

УДК 551.594

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

А. А. Редин, Г. В. Куповых, А. С. Болдырев

Технологический институт Южного федерального университета, г. Таганрог, Россия

Разработана нестационарная электродинамическая модель атмосферного конвективно-турбулентного приземного слоя. В результате численных расчётов получены пространственно-временные распределения концентрации аэроионов, напряжённости электрического поля, плотности тока проводимости и плотности объёмного заряда в различных физических условиях. Конвективный перенос может усиливать или ослаблять действие турбулентного перемешивания на электрическое состояние приземного слоя атмосферы в зависимости от направления движения потоков.

ВВЕДЕНИЕ

Электродинамическое состояние приземного слоя атмосферы обуславливает так называемый «электродный эффект» [1]. Гидродинамические течения в приземном слое, возникающие в результате взаимодействия ветра с подстилающей поверхностью, характеризуются большими числами Рейнольдса и носят турбулентный характер [1–3]. В результате нагрева земной поверхности образуются конвективные течения. Совокупность турбулентных и конвективных течений определяет действие в приземном слое так называемого «конвективного токового генератора» [2].

Теория классического электродного эффекта [1, 2] предполагает атмосферу неподвижной, но в природе такая ситуация наблюдается достаточно редко, т.к. атмосфера обычно находится в состоянии турбулентного перемешивания. Впервые задача о турбулентном электродном эффекте была рассмотрена в работе [4]. Полный ток в атмосфере был представлен в виде суммы тока проводимости и турбулентного тока. Проблема моделирования турбулентного электродного эффекта также рассматривалась в работах [5–13] и обсуждалась в монографиях [3, 14, 15]. Во всех работах подчёркивалась важность учёта турбулентного перемешивания в моделях электродного эффекта для атмосферы.

В работах, обобщённых в монографии [2], получены решения стационарных уравнений, описывающих электрическую структуру приземного слоя в приближении классического и турбулентного электродных эффектов с использованием численных методов. В работах [16–18] построены и исследованы нестационарные модели электродинамической структуры турбулентного приземного слоя. В последующих работах [19–21] построены и численно реализованы нестационарные модели электродинамической структуры конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы. Получено, что время установления стационарного режима не зависит от скорости турбулентного и конвективного переносов и составляет примерно 12 мин. Однако в этих работах конвективный член задавался однородным в пространстве [17] или в виде экспоненциального высотного профиля [19], что корректно только при малой скорости конвективного переноса. Также ранее были построены нестационарные модели электродинамической структуры турбулентного [22] и конвективно-турбулентного [23] приземных слоёв при наличии в атмосфере аэрозольных частиц.

В данной работе сформулирована и численно реализована нестационарная электродинамическая модель атмосферного конвективно-турбулентного однородного по горизонтали приземного слоя в отсутствии аэрозольных частиц.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В основе модели лежит система ионизационно-рекомбинационных уравнений для лёгких ионов с учётом турбулентного и конвективного переносов и уравнение Пуассона [1, 2]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial n_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (b_1 n_1 E) - \frac{\partial}{\partial z} \left[D_T(z) \frac{\partial n_1}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} [v(z) n_1] &= q(z) - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{\partial n_2}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} (b_2 n_2 E) - \frac{\partial}{\partial z} \left[D_T(z) \frac{\partial n_2}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} [v(z) n_2] &= q(z) - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z} &= \frac{e}{\varepsilon_0} (n_1 - n_2).\end{aligned}\quad (1)$$

Начальные и граничные условия сформулированы в следующем виде:

$$\begin{aligned}n_1(z, t)|_{t=0} &= n_2(z, t)|_{t=0} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \{1 - \exp[-(z - z_0)/L_0]\}, \\ E(z, t)|_{t=0} &= E_0, \quad n_1(z, t)|_{z=z_0} = n_2(z, t)|_{z=z_0} = 0, \\ n_1(z, t)|_{z=l} &= n_2(z, t)|_{z=l} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \quad E(z, t)|_{z=z_0} = E_0.\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь n_1 и n_2 — объёмные концентрации положительных и отрицательных лёгких ионов соответственно, b_1 и b_2 — их подвижности, E — вертикальная проекция напряжённости электрического поля, z — высота над поверхностью Земли, $v(z)$ — вертикальная составляющая скорости конвективного переноса аэроионов, $D_T(z)$ — коэффициент турбулентной диффузии аэроионов, $q(z)$ — интенсивность ионообразования, α — коэффициент рекомбинации аэроионов, E_0 — напряжённость электрического поля у поверхности земли, L_0 — характерная толщина турбулентного электродного слоя, z_0 — параметр шероховатости земной поверхности, l — верхняя граница электродного слоя, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная. Коэффициент турбулентной диффузии аэроионов задавался в виде $D_T(z) = D_1 z$, что соответствует нейтральной стратификации приземного слоя атмосферы.

Ранее было показано [23], что система уравнений (1) характеризуется четырьмя безразмерными параметрами, позволяющими в зависимости от атмосферных условий выбирать физическую модель для описания электродинамических процессов в приземном слое:

$$\xi_1 = \frac{|b_1| E_\infty}{D_1}, \quad \xi_2 = \frac{|b_2| E_\infty}{D_1}, \quad \chi = \frac{v}{D_1}, \quad \gamma = \frac{en_\infty D_1 \tau}{\varepsilon_0 E_\infty}.$$

Параметры ξ_1 и ξ_2 позволяют выбирать тип модели электродного эффекта в зависимости от метеорологического режима приземного слоя; параметр γ определяет степень влияния электрического поля, а параметр χ показывает, механизм турбулентного или конвективного переноса является преобладающим.

При моделировании параметры системы (1) принимались следующими: $b_1 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \times \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $b_2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $E_0 = -100 \text{ В/м}$, $z_0 = 2,5 \times 10^{-3} \text{ м}$. Для функции интенсивности ионообразования q использовалось представление $q(z) = [7 + q_0 \exp(-z/0,423)] 10^6 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ в соответствии с работой [2].

Для описания конвективного переноса выбран высотный профиль скорости, который является более корректным с точки зрения гидродинамики по сравнению с рассмотренными ранее в работах [17, 19]:

$$v(z) = v_0 z (1 - z/l)/l. \quad (3)$$

Характерные значения параметров конвективного переноса задавались следующими: $v_0 = \pm 0,1$ м/с, $l = 100$ м.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для моделирования электрической структуры турбулентного приземного слоя использовалась система уравнений (1) с учётом начальных и граничных условий (2). При численном моделировании использовалось двухпараметрическое семейство схем [14] с весовыми параметрами $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,5$. Полученная система с трёхдиагональной матрицей решалась методом прогонки [24]. В результате численных расчётов получены пространственно-временные распределения концентраций положительно (n_1) и отрицательно (n_2) заряженных аэроионов, напряжённости электрического поля E , плотности тока проводимости j и плотности объёмного заряда ρ .

Влияние турбулентного перемешивания на электрическую структуру приземного слоя атмосферы подробно исследовалось ранее в работах [2, 17]. Установлено, что увеличение градиента коэффициента турбулентного перемешивания D_1 с 0,01 м/с до 0,1 м/с приводит к увеличению характерной толщины электродного слоя от нескольких метров до нескольких десятков метров, уменьшению плотности объёмного заряда и плотности тока проводимости вблизи поверхности земли. Электродный эффект (отношение E_0/E_∞) остаётся практически постоянным.

В результате моделирования электродинамической структуры конвективно-турбулентного приземного слоя получены следующие результаты. Когда конвективный перенос имеет место и направлен вниз даже в случае хорошо развитого турбулентного перемешивания, уменьшается характерный пространственный масштаб распределения электродинамических характеристик в приземном слое и увеличивается плотность положительного объёмного заряда у поверхности земли (см. табл. 1 и кривые 2, 3 на рис. 1а). Величина электродного эффекта во всём электродном слое (отношение E_0/E_∞) в этом случае уменьшается более чем на 9 %. Толщина конвективно-турбулентного электродного слоя составила около 50 м, т.е. уменьшилась более чем на 25 % по сравнению с чисто турбулентным случаем. Время установления стационарного режима осталось неизменным и равным 600 с. Плотность объёмного заряда увеличивается приблизительно на 10 %

Таблица 1. Электрические параметры вблизи поверхности земли в условиях значительного турбулентного перемешивания ($D_1 = 0,1$ м/с, $E_0 = -100$ В/м, $q_0 = 4,8 \cdot 10^6$ м⁻³·с⁻¹)

Параметры	$v_0 = -0,1$ м/с	$v_0 = 0$	$v_0 = 0,1$ м/с
t_{st} , с	600	600	600
L , м	47,8	67,3	72,2
$n_1(z = \infty) = n_2(z = \infty)$, 10^9 м ⁻³	2,09	2,09	2,20
$n_1(z = 0,5 \text{ м})/n_1(z = \infty)$	0,73	0,66	0,59
$n_1(z = 1 \text{ м})/n_1(z = \infty)$	0,83	0,75	0,67
$n_1(z = 2 \text{ м})/n_1(z = \infty)$	0,92	0,83	0,75
$n_2(z = 0,5 \text{ м})/n_2(z = \infty)$	0,54	0,49	0,43
$n_2(z = 1 \text{ м})/n_2(z = \infty)$	0,67	0,60	0,53
$n_2(z = 2 \text{ м})/n_2(z = \infty)$	0,79	0,71	0,63
$-E_\infty$, В/м	55,0	49,5	45,4
E_0/E_∞	1,82	2,02	2,18
$E_0/E(z = 0,5 \text{ м})$	1,04	1,03	1,03
$E_0/E(z = 1 \text{ м})$	1,07	1,07	1,06
$E_0/E(z = 2 \text{ м})$	1,14	1,13	1,12

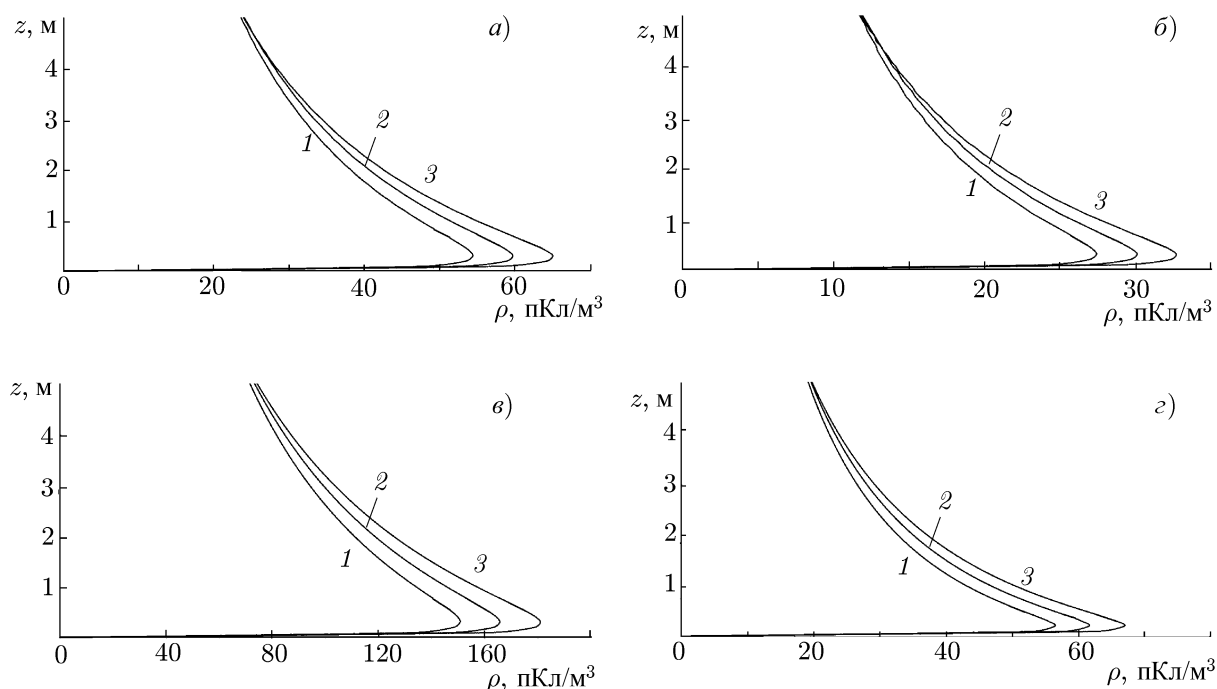


Рис. 1. Плотность объёмного заряда ρ в конвективно-турбулентном приземном слое. Значения параметров следующие: $D_1 = 0,1$ м/с, $E_0 = -100$ В/м (а, г), -50 В/м (б), -300 В/м (в), $q_0 = 4,8 \times 10^6 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (а-в), $80 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (г). На кривых 1 — $v_0 = 0,1$ м/с, 2 — $v_0 = 0$, 3 — $v_0 = -0,1$ м/с

для высот порядка нескольких метров. Максимум плотности объёмного заряда наблюдается на тех же высотах, его значение также увеличивается приблизительно на 10 %. Общий вид высотного профиля плотности тока проводимости (рис. 2а, кривые 2, 3) практически не меняются, но максимум профиля уширяется и смещается ниже на высоту около 3 м.

При конвективном переносе, направленном вверх, характерный высотный масштаб распределения электродинамических параметров в приземном слое увеличивается (см. табл. 1 и кривые 1, 2 на рис. 1а). Плотность положительного объёмного заряда у поверхности земли уменьшается. Величина электродного эффекта (отношение E_0/E_∞) во всём электродном слое и толщина электродного слоя увеличиваются приблизительно на 10 % по сравнению со случаем отсутствия конвективного переноса. Время установления стационарного режима практически не меняется. Плотность объёмного заряда у поверхности земли и её максимум остаются на тех же высотах и уменьшаются приблизительно на 10 %. Общий вид высотного профиля плотности тока проводимости (кривые 1, 2 на рис. 2а) практически не меняется, но максимум профиля уширяется и смещается выше на высоту около 3,5–4 м.

При изменении напряжённости электрического поля на поверхности земли с -50 до -300 В/м объёмный заряд у поверхности земли при $v_0 = 0$ значительно увеличивается (см. рис. 1б, в, 2б, в и табл. 2, 3). При этом увеличивается характерный пространственный масштаб распределения электрических параметров в приземном слое и, как следствие, толщина электродного слоя увеличивается приблизительно на 24 %. Величина электродного эффекта (отношение E_0/E_∞) во всём электродном слое остаётся практически неизменной. Время установления стационарного режима при этом не меняется и остаётся равным 500 с, т. е. не зависит от напряжённости электрического поля у поверхности земли. Плотность объёмного заряда увеличивается более чем в 5 раз на высотах порядка нескольких метров. Максимальное значение ρ увеличивается с 30 до 166 пКл/м³, при этом высота максимума остаётся неизменной и равной 0,3 м. Плотность тока j также увеличивается приблизительно в 5 раз. Максимальные значения перемещаются на большие высоты и

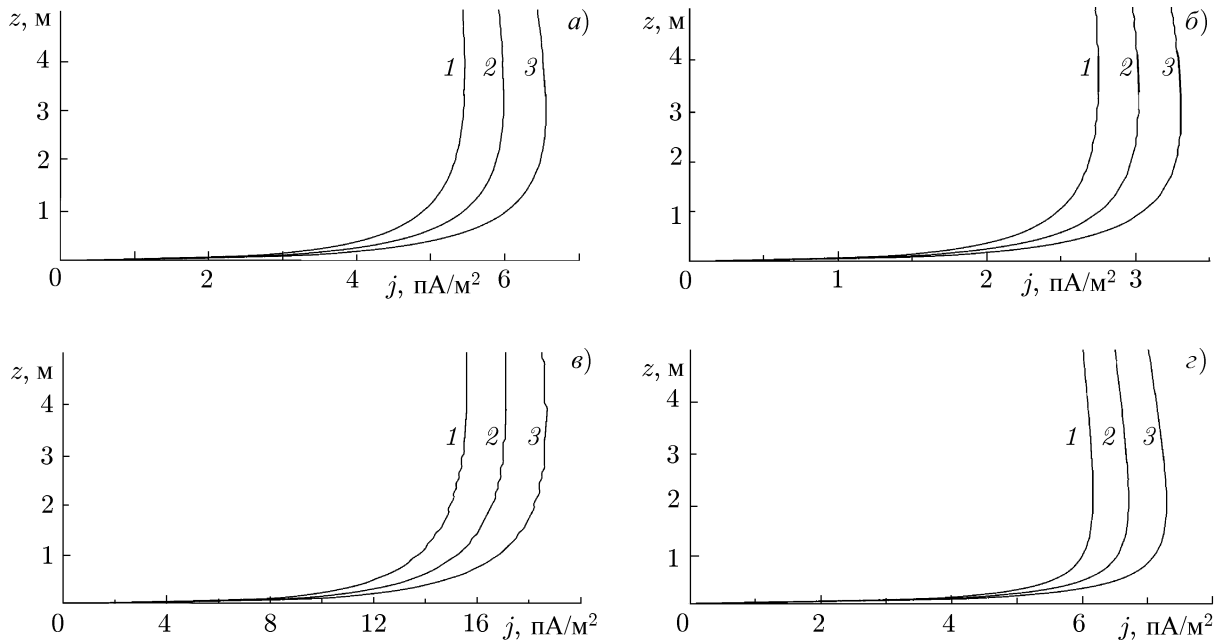


Рис. 2. Плотность тока проводимости j в конвективно-турбулентном приземном слое. Значения параметров и обозначения кривых те же, что и на рис. 1

Таблица 2. Электрические параметры вблизи поверхности земли в слабом электрическом поле ($D_1 = 0,1$ м/с, $E_0 = -50$ В/м, $q_0 = 4,8 \cdot 10^6$ м⁻³ · с⁻¹)

Параметры	$v_0 = -0,1$ м/с	$v_0 = 0$	$v_0 = 0,1$ м/с
t_{st} , с	500	500	600
L , м	51,8	62,5	72,0
$n_1(z = \infty) = n_2(z = \infty)$, 10^9 м ⁻³	2,09	2,09	2,09
$n_1(z = 0,5$ м)/ $n_1(z = \infty)$	0,69	0,62	0,56
$n_1(z = 1$ м)/ $n_1(z = \infty)$	0,80	0,72	0,64
$n_1(z = 2$ м)/ $n_1(z = \infty)$	0,89	0,80	0,72
$n_2(z = 0,5$ м)/ $n_2(z = \infty)$	0,60	0,53	0,48
$n_2(z = 1$ м)/ $n_2(z = \infty)$	0,72	0,64	0,57
$n_2(z = 2$ м)/ $n_2(z = \infty)$	0,83	0,74	0,66
$-E_\infty$, В/м	27,8	25,3	22,9
E_0/E_∞	1,80	1,98	2,18
$E_0/E(z = 0,5$ м)	1,04	1,03	1,03
$E_0/E(z = 1$ м)	1,07	1,07	1,06
$E_0/E(z = 2$ м)	1,14	1,13	1,12

становятся слабо различимы (сильно уширены).

При $v_0 = -0,1$ м/с, независимо от напряжённости электрического поля у поверхности земли, характерный высотный масштаб распределения электродинамических характеристик уменьшается в приземном слое, а плотность положительного объёмного заряда увеличивается у поверхности земли (см. табл. 2, 3 и кривые 2, 3 на рис. 1б, в, 2б, в). Также уменьшается величина электродного эффекта во всём электродном слое (отношение E_0/E_∞) приблизительно на 10 % и толщина электродного слоя, а плотность объёмного заряда и плотность тока проводимости увеличиваются для высот порядка нескольких метров.

Таблица 3. Электрические параметры вблизи поверхности земли в сильном электрическом поле ($D_1 = 0,1$ м/с, $E_0 = -300$ В/м, $q_0 = 4,8 \cdot 10^6$ м⁻³ · с⁻¹)

Параметры	$v_0 = -0,1$ м/с	$v_0 = 0$	$v_0 = 0,1$ м/с
t_{st} , с	500	500	600
L , м	47,6	77,5	89,4
$n_1(z = \infty) = n_2(z = \infty)$, 10^9 м ⁻³	2,09	2,09	2,09
$n_1(z = 0,5$ м)/ $n_1(z = \infty)$	0,87	0,79	0,72
$n_1(z = 1$ м)/ $n_1(z = \infty)$	0,94	0,86	0,77
$n_1(z = 2$ м)/ $n_1(z = \infty)$	0,99	0,90	0,82
$n_2(z = 0,5$ м)/ $n_2(z = \infty)$	0,35	0,31	0,27
$n_2(z = 1$ м)/ $n_2(z = \infty)$	0,47	0,42	0,37
$n_2(z = 2$ м)/ $n_2(z = \infty)$	0,62	0,55	0,49
$-E_\infty$, В/м	159	145	131
E_0/E_∞	1,88	2,07	2,29
$E_0/E(z = 0,5$ м)	1,03	1,03	1,03
$E_0/E(z = 1$ м)	1,07	1,06	1,06
$E_0/E(z = 2$ м)	1,13	1,123	1,11

При $v_0 = 0,1$ м/с характерный масштаб распределения электродинамических характеристик в приземном слое увеличивается, плотность положительного объёмного заряда уменьшается у поверхности земли (см. табл. 2, 3 и кривые 1, 2 на рис. 1б, в, 2б, в). Также увеличивается величина электродного эффекта во всём электродном слое (отношение E_0/E_∞) приблизительно на 10 % и толщина электродного слоя, а плотность объёмного заряда и плотности тока проводимости уменьшаются для высот порядка нескольких метров.

Увеличившаяся скорость ионообразования незначительно увеличивает объёмный заряд и на несколько процентов уменьшает характерную толщину электродного слоя. Объёмный заряд при этом положителен, тогда как при более слабой турбулентной диффузии объёмный заряд становился отрицательным [2]. Увеличение скорости ионообразования также приводит к тому, что значение электродного эффекта во всём электродном слое уменьшается более чем на 15 % (см. табл. 4, рис. 1г, 2г). Время установления стационарного режима при этом стало равным 500 с, что на 20 % меньше, чем в рассмотренных ранее случаях.

В большинстве рассматриваемых случаев знак объёмного заряда внутри электродного слоя положительный. В работе [2] исследованы условия генерации отрицательного объёмного заряда вблизи поверхности земли, приводящего к изменению знака электродного эффекта. Установлено, что возможными причинами появления отрицательного заряда являются повышенная ионизация в тонком слое вблизи поверхности земли в случае слабого турбулентного перемешивания или слабое электрическое поле. При этом усиление турбулентного перемешивания или электрического поля разрушает отрицательный объёмный заряд.

Результаты моделирования генерации отрицательного объёмного заряда в конвективно-турбулентном приземном слое приведены на рис. 3, 4 и в табл. 5.

Как и ранее, увеличение скорости ионообразования до $80 \cdot 10^6$ м⁻³ · с⁻¹ приводит к появлению отрицательного объёмного заряда и, как следствие, к изменению знака электродного эффекта. При этом у поверхности земли объёмный заряд остаётся положительным, но его знак меняется на высоте более 2 м.

Из анализа рис. 3, 4 и данных табл. 5 можно сделать вывод, что не только усиление турбулентного перемешивания и электрического поля, но и конвективного переноса (при $v_0 < 0$)

Таблица 4. Электрические параметры вблизи поверхности земли в условиях повышенной ионизации ($D_1 = 0,1$ м/с, $E_0 = -100$ В/м, $q_0 = 80 \cdot 10^6$ м⁻³ · с⁻¹)

Параметры	$v_0 = -0,1$ м/с	$v_0 = 0$	$v_0 = 0,1$ м/с
t_{st}, c	500	500	500
L, m	49,5	55,0	60,5
$n_1(z = \infty) = n_2(z = \infty), 10^9 \text{ м}^{-3}$	2,09	2,09	2,09
$n_1(z = 0,5 \text{ м})/n_1(z = \infty)$	0,89	0,81	0,75
$n_1(z = 1 \text{ м})/n_1(z = \infty)$	0,96	0,88	0,80
$n_1(z = 2 \text{ м})/n_1(z = \infty)$	1,01	0,92	0,84
$n_2(z = 0,5 \text{ м})/n_2(z = \infty)$	0,70	0,65	0,59
$n_2(z = 1 \text{ м})/n_2(z = \infty)$	0,81	0,74	0,67
$n_2(z = 2 \text{ м})/n_2(z = \infty)$	0,90	0,81	0,74
$-E_\infty, \text{ В/м}$	63,0	59,3	55,7
E_0/E_∞	1,59	1,69	1,80
$E_0/E(z = 0,5 \text{ м})$	1,04	1,03	1,03
$E_0/E(z = 1 \text{ м})$	1,07	1,07	1,06
$E_0/E(z = 2 \text{ м})$	1,13	1,12	1,11

Таблица 5. Электрические параметры вблизи поверхности земли в условиях слабого турбулентного перемешивания и повышенной ионизации ($D_1 = 0,01$ м/с, $E_0 = -100$ В/м, $q_0 = 80 \cdot 10^6$ м⁻³ · с⁻¹)

Параметры	$v_0 = -0,1$ м/с	$v_0 = 0$	$v_0 = 0,1$ м/с
t_{st}, c	700	600	400
L, m	46,5	14,3	51,1
$n_1(z = \infty) = n_2(z = \infty), 10^9 \text{ м}^{-3}$	2,09	2,09	2,09
$n_1(z = 0,5 \text{ м})/n_1(z = \infty)$	1,60	1,47	1,36
$n_1(z = 1 \text{ м})/n_1(z = \infty)$	1,38	1,25	1,14
$n_1(z = 2 \text{ м})/n_1(z = \infty)$	1,22	1,09	0,98
$n_2(z = 0,5 \text{ м})/n_2(z = \infty)$	1,10	1,02	0,96
$n_2(z = 1 \text{ м})/n_2(z = \infty)$	1,22	1,11	1,03
$n_2(z = 2 \text{ м})/n_2(z = \infty)$	1,21	1,09	0,98
$-E_\infty, \text{ В/м}$	87,8	81,3	76,8
E_0/E_∞	1,14	1,23	1,30
$E_0/E(z = 0,5 \text{ м})$	1,21	1,19	1,17
$E_0/E(z = 1 \text{ м})$	1,29	1,257	1,22
$E_0/E(z = 2 \text{ м})$	1,33	1,28	1,24

приводит к разрушению отрицательного объёмного заряда.

Результаты расчётов показывают, что при $v_0 < 0$ увеличение скорости конвективного переноса приводит к уменьшению высотного масштаба электрической структуры приземного слоя. При этом плотность объёмного заряда и плотность тока проводимости увеличиваются для высот порядка нескольких метров.

При $v_0 > 0$ увеличение скорости конвективного переноса приводит к увеличению высотного масштаба электрической структуры приземного слоя. При этом плотность объёмного заряда и плотность тока проводимости уменьшаются у поверхности земли.

Таким образом, можно сделать вывод об уменьшении толщины турбулентного электродного

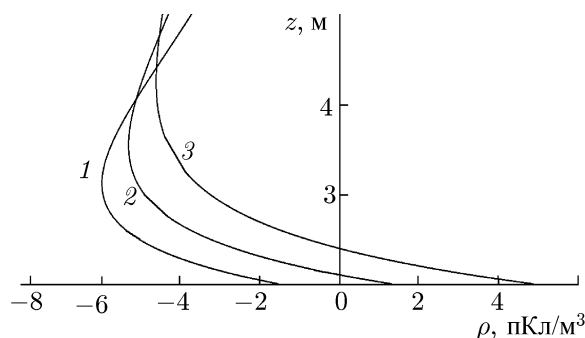


Рис. 3. Плотность объёмного заряда ρ в конвективно-турбулентном приземном слое. Значения параметров следующие: $D_1 = 0,01$ м/с, $E_0 = -100$ В/м, $q_0 = 80 \cdot 10^6$ м⁻³ · с⁻¹, $v_0 = 0,1$ м/с (кривая 1), $v_0 = 0$ (кривая 2), $v_0 = -0,1$ м/с (кривая 3)

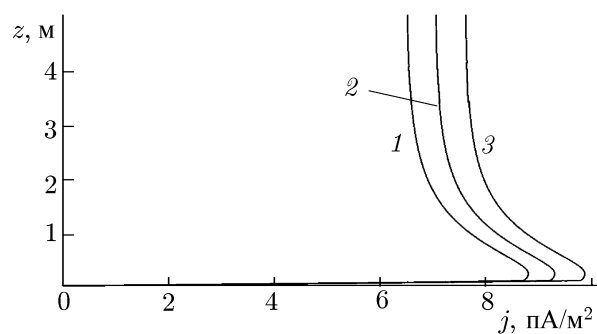


Рис. 4. Плотность тока проводимости j в конвективно-турбулентном приземном слое. Значения параметров и обозначения кривых такие же, как на рис. 3

слоя вследствие конвективного переноса, направленного вниз. При достаточно сильной конвекции электрическая структура приземного слоя становится похожей на структуру в случае классического электродного эффекта. При конвективном переносе, направленном вверх, увеличивается влияние турбулентного переноса на электрическую структуру приземного слоя, что приводит к увеличению толщины электродного слоя.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М. // Сб. научных трудов 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Т. 1. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2003. С. 101.
2. Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во Таганрогского радиотехнического университета, 1998. 123 с.
3. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 342 с.
4. Whipple F. I. W. // Terr. Magn. Atm. Electr. 1935. V. 7. P. 355.
5. Тверской П. Н., Тимофеев М. П. // Изв. АН СССР. Сер. географическая и геофизическая. 1948. Т. 12, № 5. С. 377.
6. Chalmers J. A. // J. Atm. Terr. Phys. 1966. V. 28. P. 565.
7. Chalmers J. A. // J. Atm. Terr. Phys. 1966. V. 28. P. 573.
8. Chalmers J. A. // J. Atm. Terr. Phys. 1966. V. 28. P. 1029.
9. Chalmers J. A. // J. Atm. Terr. Phys. 1967. V. 29. P. 217.
10. Милин В. В. // Уч. записки Кировского пединститута. 1954. Вып. 8. С. 11.
11. Милин В. В., Малахов С. Г. // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. 1953. № 3. С. 264.
12. Hoppel W. A. // Planetary Electrodynamics. V. 2 / Ed. by S. C. Coroniti, J. Hughes. New York: Gordon and Breach Sci. Publ., 1969. P. 167.
13. Willet J. C. // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. P. 8453.
14. Френкель Я. И. Теория явлений атмосферного электричества М.: Комкнига, 2007. 162 с.
15. Israel H. Atmospheric electricity. V. 2. 1973. 796 p.
16. Latham D. G., Poor H. W. // J. Geophys. Res. 1972. V. 77, No. 15. P. 2669.

17. Куповых Г. В. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. Таганрог: Изд-во Таганрогского технологического института ЮФУ, 2009. 114 с.
18. Morozov V., Kupovykh G., Klovo A. // Proc. 13th Int. Conf. Atmospheric Electricity, August 13–17, 2007, Beijing, China. P. 154.
19. Boldyrev A., Kupovykh G., Redin A. // Proc. 2nd Int. Conf. Electronic Computer Technology, May 7–10, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia. P. 247.
20. Болдырев А. С., Редин А. А., Куповых Г. В., Морозов В. Н. // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Спецвыпуск. Физика атмосферы. 2010. С. 23.
21. Редин А. А., Болдырев А. С., Клово А. Г., Куповых Г. В. // Модели и алгоритмы для имитации физико-химических процессов: Материалы Международной научно-технической конференции, Таганрогский государственный педагогический институт. Таганрог: Изд-во НП «ЦРЛ», 2008. С. 146.
22. Редин А. А., Клово А. Г., Куповых Г. В., Морозов В. Н. // Изв. ЮФУ. Технические науки. Таганрог: Изд-во Таганрогского технологического института ЮФУ, 2009. № 8 (97). С. 93.
23. Редин А. А., Куповых Г. В., Клово А. Г., Болдырев А. С. // Изв. ЮФУ. Технические науки. Таганрог: Изд-во Таганрогского технологического института ЮФУ, 2011. № 8 (121). С. 111.
24. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы математической физики. М.: Научный мир, 2003. 316 с.

Поступила в редакцию 12 ноября 2013 г.; принята в печать 27 декабря 2013 г.

ELECTRODYNAMIC MODEL OF THE ATMOSPHERIC CONVECTIVE-TURBULENT SURFACE LAYER

A. A. Redin, G. V. Kupovykh, and A. S. Boldyrev

We developed a nonstationary electrodynamic model of the atmospheric convective-turbulent surface layer. As a result of numerical calculations, spatio-temporal distributions of the aero-ion concentration, electric field intensity, conduction current density, and space charge density were obtained under various physical conditions. Depending on the stream direction, convective transfer can strengthen or weaken the effect of turbulent mixing on the electrical state of the atmospheric surface layer.