

17. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1994.
18. *Kolesnikov A.A.* Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza [Synergetic methods for complex systems control: the theory of system synthesis]. Moscow: KomKniga, 2006.
19. *Popov A.N.* Matematicheskie modeli letatel'nykh apparatov: ucheb. posobie [Mathematical models of aircraft. Tutorial]. Taganrog.: Izd-vo TTI SFEDU, 2008.
20. *Bondarets A.J.* Sistema avtomaticheskogo upravleniya uglom khoda samoleta-amfibii pri dvizhenii po vode na rezhime glissirovaniya [The system of automatic control of the angle of the amphibious aircraft when moving through the water in the gliding mode], Sb. dokladov V Nauchoi konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviasalon-2004» [Collection of reports of the I scientific conference on hydroaviation «Gidroaviasalon-2004»]. Moscow: Izd. TsAGI, 2004.
21. *Nikitin A.I.* Realizatsiya matematicheskoy modeli prostranstvennogo dvizheniya samoleta-amfibii Be-200 v srede MATLAB/Simulink [Implementation of a mathematical model of the spatial motion of the Be-200 amphibious aircraft in MATLAB/Simulink], *Issledovaniya i perspektivnye razrabotki v aviatsionnoy promyshlennosti: Stat'i i materialy konferentsii* [«Research and advanced developments in the aviation industry»: Articles and conference materials]. Moscow: OAO «OKB Suhogo», 2005, pp. 80-84.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

**Попов Иван Андреевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ivpopov@sfedu.ru; тел.: +79515014168; кафедра синергетики и процессов управления им. профессора А.А. Колесникова; аспирант.

**Popov Ivan Andreevich** – Southern Federal University; e-mail: ivpopov@sfedu.ru; phone: +79515014168; the department of synergetics and control processes named after professor A.A. Kolesnikov; graduate student.

УДК 551.594

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-171-181

**Г.В. Куповых, А.Г. Клово, Д.В. Тимошенко, Т.В. Кудринская, О.В. Белоусова**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РЕДУКЦИИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ**

*Исследуется проблема интерпретации данных атмосферно-электрических наблюдений, проводимые регулярно на сети наземных станций, являющихся составной частью общего мониторинга состояния атмосферы. Для решения общей задачи мониторинга - получение режимных данных об электрическом поле атмосферы и выявление трендов его изменений требуется проведения сравнительного анализа данных измерений в различных пунктах наблюдений. Напряжённость электрического поля (градиент потенциала) обычно измеряется на некоторой высоте от поверхности земли с использованием различных способов (геометрии) установки датчиков вблизи поверхности земли. Получаемые значения электрического поля могут сильно отличаться от эталонных, под которыми понимаются измерения на плоской поверхности в условиях равнины. В работе исследуется структура атмосферного электрического поля вблизи плоского электрода со сферической неоднородностью. Для совместного анализа данных различных пунктов наблюдений обычно производится их унификация путем введения коэффициента редукции: отношение значений напряжённости электрического поля в геометрически искажённых условиях к его эталонному значению на равнине. Показано, что значения коэффициента редукции сильно зависят не только от геометрии установки датчиков, но и от значений измеряемого электрического поля. Для корректного расчета коэффициента редукции электрического поля предложено использовать одновременно геометрический коэффициент искажения электрического поля и коэффициент, учитывающий влияние электродного эффекта вблизи поверхности земли. Выполнены расчеты значений коэффициента редукции в окрестностях сферической неоднородности поверхности электрода для случаев классического и турбулентного элек-*

*тродного эффекта в приземном слое. Установлено влияние на значения и пространственное распределение коэффициента редукиции метеорологических факторов и измеряемого электрического поля. Для правильной интерпретации результатов наземных атмосферно-электрических наблюдений с учетом коэффициента редукиции необходимо принимать во внимание не только геометрию установки датчиков, но и воздействие электродного эффекта на получаемые значения электрического поля.*

*Атмосфера; электрическое поле; электродный эффект; коэффициент редукиции; сферическая неоднородность; приземный слой; турбулентность.*

**G.V. Kupovykh, A.G. Klovo, D.V. Timoshenko, T.V. Kudrinskaya, O.V. Belousova**

### **DETERMINATION OF THE REDUCTION COEFFICIENT OF THE ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD IN THE SURFACE LAYER**

*The article examines the problem of interpretation of atmospheric-electrical observations conducted regularly on a network of ground stations that are an integral part of the general monitoring of the state of the atmosphere. To solve the general task of monitoring - obtaining regime data on the electric field of the atmosphere and identifying trends in its changes, a comparative analysis of measurement data at various observation points is required. The electric field strength (potential gradient) is usually measured at a certain height from the earth's surface using various methods (geometry) of installing sensors near the earth's surface. The resulting values of the electric field may differ greatly from the reference values, which are understood as measurements on a flat surface in plain conditions. The structure of the atmospheric electric field near a flat electrode with spherical inhomogeneity investigates in the paper. For the joint analysis of data from various observation points, their unification is usually carried out by introducing a reduction coefficient: the ratio of the values of the electric field strength in geometrically distorted conditions to its reference value on the plain. It is shown that the values of the reduction coefficient strongly depend not only on the geometry of the sensor installation, but also on the values of the measured electric field. To correctly calculate the reduction coefficient of the electric field, it is proposed to use simultaneously the geometric distortion coefficient of the electric field and the coefficient taking into account the influence of the electrode effect near the earth's surface. Calculations of the values of the reduction coefficient in the vicinity of the spherical inhomogeneity of the electrode surface for the cases of classical and turbulent electrode effect in the surface layer are performed. The influence of meteorological factors and the measured electric field on the values and spatial distribution of the reduction coefficient has been established. For the correct interpretation of the results of ground-based atmospheric-electrical observations, taking into account the reduction coefficient, it is necessary to take into account not only the geometry of the sensor installation, but also the effect of the electrode effect on the obtained values of the electric field.*

*Atmosphere; electric field; electrode effect; reduction coefficient; spherical inhomogeneity; surface layer; turbulence.*

**Введение.** Атмосферно-электрические наблюдения, проводимые регулярно на сети наземных станций, являются составной частью общего мониторинга состояния атмосферы. Общая задача атмосферно-электрического мониторинга - получение режимных (фоновых) данных об электрическом поле атмосферы и выявление трендов его изменений [1, 2]. Таким образом, основным элементом регулярных наблюдений является напряжённость электрического поля (градиент потенциала), обычно измеряемая на некоторой высоте от поверхности земли с использованием различных способов (геометрии) установки датчиков. Получаемые значения электрического поля могут сильно отличаться от эталонных значений, под которыми понимаются измерения на плоской поверхности в условиях равнины [1, 2].

Из физических соображений рекомендуется производить наблюдения в условиях «хорошей погоды» [1, 2] одновременно за тремя основными элементами (напряжённостью электрического поля, проводимостью воздуха и плотностью электрического тока), связанных законом Ома, и создавая, таким образом, систему

замкнутых измерений [1, 2]. Но это сложная физико-техническая задача, поэтому чаще всего регулярно измеряется только напряжённость электрического поля при разных инженерных способах размещения датчиков.

Для сравнительного анализа данных различных пунктов наблюдений обычно производится их унификация путем введения коэффициента редукции:  $K_p = E/E_0$ , где  $E_0$  – эталонное значение электрического поля на равнине,  $E$  – в геометрически искажённых условиях. Редуцированные значения  $E$  зависят от прежде всего от геометрии установки датчиков, но значения  $K_p$  также сильно меняются в различных физических условиях [3], [4]. Причинами разброса его значений является влияние электродного эффекта вблизи поверхности земли [3], [4].

В работе [5] на основе экспериментальных измерений установлено, что с усилением электрического поля в условиях турбулентного перемешивания в приземном слое значения коэффициента редукции уменьшаются, а в условиях близких к классическому электродному эффекту он возрастает. Имеется ряд работ, где при определенных допущениях и упрощениях получены аналитические распределения электрического поля для сложной геометрии электрода [6, 7]. В работах [8,9] представлены распределения потенциала и напряженности электрического поля вблизи полусферы на поверхности плоского электрода.

Цель настоящей работы – моделирование и исследование поведения коэффициента редукции электрического поля вблизи земной поверхности, имеющей сферическую неоднородность, с учетом действия электродного эффекта в атмосфере.

**1. Расчет структуры электрического поля вблизи электрода со сферической неоднородностью.** начале рассмотрим задачу о распределении напряжённости электрического поля вблизи плоского электрода с расположенной на нем полусферой.

В приближении классического электродного эффекта [10–13] имеем следующую математическую задачу:

$$\begin{aligned} \pm b_{1,2} \operatorname{div}(n_{1,2} \vec{E}) &= q - \alpha n_1 n_2, \\ \operatorname{div} \vec{E} &= 4\pi e(n_1 - n_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $n_{1,2}$  – концентрации положительных и отрицательных аэроионов,  $b_{1,2}$  – их подвижности,  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации,  $\vec{E}$  – напряжённость электрического поля,  $q$  – скорость ионообразования,  $e$  – элементарный заряд.

Учитывая потенциальность электрического поля ( $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$ ) можно использовать электростатическое приближение, тогда для напряженности электрического поля и потенциала используем соотношение:

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \phi. \quad (3)$$

Таким образом, систему (1) можно переписать относительно скалярной функции потенциала электрического поля  $\phi$ , что, в известной степени, упрощает решение задачи.

Рассмотрим вначале третье уравнение системы (1), записанное с учетом (3) через потенциал в обозначениях оператора Лапласа:

$$\Delta \phi = -4\pi e(n_1 - n_2). \quad (4)$$

Граничные условия для уравнения (4) зададим в следующем виде:

$$\phi|_{z=0} = 0, \quad \phi|_{z=z_\infty} = \phi_\infty. \quad (5)$$

Исходя из теории классического электродного эффекта можно использовать  $n_1 \approx \text{const}$  [10], поэтому из первого уравнения системы (1) можно выразить величину  $n_2$  и получить уравнение относительно  $\vec{E}$ :

$$\text{div} \vec{E} = 4\pi e \left( n_1 - \frac{q - \text{div}(n_1 b_1 \vec{E})}{\alpha n_1} \right), \quad (6)$$

которое преобразуется к уравнению вида:

$$\Delta \varphi = -A, \quad A = \frac{4\pi e \left( n_1 - \frac{q}{\alpha n_1} \right)}{1 + \frac{4\pi e b_1}{\alpha}}, \quad (7)$$

что позволяет решать задачу о распределении скалярной функции потенциала. Уравнение (7) и граничные условия (5) представляет собой задачу Дирихле для уравнения Лапласа во внешности круга [14].

Зададим форму электрода в виде полусферы. Тогда уравнение (7) удобно рассматривать в полярных координатах  $\varphi = \varphi(r, \theta)$  (рис. 1):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} = -A. \quad (8)$$

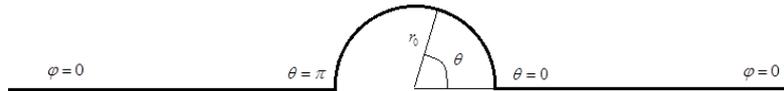


Рис. 1. Схема электрода в полярных координатах

Математическое решение уравнения (8) для потенциала электрического поля подробно приведено в работах [8, 9]. Окончательное выражение в виде ряда Фурье имеет вид:

$$\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r_0^{n+2} r^{-n} - \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r^2 \right] \sin n \theta. \quad (9)$$

Для нахождения распределения напряженности электрического поля, пользуясь соотношением (3), совершим обратный переход от скалярной функции  $\varphi$  к вектор-функции  $\vec{E}$ . С этой целью воспользуемся формулой для градиента в полярных координатах:

$$\overrightarrow{\text{grad}} \phi = \frac{\partial \phi}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \vec{e}_\theta. \quad (10)$$

Формула (10) справедлива для функций в виде конечных соотношений, мы же получили выражение для потенциала электрического поля в виде ряда Фурье. Это, с одной стороны, позволяет говорить о почленной дифференцируемости правой части выражения (9), но с другой стороны, возникает возможность появления погрешности при вычислении производной, взятой только от конечного приближения ряда и от аналитического выражения функции – поскольку операция дифференцирования приближенного выражения может в данном случае оказаться некорректной – малые изменения функции могут приводить к существенным скачкам производной. Для проверки возможной погрешности и ее оценки проведено сравнение осредненного значения производной и рассчитанного аналитически [14].

После обратного перехода от выражения для потенциала к представлению напряженности электрического поля как функции координат в декартовой системе имеем выражение:

$$E = -grad \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{2A}{\pi n(4-n^2)} (1 - (-1)^n) r_0^{n+2} (\sqrt{x^2 + z^2})^{-n} - \frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right] \quad (11)$$

Здесь  $x$  горизонтальная, а  $z$  – вертикальная (высота) координаты с началом в центре полусферы. Дальнейшие расчеты проводились в системе MATLAB.

Распределение напряженности электрического поля, как вблизи области сферической неоднородности электрода, так и на значительном удалении от нее приведены на рис. 2 при значении  $E_0 = -100 \text{ В/м}$  в плоской части электрода [10, 12, 13].

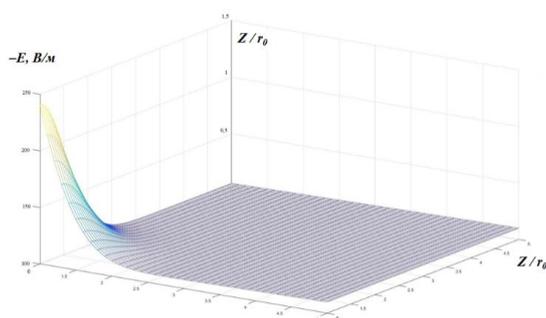


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля вблизи электрода со сферической неоднородностью

**2. Расчет коэффициента редукции в электродном слое.** Перейдем к рассмотрению коэффициент редукции электрического поля  $K_p$ , который в приближении электродного эффекта [3, 8, 10] можно представить в виде:

$$K_p = K_1 \cdot K_2, \quad (12)$$

где  $K_1 = E/E_0$  – коэффициент искажения электрического поля, обусловленный геометрией электрода;  $E$  – значение напряжённости электрического поля в рассматриваемой точке вблизи сферического электрода,  $E_0$  – значение вдали от него (плоский электрод),  $K_2$  – коэффициент, обусловленный действием электродного эффекта.

Далее, рассмотрим отдельно случаи классического и турбулентного электродного эффекта в приземном слое атмосферы [15–20].

**2.1. Классический электродный слой.** Для значений напряженности электрического поля на плоском участке электрода ( $E_0 = -100 \text{ В/м}$  и  $-500 \text{ В/м}$ ) на основе решения (11) получены значения геометрического коэффициента  $K_1$  и коэффициента редукции  $K_p$  в зависимости от расстояния между точкой наблюдения по горизонтали от края полусферы ( $x=l$ ) и по вертикали от ее вершины ( $z=h$ ) участком неоднородности (рис. 3).

Представленные рисунки демонстрируют уменьшение влияния геометрических искажений поля и, следовательно, уменьшение значений  $K_1$  и по мере удаления от участка неоднородности по вертикали и по горизонтали. При увеличении электрического поля  $E_0$  значения коэффициента  $K_1$  возрастают.

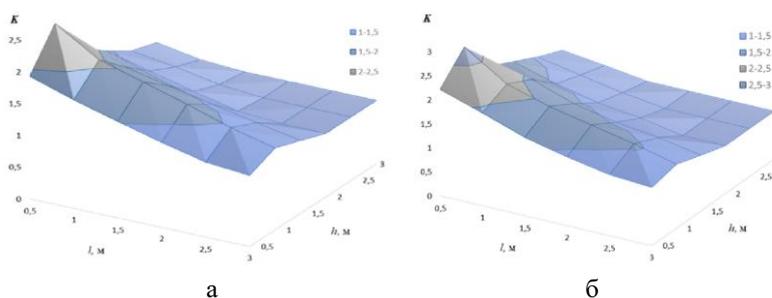


Рис. 3. Значения коэффициента  $K_1$  в классическом электродном слое:  
 а –  $E_0 = -500$  В/м, б –  $E_0 = -100$  В/м

Исследуем поведение коэффициента редукции, получаемого по формуле (12) с учётом влияния классического электродного эффекта. Значения коэффициента  $K_2$ , представленные в табл. 1, рассчитаны по численной модели классического электродного эффекта вблизи плоского электрода в соответствии с работами [10, 18, 20].

Таблица 1

Значения коэффициента  $K_2$ 

h, м	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$E_0 = -100$ В/м	1	0,8	0,7	0,6	0,55	0,48	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
$E_0 = -500$ В/м	1	0,95	0,9	0,87	0,85	0,82	0,8	0,77	0,74	0,72	0,7

Расчетные значения коэффициента редукции  $K_p$  по формуле (12) с учетом данных, приведённых табл. 1 при различных значениях напряженности электрического поля  $E_0$ , представлены на рис. 4.

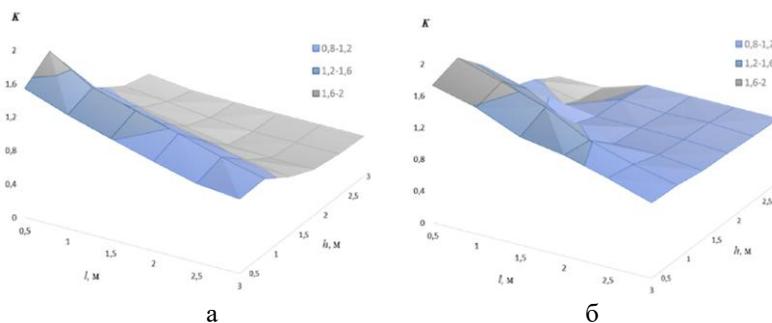


Рис. 4. Значения коэффициента редукции  $K_p$  в классическом электродном слое  
 (а –  $E_0 = -100$  В/м, б –  $E_0 = -500$  В/м)

Сравнение графиков, представленных на рис. 3 и 4 показывают уменьшение значений  $K_p$ , по сравнению с  $K_1$ , а при усилении электрического поля  $E_0$  происходит увеличение значений коэффициента редукции, что является следствием влияния классического электродного эффекта.

**2.2. Турбулентный электродный слой.** При наличии ветра в приземном слое, вследствие взаимодействия его с земной поверхностью, устанавливается режим турбулентного электродного эффекта [10]. В табл. 2 приведены значения

коэффициента турбулентности (диффузии)  $D$  и, соответствующие значения скорости ветра  $U$ , на высоте около одного метра от поверхности земли в условиях нейтральной стратификации приземного слоя атмосферы [10, 18].

Таблица 2

**Значения коэффициента турбулентности и скорости ветра**

$U$ , м/с	1	2	3	4	5	6
$D$ , м/с	0,02	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13

В табл. 3 приведены расчетные значения коэффициента  $K_2$  вблизи поверхности плоского электрода по результатам численного моделирования, приведенных в работах [10], [18] в при различных значениях электрического поля ( $E_0$ ) и степени турбулентного перемешивания ( $D$ ) в приземном слое.

Таблица 3

**Значения коэффициента  $K_2$  при разных значениях  $E_0$  и  $D$ .**

$h$ , м	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$E_0 = -100$ В/м $D = 0,02$ м/с	1	0,85	0,8	0,75	0,7	0,67	0,63	0,62	0,60	0,58	0,57
$E_0 = -100$ В/м $D = 0,13$ м/с	1	0,98	0,49	0,9	0,88	0,87	0,85	0,83	0,82	0,8	0,79
$E_0 = -500$ В/м $D = 0,13$ м/с	1	0,96	0,95	0,92	0,90	0,87	0,85	0,83	0,82	0,79	0,77

На рис. 5 представлены значения коэффициента редукции в турбулентном электродном слое при различных скоростях ветра. Коэффициент редукции  $K_p$  рассчитан по формуле (12), а значения коэффициента  $K_2$  взяты из табл. 3.

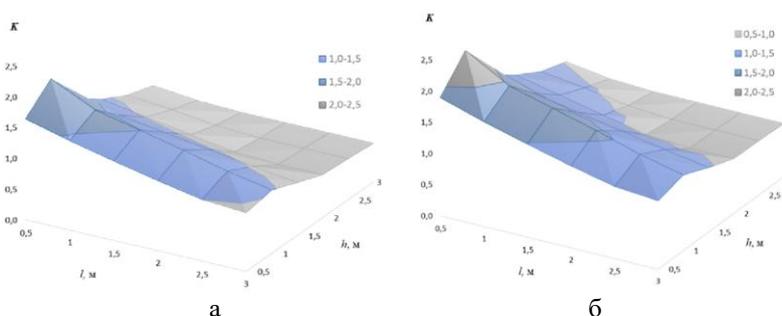


Рис. 5. Значения коэффициента редукции  $K_p$  в турбулентном электродном слое: (а –  $U = 1$  м/с; б –  $U = 6$  м/с)

Сравнение графиков, представленных на рис. 5, показывают увеличение значений коэффициента редукции  $K_p$  при увеличении скорости ветра. В среднем его значения при увеличении скорости ветра от  $U = 1$  м/с до  $U = 6$  м/с возрастают примерно на 20%.

На рис. 6 приведены значения коэффициента редукции  $K_p$  при условии сильного электрического поля ( $E_0 = -500$  В/м). Значения коэффициента  $K_2$  взяты из таблицы 3. Исходя из сравнения рис. 5,б и рис. 6, можно отметить, что при усилении электрического поля  $E_0$  также наблюдается увеличение значений  $K_p$ , как и в клас-

сическом электродном слое. Значения коэффициента редукции  $K_p$  для условия сильного электрического поля при турбулентном электродном эффекте больше, чем при классическом: почти на 30% – вблизи и менее 10% – вдали от участка неоднородности.

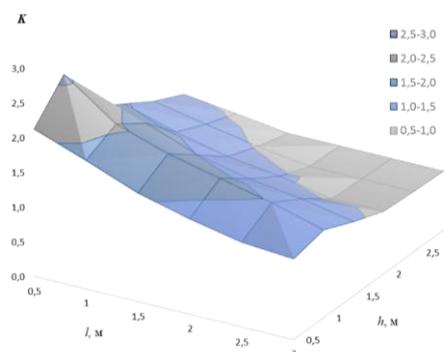


Рис. 6. Значения коэффициента редукции  $K_p$  в сильном электрическом поле ( $E_0 = -500$  В/м,  $u = 5$  м/с)

**Заключение.** Исследована структура атмосферного электрического поля вблизи плоского электрода со сферической неоднородностью. Для расчета коэффициента редукции предложено использовать одновременно геометрический коэффициент искажения электрического поля и коэффициент, учитывающий влияние электродного эффекта вблизи поверхности земли.

Выполнены расчеты значений коэффициента редукции в окрестностях сферической неоднородности поверхности электрода для случаев классического и турбулентного электродного эффекта в приземном слое. Установлено влияние на значения и пространственное распределение коэффициент редукции метеорологических факторов и измеряемого электрического поля.

Для правильной интерпретации результатов наземных атмосферно-электрических наблюдений с учетом коэффициента редукции необходимо принимать во внимание не только геометрию установки датчиков, но и воздействие электродного эффекта на получаемые значения электрического поля.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афиногенов Л. П., Грушин С. И., Романов Е. В. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 319 с.
2. Kirovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Gritsov V.V. The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 913. – 052041. – 6 p.
3. Куповых Г.В., Шефтель В.М., Ярошенко А.Н. К вопросу определения коэффициента редукции при измерении атмосферного электрического поля в приэлектродном слое // Труды ВГИ. – М.: Гидрометеиздат, 1989. – Вып. 76. – С. 66-69.
4. Мартынов А.А., Куповых Г.В. О связи значений напряженности электрического поля атмосферы, измеренных на различных высотах у земли // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству, Нальчик 1990. – С. 45.
5. Kirovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G. Electric field measurements at mountain stations in Baksan gorge and on Cheget peak (Elbrus region) // CATPID-2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 698. – 044035. – 6 p.
6. Tuomi T.J. The atmospheric electrode effect over snow // J. Atm. and Terr. Phys. – 1982. – Vol. 44. – P. 737-745.

7. *Калита В.М., Лантухов А.И., Москаленко А.М.* и др. Распределение электрического поля, объемного заряда и концентрации ионов в атмосфере вблизи заряженных тел // В кн.: Физические процессы в ионосфере и магнитосфере. – М.: Изд-во АН СССР, 1984. – С. 110-115.
8. *Kudrinskaya T.V., Klovo A. G., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V.* Reduction coefficient and electric field near plane electrode with geometric heterogeneity // Journal of Physics: IOP Conf. Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity. – 2020. – 1604. – 012005. – 8 p.
9. *Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Свидельский С.С., Тимошенко Д.В.* Распределение напряженности атмосферного электрического поля и потенциала вблизи плоского электрода со сферической неоднородностью // Матер. VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2020. – С. 279-283.
10. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере: монография. – Таганрог. Изд-во ТРТУ. 1998. – 123 с.
11. *Hoppel W.A.* Theory of the electrode effect // Journal Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1967. – Vol. 29, No. 6. – P. 709-721.
12. *Куповых Г.В., Морозов В.Н.* Классический (нетурбулентный) электродный эффект в приземном слое // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2003. – № 2. – С. 43-46.
13. *Куповых Г.В., Клово А.Г., Гривцов В.В., Белоусова О.В.* Моделирование электродинамической структуры нетурбулентного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 3 (227). – С. 234-2434.
14. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 736 с.
15. *Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A. G., Kudrinskaya T.V.* Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 698. – 044034. – 8 p.
16. *Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A.* Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer // Journal of Electrostatics. – 2013. – Vol. 71. – P. 305-311.
17. *Hoppel W.A.* Electrode effect: comparison of the theory and measurement // In: Planetary Electrodynamics, 2, S.C. Coroniti and J. Hughes; editors: Gordon and Breach Science Publishers. – New York, 1969. – P. 167-181.
18. *Куповых Г.В., Морозов В.Н.* Турбулентный электродный эффект в приземном слое // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2003. Приложение № 3. – С. 55-62.
19. *Свидельский С.С., Литвинова В.С., Куповых Г.В., Клово А.Г.* Формирование структуры атмосферного электродного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 130-141
20. *Белоусова О.В., Куповых Г.В., Клово А.Г., Гривцов В.В.* Результаты моделирования электродинамической структуры турбулентного приземного слоя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 4 (228). – С. 245-253.

#### REFERENCES

1. *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: Gidrometeoizdat, 1977, 319 p.
2. *Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Grivtsov V.V.* The atmosphere electrical characteristics' monitoring as an element of technosphere safety, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 913, 052041, 6 p.
3. *Kupovykh G.V., Sheftel' V.M., Yaroshenko A.N.* K voprosu opredeleniya koeffitsienta reduktsii pri izmerenii atmosfernogo elektricheskogo polya v prielektroдном sloe [On the issue of determining the reduction coefficient when measuring the atmospheric electric field in the near-electrode layer], *Trudy VGI* [Proceedings of the Highland Geophysical Institute]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1989, Issue 76, pp. 66-69.
4. *Martynov A.A., Kupovykh G.V.* O svyazi znacheniy napryazhennosti elektricheskogo polya atmosfery, izmerennykh na razlichnykh vysotakh u zemli [On the relationship of the values of the electric field strength of the atmosphere measured at different altitudes near the earth], *Tezisy dokladov IV Vsesoyuznogo simpoziuma po atmosfernomu elektrichestvu* [Abstracts of the IV All-Union Symposium on Atmospheric Electricity], Nal'chik 1990, pp. 45.

5. Kupovykh G.V., Kudrinskaya T.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G. Electric field measurements at mountain stations in Baksan gorge and on Cheget peak (Elbrus region), *CATPID-2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 698, 044035, 6 p.
6. Tuomi T.J. The atmospheric electrode effect over snow, *J. Atm. and Terr. Phys.*, 1982, Vol. 44, pp. 737-745.
7. Kalita V.M., Laptukhov A.I., Moskalenko A.M. i dr. Raspredelenie elektricheskogo polya, ob"emnogo zaryada i kontsentratsii ionov v atmosfere vblizi zaryazhennykh tel [Distribution of the electric field, volume charge and ion concentration in the atmosphere near charged bodies], *V kn.: Fizicheskie protsessy v ionosfere i magnitosfere* [In: Physical processes in the ionosphere and magnetosphere]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1984, pp. 110-115.
8. Kudrinskaya T.V., Klovo A. G., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Reduction coefficient and electric field near plane electrode with geometric heterogeneity, *Journal of Physics: IOP Conf. Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity*, 2020, 1604, 012005, 8 p.
9. Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Svidel'skiy S.S., Timoshenko D.V. Raspredelenie napryazhennosti atmosfernogo elektricheskogo polya i potentsiala vblizi ploskogo elektroda so sfericheskoy neodnorodnost'yu [Distribution of atmospheric electric field intensity and potential near a flat electrode with spherical inhomogeneity], *Mater. VI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Problemy voenno-prikladnoy geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoy sredy»* [Materials of the VI All-Russian Scientific Conference "Problems of military-applied geophysics and control of the state of the natural environment"]. Saint Petesburg: VKA imeni A.F.Mozhayskogo, 2020, pp. 279-283.
10. Kupovykh G.V., Morozov V.N., Shvarts Ya.M. Teoriya elektrodnoogo effekta v atmosfere: monografiya [The theory of the electrode effect in the atmosphere: monograph]. Taganrog. Izd-vo TRTU. 1998, 123 p.
11. Hoppel W.A. Theory of the electrode effect, *Journal Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1967, Vol. 29, No. 6, pp. 709-721.
12. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Klassicheskii (neturbulentnyy) elektrodnyy effekt v prizemnom sloe [Classical (non-turbulent) electrode effect in the surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennyye nauki* [Izvestia of higher educational institutions. The North Caucasus region. Natural sciences], 2003, No. 2, pp. 43-46.
13. Kupovykh G.V., Klovo A.G., Grivtsov V.V., Belousova O.V. Modelirovanie elektrodinamicheskoy struktury neturbulentnogo prizemnogo sloya [Modeling of the electrodynamic structure of a non-turbulent surface layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 3 (227), pp. 234-2434.
14. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1972, 736 p.
15. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V. Electrodynamic processes models in atmospheric surface layer, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 698, 044034, 8 p.
16. Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer, *Journal of Electrostatics*, 2013, Vol. 71, pp. 305-311.
17. Hoppel W.A. Electrode effect: comparison of the theory and measurement, *In: Planetary Electrodynamics*, 2, S.C. Coroniti and J. Hughes; editors: Gordon and Breach Science Publishers. New York, 1969, pp. 167-181.
18. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Turbulentnyy elektrodnyy effekt v prizemnom sloe [Turbulent electrode effect in the surface layer], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennyye nauki* [Izvestia of higher educational institutions. The North Caucasus region. Natural sciences.], 2003. Appendix No. 3, pp. 55-62.
19. Svidel'skiy S.S., Litvinova V.S., Kupovykh G.V., Klovo A.G. Formirovanie struktury atmosfernogo elektrodnoogo sloya [Formation of the structure of the atmospheric electrode layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5, pp. 130-141
20. Belousova O.V., Kupovykh G.V., Klovo A.G., Grivtsov V.V. Rezul'taty modelirovaniya elektrodinamicheskoy struktury turbulentnogo prizemnogo sloya [Results of modeling the electrodynamic structure of a turbulent surface layer], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4 (228), pp. 245-253.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Петров.

**Куповых Геннадий Владимирович** – Южный федеральный университет; email: kupovykh@sfedu.ru, г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371636; кафедра высшей математики, зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

**Клово Александр Георгиевич** – email: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

**Тимошенко Дмитрий Владимирович** – email: dmitrytim@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

**Кудринская Татьяна Владимировна** – email: tvkudrinskaya@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра Высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

**Белюсова Ольга Васильевна** – email: obelousova@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; ассистент.

**Kupovykh Gennady Vladimirovich** – Southern Federal University; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371636; the department of higher mathematics; head of department; dr. of phys. and math. sc.; professor.

**Klovo Alexander Georgievich** – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

**Timoshenko Dmitry Vladimirovich** – e-mail: dmitrytim@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

**Kudrinskaya Tatiana Vladimirovna** – e-mail: tvkudrinskaya@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

**Belousova Olga Vasilievna** – e-mail: obelousova@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; assistant.

УДК 519.68

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-181-189

**В.В. Семенистый, И.Э. Гамолina**

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ЯВНЫМ И НЕЯВНЫМ РАЗНОСТНЫМ СХЕМАМ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ**

*Задачи вычислительной аэродинамики являются одной из основных областей применения параллельных вычислений. В работе рассматривается параллельное моделирование квазиодномерной системы уравнений газовой динамики, описывающей течение газа по каналу переменного сечения по неявной и явной разностным схемам. Целью данной работы является исследование эффективности способов организации параллельных вычислений по неявным и явным разностным схемам решения внутренних задач аэродинамики. В статье проводится сравнительный анализ предложенных параллельных моделей для системы квазиодномерных уравнений газовой динамики, описывающих течения в канале переменного сечения, для численного решения которой используются различные параллельные алгоритмы. При построении параллельного алгоритма для неявной разностной схемы применяется метод расщепления по физическим процессам. Вычисления проводятся по схеме типа предиктор-корректор с введением сглаживающего оператора на этапе коррекции для подавления осцилляций решения. На дробных шагах схемы для решения трехдиагональных систем применяется алгоритм параллельной скалярной прогонки с выбором параметрических неизвестных. Для сравнения строится параллельный алгоритм для явной схемы Маккормака, широко применяемой в задачах вычислительной аэродинамики. Параллельные вычисления проводятся на вычислительных структурах с распределенной памятью и линейной коммутационной зависимостью между вычислительными устройствами рабочего поля. В работе приведены временные оценки для каждого этапа параллельного вычисления, как*