверхности земли с использованием различных способов установки датчиков. Получаемые значения поля могут сильно отличаться от эталонных, под которыми понимаются измерения на плоской поверхности в условиях равнины.

Анализ экспериментальных данных будем проводить с использованием коэффициента искажения по аналогии с коэффициентом редукции в качестве параметра, характеризующего степень искажения величины электрического поля под действием сложного рельефа земной поверхности и вследствие влияния электродного эффекта.

Приведем средние значения электрического поля E_1 и E_2 , измеренного в условиях «хорошей погоды», и значения коэффициента искажения K_p для двух пунктов (табл. 1).

Таблица 1

Данные эксперимента на станциях Пик Чегет и Кызбурун
Experimental data at the stations of Cheget Peak and Kyzburun

Пик Чегет			Кызбурун		
E_1 , В/м	E_2 , В/м	K_p	E_1 , В/м	E_2 , В/м	K_p
97	311	3,2	62	107	1,7
125	458	3,6	80	132	1,7
138	543	3,9	94	154	1,6
162	667	4,1	119	159	1,3
средние значения			средние значения		
142	560	4	89	138	2

Различные абсолютные значения напряженности электрического поля объясняются разной орографией местности — условно равниной для пункта Кызбурун и сложным горным рельефом для пункта Пик Чегет.

В обоих экспериментах значения коэффициента искажения меняются в зависимости от значений напряжённости электрического поля вблизи земной поверхности, но по-разному. В равнинных условиях значения K_p уменьшаются, а в горных — возрастают с усилением электрического поля. Это подтверждает

предположение, что значения K_p обусловлены наряду с геометрией расстановки датчиков и особенностями рельефа площадок, действием электродного эффекта у поверхности земли.

Расчет значений электрического поля и коэффициента искажения вблизи эллипсоидального электрода

Проведем моделирование геометрической неоднородности экспериментальных площадок, используя представление электрода в виде верхней половины эллипсоида, лежащего на плоской поверхности, соответствующей переходу поверхности измерительной площадки в расположенное на ней здание, содержащее второй датчик [5]. Представление неоднородности в виде эллипсоида удобно наличием у последнего неполной пространственной симметрии, выраженной тремя полуосями, позволяющими однозначно описывать трехмерные объекты.

Значения напряженностей электрического поля в верхней точке, рассчитанные по модели электрода в форме эллипсоида на основе измеренных значений вблизи земной поверхности и данных о размерах зданий и расстояниях между датчиками, приведены в табл. 2.

Вычислительный эксперимент проводился на основании параметров расстановки датчиков: высота — 4 м, длина и ширина здания — 5 м и 15 м соответственно, расстояние между датчиками — 10 м для станции Кызбурун; высота — 6 м, длина и ширина здания — 5 м и 6 м соответственно, расстояние между датчиками — 7 м для станции Пик Чегет.

При расчете коэффициента искажения использовалось определение [2,3]:

$$K_p = \frac{E_2}{E_1}, \quad (1)$$

где величина E_2 — значение напряжённости электрического поля в рассматриваемой точке вблизи электрода в форме эллипсоида, определяемое по формуле [5]:

$$E_2 = E_1 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A \frac{(1-(-1)^n)(1-(-1)^k)}{nk} \frac{sh\sqrt{n^2+k^2}(x-a)sh\sqrt{n^2+k^2}(y-b)sh\sqrt{n^2+k^2}(z-c)}{sh\pi\sqrt{n^2+k^2}}, \quad (2)$$

где a, b и c — полуоси эллипсоида, z — высота над поверхностью земли.

При расчетах использовались значения: $a = 5$ м, $b = 15$ м и $c = 4$ м, $n = k = 3$ для станции Кызбурун и $a = 6$ м, $b = 6$ м и $c = 6$ м, $n = k = 3$ для станции Пик Чегет. Значения E_1 для обеих станций берутся из первого столбца табл. 1.

Значения напряженности электрического поля в табл. 2 показывают, что с ростом величины поля у поверхности земли E_1 , величина E_2 , а вместе с ней и K_p также возрастают. При этом экспериментальные и теоретические значения E_2 и K_p (табл. 1 и 2) не совпадают. Этот результат позволяет предположить, что значения K_p обусловлены наряду с геометрией расстановки датчиков и особенностями рельефа площадок, действием электродного эффекта у поверхности земли.

Таблица 2

Модельные расчеты неоднородного электрода на станциях Пик Чегет и Кызбурун

Model calculations of an inhomogeneous electrode
at the stations of Cheget Peak and Kyzburun

Пик Чегет			Кызбурун		
E_1 , В/м	E_2 , В/м	K_p	E_1 , В/м	E_2 , В/м	K_p
97	264	2,24	62	62	120
125	389	2,52	80	80	185
138	461	2,73	94	94	260
162	567	2,87	119	119	339

Расчет значений электрического поля и коэффициента искажения с учетом электродного эффекта

Согласно определению, данному выше, коэффициент искажения, измеренный с помощью двух датчиков напряженности электрического поля, первый из которых установлен на земле (плоский электрод), а второй — на некоторой высоте со сложной геометрией установки (электрод произвольной формы), определяется формулой (1).

Для интерпретации экспериментальных данных величину K_p удобно представить в виде [3, 4]:

$$K_p = K_1 \cdot K_2, \quad (3)$$

где множитель K_1 определяет изменение электрического поля за счет геометрической неоднородности электрода K_2 — силу действия электродного эффекта.

Каждую из величин K_1 и K_2 можно определить по формуле (1), в которой величина E_2 для коэффициента K_1 будет определяться вблизи электрода эллипсоидной формы с помощью соотношения (2).

Коэффициент K_2 может быть определен из закона Ома в случае классического электродного эффекта:

$$E_2(z) = j/\lambda(z), \quad (4)$$

где j — полный ток, $\lambda(z)$ — электрическая проводимость воздуха, рассчитываемая по методике, предложенной в [7].

В случае турбулентного электродного эффекта K_2 определяется из выражения для профиля напряженности электрического поля [6]:

$$E(z) = (E_1 - E_\infty) e^{-\frac{(z-z_0)\sqrt{\lambda}}{\varepsilon_0 D_0}} + E_\infty, \quad (5)$$

где E_∞ — значение поля на верхней границе электродного слоя; D_0 — интенсивность турбулентного переноса.

Поскольку рельеф площадки и геометрия расстановки датчиков не меняются в ходе эксперимента, величину K_1 можно считать постоянным множителем, его вклад в значение величины K_p приведен в табл. 2.

В табл. 3 приведены расчётные значения K_2 в случае классического электродного эффекта на высоте 1 и 2 м от поверхности земли при различных значениях E_1 .

Таблица 3

Зависимость K_2 от величины электрического поля

Dependence K_2 on the magnitude of the electric field

E_1 , В/м	100	200	500
$K_2, z = 1$ м	0,63	0,77	0,83
$K_2, z = 2$ м	0,55	0,67	0,81

Результаты моделирования показывает, что при классическом электродном эффекте с ростом напряженности электрического поля E_1 происходит увеличение K_2 , и, следовательно, коэффициента искажения K_p .

Последнее хорошо согласуется с данными, полученными на пункте Пик Четгет при больших значениях напряженности электрического поля и коэффициентов искажения, усиленных геометрией установки датчиков.

Приведем значения коэффициента K_2 вблизи поверхности плоского электрода, рассчитанные с использованием соотношения (5) при различных значениях электрического поля (E_1) и степени турбулентного перемешивания (D_0) в приземном слое.

В табл. 4 представлены результаты модельных расчетов K_2 , для $E_1 = 100$ В/м при разной интенсивности турбулентного переноса.

Таблица 4

Зависимость K_2 от интенсивности турбулентного переноса

Dependence of K_2 on the intensity of turbulent transport

D_0 , м ² /с	0,01	0,05	0,1
$K_2, z = 1$ м	1,01	0,93	0,83
$K_2, z = 2$ м	0,97	0,85	0,79
$K_2, z = 5$ м	0,81	0,73	0,69

Зависимость K_2 от величины напряженности электрического поля E_1 в приближении сильного турбулентного перемешивания ($D_0 \approx 0,1$ м/с) приведена в табл. 5.

Таблица 5

Зависимость K_2 от напряженности электрического поля E_1

Dependence of K_2 on the electric field strength E_1

E_1 , В/м	100	200	500
$K_2, z = 1$ м	0,83	0,97	1,4
$K_2, z = 2$ м	0,79	0,95	1,2
$K_2, z = 5$ м	0,69	0,73	1,1

Результаты расчетов показывают, что турбулентный электродный эффект при увеличении значений D_0 уменьшает значения K_p за счет того, что значения K_2 ,

меньше единицы (таблица 4). Только в случаях слабого ветра или сильного электрического поля его значения превышают единицу, что объясняется тем, что условия становятся близки к классическому электродному эффекту. Это хорошо согласуется с данными, полученными на пункте Кызбурун.

Заключение

Проведенный анализ экспериментальных данных по измерениям напряженности электрического поля на разных высотах и результаты математического моделирования позволяют сделать вывод о необходимости представления коэффициента редукции в виде двух компонент (множителей), отражающих влияние геометрии установки регистрирующих приборов и структуры приземного электродного слоя. Для определения первого множителя построена математическая модель электрода сложной геометрии в виде эллипсоида на плоскости, позволяющая рассчитывать усиление напряженности электрического поля различными строениями, на которых установлены измерители. Для расчетов второго множителя использованы аналитические модели для различных типов приземного электродного слоя. Установлено хорошее согласие теоретических расчетов значений коэффициента редукции с результатами измерений электрического поля на горных станциях.

Предложенная методика расчета коэффициента редукции может быть полезна при анализе данных атмосферно-электрических наблюдений в условиях сложного рельефа, а также при планировании измерительных площадок.

Список литературы

1. Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
2. Афиногенов Л. П., Грушин С. И., Романов Е. В. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 319 с.
3. Куповых Г. В., Шефтель В. М., Ярошенко А. Н. К вопросу определения коэффициента редукции при измерении атмосферного электрического поля в приэлектродном слое Л.: Гидрометеиздат. Труды ВГИ. Вып. 76. 1989. С. 66—69.
4. Куповых Г. В., Клово А. Г., Тимошенко Д. В. и др. Определение коэффициента редукции атмосферного электрического поля в приземном слое // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 5. С. 171—181. doi :10.18522/2311-3103-2022-5-171-181.
5. Тимошенко Д. В. Расчет коэффициента редукции электрического поля вблизи эллипсоидальной поверхности в электродном слое // Труды ГГО. 2024. Вып. 614. С. 95 — 110.
6. Куповых Г. В., Клово А. Г., Гривцов В. В. и др. Моделирование электродинамической структуры нетурбулентного приземного слоя. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 3(227). С. 150—157. doi :10.18522/2311-3103-2022-5-369-225.
7. Белоусова О. В., Куповых Г. В., Клово А. Г. и др. Результаты моделирования электродинамической структуры турбулентного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 4(228). С. 245—253. doi :10.18522/2311-3103-2022-5-571-318.

References

1. Kupovykh G. V., Morozov V. N., Schwartz J. M. *Teoria elektrodnoogo effekta v atmosphere = Theory of the electrode effect in the atmosphere*. Taganrog: Publishing house of TRTU, 1998: 123 p. (In Russ).

2. Afinogenov L. P., Grushin S. I., Romanov E. V. *Apparatura dlya issledovaniy prizemnogo sloya atmosfery = Equipment for research of the surface layer of the atmosphere*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 319 p. (In Russ).
3. Kupovykh G. V., Sheftel V. M., Yaroshenko A. N. On the issue of determining the reduction coefficient when measuring the atmospheric electric field in the near-electrode layer. Leningrad: Hydrometeoizdat. *Trudy VGI = Proc. HGI*. 1989; (76): (66—69). (In Russ).
4. Kupovykh G. V., Klovo A. G., Timoshenko D. V. et al. Determination of the reduction coefficient of the atmospheric electric field in the surface layer. *Izvestiya UFU. Technicheskie nauki = SFU News. Technical Sciences*. 2022; (5): (171—181). doi: 10.18522/2311-3103-2022-5-171-181. (In Russ).
5. Timoshenko D. V. Calculation of the electric field reduction coefficient near an ellipsoidal surface in an electrode layer. *Trudy GGO = Proc. MGO*. 2024; (614): (95—110). (In Russ).
6. Kupovykh G. V., Klovo A. G., Grivtsov V. V. et al. Modeling of the electrodynamic structure of a non-turbulent surface layer. *Izvestiya UFU. Technicheskie nauki = SFU News. Technical Sciences*. 2022; (3): (150—157). doi: 10.18522/2311-3103-2022-5-369-225. (In Russ).
7. Belousova O. V., Kupovykh G. V., Klovo A. G. et al. Results of modeling the electrodynamic structure of a turbulent surface layer. *Izvestiya UFU. Technicheskie nauki = SFU News. Technical Sciences*. 2022; (4): (245—253). doi: 10.18522/2311-3103-2022-5-571-318. (In Russ).

Информация об авторах

Тимошенко Дмитрий Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доцент, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, доцент, dmitrytim@sfedu.ru.

Куповых Геннадий Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических основ инженерного образования, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, профессор, kupovykh@sfedu.ru.

Кудринская Татьяна Владимировна, канд. физ.-мат. наук, доцент, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, доцент, kudrinskaya@sfedu.ru.

Information about authors

Dmitry Vladimirovich Timoshenko PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Associate Professor.

Gennady Vladimirovich Kupovykh Doctor of science in Physics and Mathematics, Professor, chairman of the Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Professor.

Tatiana Vladimirovna Kudrinskaya PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Associate Professor.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.04.2025

Принята к печати после доработки 24.07.2025

The article was received on 14.04.2025

The article was accepted after revision on 24.07.2025