

Сидоренко Борис Владимирович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

E-mail: sidorenkobv@mail.ru

347928, Россия, Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44

Тел.: 8(8634) 37-16-06

Sidorenko Boris Vladimirovich

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

E-mail: sidorenkobv@mail.ru

44, Nekrasovsky, GSP-17a, Taganrog, 347928, Russia, Ph.: +7(8634) 37-16-06

УДК 551.594

А. А. Редин, А. Г. Клово, Г. В. Куповых

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

В работе построена модель нестационарного горизонтально-однородного приземного слоя с учетом однократно заряженного аэрозоля.

Получены распределения электрических характеристик в приземном слое атмосферы в зависимости от интенсивности турбулентного перемешивания и концентраций аэрозольных частиц.

Приземный слой; аэрозоль; аэроионы; турбулентное перемешивание; электродный эффект; электрическое поле; ток; проводимость.

A.A. Redin, A.G. Klovo, G.V. Kupoviych

THE MATHEMATICAL MODELLING OF ELECTRODYNAMIC STRUCTURE OF THE ATMOSPHERE SURFACE LAYER IN AEROSOL POLLUTION CONDITIONS

The model of non-stationary horizontally similar surface layer with single-charged aerosol influence is developed.

The distributions of electrical characteristics in the atmosphere surface layer in dependence of turbulence mixing and aerosol particles concentration are received.

Surface layer; aerosol; aero-ion; turbulent mixing; electrode effect; electric field; current; conductivity.

Для нестационарного горизонтально-однородного приземного слоя с учетом однократно заряженного аэрозоля система уравнений, описывающих его электрическое состояние в приближении турбулентного электродного эффекта, имеет вид [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 + N_2 + N_0 = N = const, \\ \frac{\partial N_{1,2}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi(z) \frac{\partial N_{1,2}}{\partial z} \right) = \eta_2 N_0 n_{1,2} - \eta_1 N_{1,2} n_{2,1}, \\ \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} E n_{1,2}) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) = \\ = q - \alpha n_1 n_2 - \eta_1 n_{1,2} N_0, \\ \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_1 - n_2 + N_1 - N_2). \end{array} \right. \quad (1)$$

Значения параметров, входящих в систему уравнений (1), приведенных в табл.1.

Используя стационарное представление для коэффициентов турбулентной диффузии легких $D_T(z) = D_1 \cdot z$ и тяжелых $\chi(z) = D_2 \cdot z$ ионов и полагая $D_1 = D_2$, для анализа системы (1) перейдем к безразмерной форме записи уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N_0}{N_\infty} = \frac{N}{N_\infty} - (N'_1 + N'_2), \\ \frac{\tau}{T} \frac{\partial N'_{1,2}}{\partial t'} - \frac{\partial}{\partial z'} \left(z' \frac{\partial N'_{1,2}}{\partial z'} \right) = \tau \cdot n_\infty \left(\frac{\eta_2 N_0}{N_\infty} - \eta_1 n'_{2,1} N'_{1,2} \right), \\ \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} \cdot E') - \frac{\partial}{\partial z'} \left(z' \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) = \\ = \frac{\tau}{n_\infty} \left(q - \alpha n_\infty^2 n'_1 n'_2 - \eta_1 n_\infty N_\infty n'_{1,2} N'_{2,1} - \eta_2 n_\infty N_0 n'_{1,2} \right), \\ \frac{\partial E'}{\partial z'} = \gamma_1 (n'_1 - n'_2) + \gamma_2 (N'_1 - N'_2), \end{array} \right. \quad (2)$$

где $t' = t/T$, $z' = z/l_1$, $n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty$, $E' = E/E_\infty$, $N'_{1,2} = N_{1,2}/N_\infty$,
 $n_{1,2}|_{z \rightarrow \infty} = n_\infty = \sqrt{\frac{q_1}{\alpha}}$, $E|_{z \rightarrow \infty} = E_\infty$, $l_1 = D_1 \cdot \tau$, $n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty$,
 $n_\infty = \frac{-BN + \left((BN)^2 + 4\alpha q \right)^{1/2}}{2\alpha}$, $B = \frac{2\eta_2 \eta_1}{2\eta_2 + \eta_1}$, $N_\infty = \frac{\eta_2 N}{2\eta_2 + \eta_1}$, $\tau = \left(4\alpha q_\infty + (\eta N)^2 \right)^{-1/2}$.

Характерное время протекания гидродинамических процессов (T) составляет несколько часов, тогда как характерное время протекания электрических процессов $\tau \approx 150 - 60$ с (для $q = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$) при $N \sim 10^8 - 10^{10} \text{ м}^{-3}$ соответственно [3].

Оценки для толщины электродного слоя при коэффициенте турбулентной диффузии $D_1 = 0,1 \text{ м с}^{-1}$ от концентрации аэрозолей соответственно равны: $L_0 = 15 - 6,5 \text{ м}$ при $N = 10^8 - 10^{10} \text{ м}^{-3}$.

Система уравнений (2) характеризуется безразмерными параметрами:

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| E_\infty \cdot \tau}{l_1}, \quad \gamma_1 = \frac{e n_\infty l_1}{\varepsilon_0 E_\infty}, \quad \gamma_2 = \frac{e N_\infty l_1}{\varepsilon_0 E_\infty}.$$

Таблица 1

Параметры системы уравнений

Параметр	Название	Значение
E	напряженность электрического поля	$\sim 10^2 B \cdot m^{-1}$
b_1	подвижность положительных аэроионов	$1,2 \cdot 10^{-4} m^2 B^{-1} c^{-1}$
b_2	подвижность отрицательных аэроионов	$1,4 \cdot 10^{-4} m^2 B^{-1} c^{-1}$
η_1	коэффициент взаимодействия аэроионов с заряженными ядрами	$1,4 \cdot 10^{-12} m^3 c^{-1}$
η_2	коэффициент взаимодействия аэроионов с нейтральными тяжелыми ядрами	$4 \cdot 10^{-12} m^3 c^{-1}$
α	коэффициент рекомбинации аэроионов	$1,6 \cdot 10^{-12} m^3 c^{-1}$
z_0	параметр шероховатости земной поверхности	$2,5 \cdot 10^{-3} m$
e	элементарный заряд	$1,6 \cdot 10^{-19} Кл$
ϵ_0	электрическая постоянная	$8,85 \cdot 10^{-12} Ф/м$
z_0	параметр шероховатости земной поверхности	$2,5 \cdot 10^{-3} m$
$n_{1,2}$	объемная концентрация положительных и отрицательных аэроионов	$\sim (10^8 - 10^9) m^{-3}$
$N_{0,1,2}$	концентрация нейтральных аэрозольных частиц, объемная концентрация положительных и отрицательных тяжелых ионов	$\sim (10^8 - 10^{10}) m^{-3}$
D_T	коэффициент турбулентной диффузии аэроионов	$(0,01 - 0,1) m^2 c^{-1}$
q	интенсивность ионообразования	$\sim (10^6 - 10^7) m^{-3} c^{-1}$
χ	коэффициент турбулентного перемешивания для тяжелых ионов	$(0,01 - 0,1) m^2 c^{-1}$

Если $\xi_{i,2} < 1$, то в приземном слое атмосферы имеет место турбулентный электродный эффект. ($\xi_{i,2} \ll 1$, приближение сильного турбулентного перемешивания) [1].

В случае $|\gamma_{1,2}| \ll 1$ электрическим полем, создаваемым электрическим объемным зарядом, создаваемым легкими, тяжелыми ионами, соответственно, вблизи поверхности земли, можно пренебречь.

В случае $|\gamma_2| \gg |\gamma_1|$ электрическим полем, создаваемым электрическим объемным зарядом, создаваемым легкими ионами, вблизи поверхности земли, можно пренебречь. В этом случае предполагается, что электрическое состояние приземного слоя определяется только тяжелыми ионами, образовавшимися за счет взаимодействия аэрозоля с аэроионами.

Для рассматриваемых условий значения характерных параметров приведены в табл. 2.

Начальные и граничные условия задавались в виде:
для легких ионов

$$\begin{cases} n_{1,2}|_{t=0} = \frac{-BN + ((BN)^2 + 4\alpha q)^{1/2}}{2\alpha} \left(1 - e^{-\frac{z-z_0}{L_0}} \right), \\ n_{1,2}|_{z=z_0} = 0, \\ n_{1,2}|_{z=\infty} = \frac{-BN + ((BN)^2 + 4\alpha q)^{1/2}}{2\alpha}, \end{cases} \quad (3)$$

для тяжелых ионов и электрического поля

$$\begin{cases} N_{1,2}|_{t=0} = \frac{\eta_2 N}{2\eta_2 + \eta_1} \frac{L_0}{l_\infty} \left(\frac{z}{L_0} + e^{-\frac{(z-z_0)}{L_0}} \right), \\ \left(\frac{\partial N_{1,2}}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_0} = 0, \\ N_{1,2}|_{z=\infty} = \frac{\eta_2 N}{2\eta_2 + \eta_1}, \\ E|_{t=0} = E_0, \\ E|_{z=z_0} = E_0. \end{cases} \quad (4)$$

Для численного решения системы уравнений (1) с начальными и граничными условиями (3)-(4) использовалось однопараметрическое семейство схем с весами [2].

Множитель в коэффициенте турбулентного перемешивания варьировались в пределах от 0,01 до 0,1 м/с.

Таблица 2

Значения характерных параметров

$D_1 = 0,1 \text{ мс}^{-1}$			
$N, \text{ м}^{-3}$	$\xi_{1,2}$	$ \gamma_1 $	$ \gamma_2 $
10^8	$\approx 0,06$	≈ 11	$\approx 0,2$
10^9	$\approx 0,06$	≈ 9	$\approx 2,2$
10^{10}	$\approx 0,09$	$\approx 0,8$	$\approx 6,5$

Численное моделирование электрического состояния приземного слоя проведено при наличии в нем аэрозольных частиц с концентрациями $N = 10^8 - 10^{10} \text{ м}^{-3}$. На рис. 2, 3 приведены распределения $n_{1,2}, E, N_{1,2}$ для случаев $N = 10^8, 10^9, 10^{10} \text{ м}^{-3}$. В таблице 3 приведены значения параметров электродного эффекта на высотах 1 и 2 метра.

Анализ результатов расчетов показывает, что с увеличением концентрации аэрозольных частиц электродный эффект (E/E_∞) во всем электродном слое и на высоте нескольких метров от поверхности уменьшается. Значения $n_{1,2}(z)/n_\infty$ при

этом увеличиваются. При концентрациях $N < 10^9 \text{ м}^{-3}$ аэрозоль практически не влияет на распределение $n_{1,2}$ и E в приземном слое, тогда как при значениях $N \sim 10^9 - 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ происходит уменьшение толщины электродного слоя.

При концентрациях N , превышающих $5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ электрическое состояние приземного слоя определяется практически только тяжелыми ионами и применение уравнений электродного эффекта теряет смысл, то есть объемный заряд, создаваемый тяжелыми ионами, образовавшимися за счет соединения аэрозоля с легкими ионами, начинает оказывать существенное влияние при концентрациях, превышающих 10^9 м^{-3} .

По данным численного эксперимента были проведены расчеты величины плотности электрического заряда согласно выражению (5) для аэроионов (рис. 1, а) и выражению (6) для тяжелых ионов (рис 1, б).

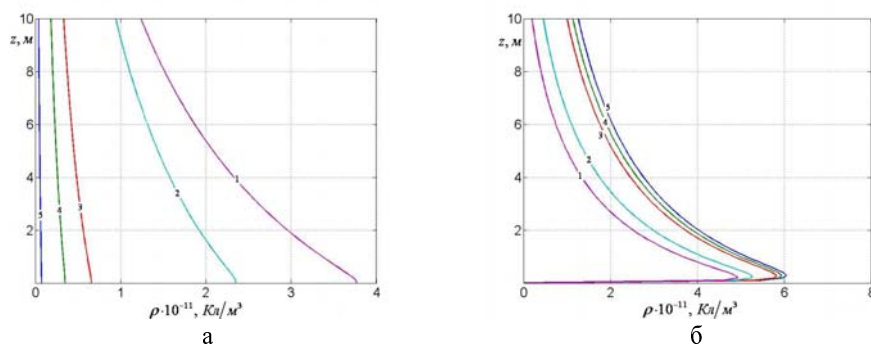


Рис. 1. Плотность объемного заряда $\rho(z, t)$ на различных высотах в турбулентном электродном слое (кривые 1,2,3,4,5 для $N \sim 10^8$; $5 \cdot 10^8$; 10^9 ; $5 \cdot 10^9$; 10^{10} м^{-3} соответственно)

$$\rho(z) = e(n_1(z) - n_2(z)), \quad (5)$$

$$\rho(z) = e(N_1(z) - N_2(z)). \quad (6)$$

Дальнейшее увеличение концентрации аэрозольных частиц приводит к тому, что электрический режим приземного слоя начинает определяться распределением объемного заряда, создаваемого тяжелыми ионами; а значит вкладом аэроионов можно пренебречь.

Анализ параметров электродного эффекта ($n_{1,2}/n_\infty$, $N_{1,2}/N_\infty$ и E/E_∞) на высоте до 2 метров, приведенных в табл. 3, показывает их нелинейную зависимость от значений N . Эта нелинейность обусловлена нелинейностью исходных уравнений электродного эффекта.

На рис. 2,3 приведены модельные расчеты электрических характеристик приземного слоя атмосферы для различных физических условий. Время установления стационарной электрической структуры приземного слоя составляет порядка 15 мин. и увеличивается с увеличением концентрации аэрозольных частиц, что совпадает с результатами, приведенными в работе [4], в случаях малых концентраций или отсутствия аэрозольных частиц.

Таблица 3

Значение электрических характеристик вблизи поверхности земли при наличии аэрозольных частиц в атмосфере

N, M	$D = 0,01 M / c$				$D = 0,1 M / c$			
	10^8	10^9	$5 \cdot 10^9$	10^{10}	10^8	10^9	$5 \cdot 10^9$	10^{10}
L, M	1,49	1,46	1,03	0,64	14,94	14,62	10,34	6,44
E/E_∞	2,18	2,09	1,70	1,47	2,05	1,96	1,56	1,30
$n^{(\infty)} \cdot 10^9$	2,05	1,75	0,94	0,55	2,05	1,75	0,94	0,55
	1	1,14	1,99	3,29	0,77	0,89	1,61	2,71
$n_1(2)/n_1(\infty)$	1	1,14	2,04	3,45	0,85	0,98	1,77	2,98
$n_2(1)/n_2(\infty)$	0,57	0,70	1,47	2,72	0,61	0,72	1,34	2,30
$n_2(2)/n_2(\infty)$	0,78	0,94	1,91	3,43	0,72	0,85	1,57	2,70
$E_0/E(1)$	1,32	1,36	1,50	1,63	1,07	1,07	1,09	1,10
$E_0/E(2)$	1,56	1,64	1,90	2,14	1,13	1,14	1,16	1,19
$N^{(\infty)} \cdot 10^9$	0,04	0,43	2,13	4,26	0,04	0,43	2,13	4,26
$N_1(1)/N_1(\infty)$	1,31	1,26	1,17	1,12	1,05	1,05	1,03	1,02
$N_1(2)/N_1(\infty)$	1,22	1,18	1,10	1,06	1,05	1,04	1,03	1,02
$N_2(1)/N_2(\infty)$	0,72	0,77	0,84	0,89	0,95	0,96	0,97	0,98
$N_2(2)/N_2(\infty)$	0,80	0,83	0,90	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98

Таким образом, следует вывод о том, что наличие в атмосфере концентрации аэрозольных частиц более $5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ оказывает заметное влияние на распределение $n_{1,2}$ и E вблизи поверхности земли. Объемный заряд, создаваемый тяжелыми ионами, образовавшимися за счет соединения аэрозоля с аэроионами, начинает оказывать существенное влияние при концентрациях превышающих 10^9 м^{-3} , а при еще больших концентрациях электрическое состояние приземного слоя определяется только тяжелыми ионами.

Обозначения: $n_{1,2}(z)$, $E(z)$ - значения электрических характеристик на высоте z ; $n_{1,2}^{(\infty)}$, E_∞ - значения электрических характеристик на верхней границе электродного слоя.

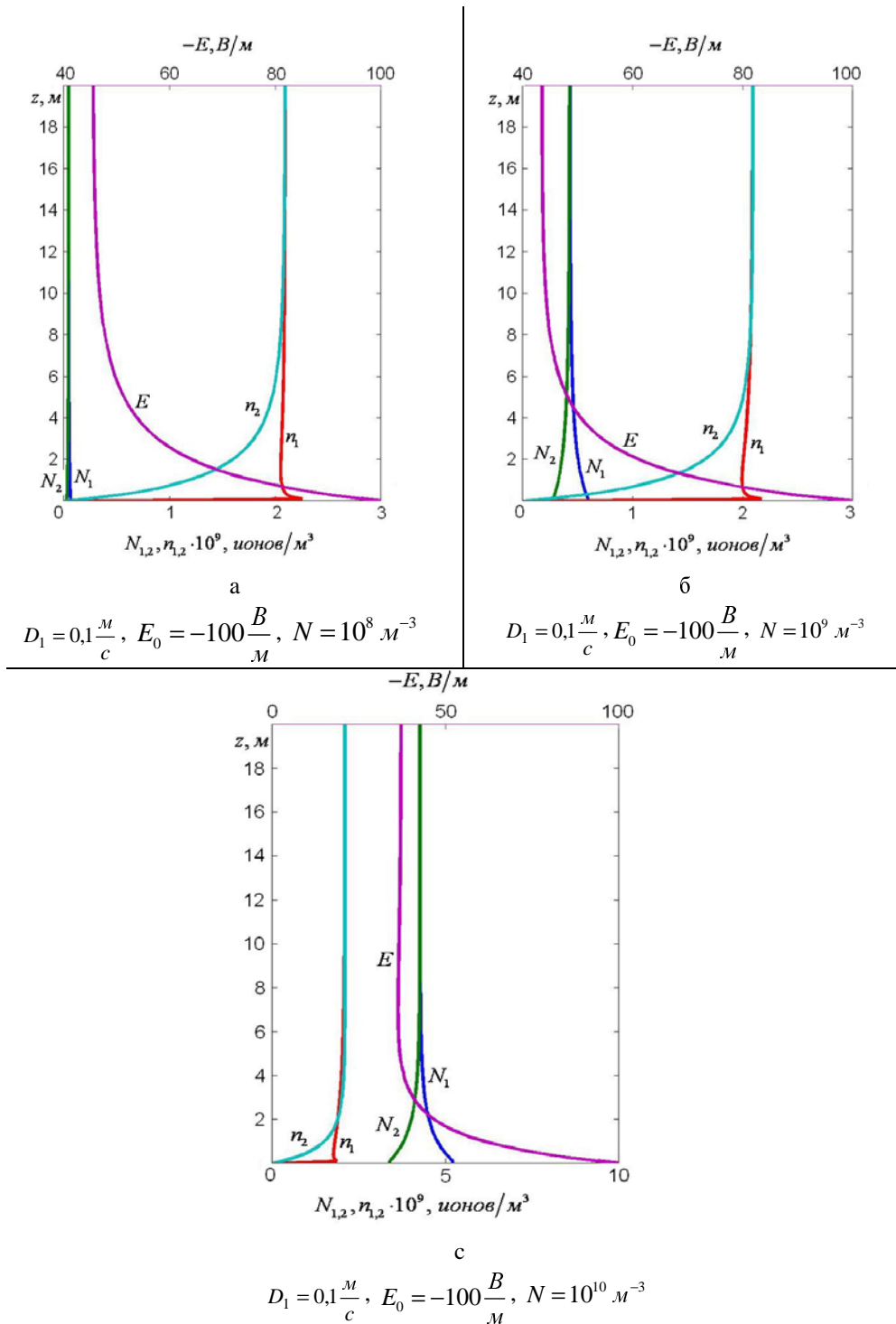


Рис. 2. Электрическая структура приземного слоя атмосферы при слабом

турбулентном перемешивании

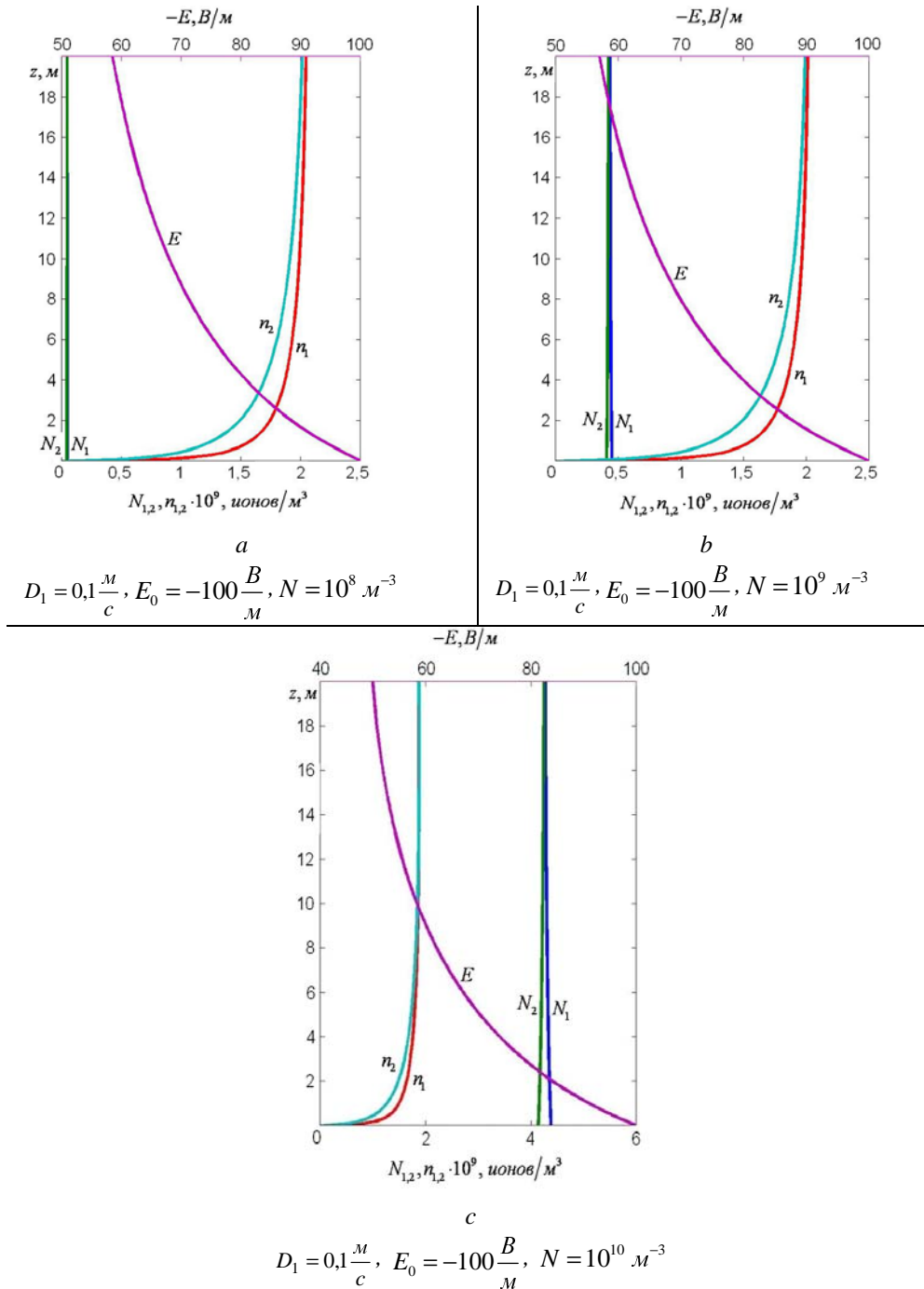


Рис. 3. Электрическая структура приземного слоя атмосферы при сильном турбулентном перемешивании

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере. Монография, Таганрог: Изд-во ТРТУ. 1998. 123 с.
2. *Самарский А.А., Гулин А.В.* Численные методы математической физики. 2-е изд. – М.: Научный мир, 2003. -316 с.
3. *Морозов В.Н.* Об установлении стационарного электрического поля в атмосфере, содержащей слой аэрозольных частиц // Прикладная метеорология. 2002. Выпуск 4 (552). С. 33-43.
4. *Куповых Г.В., Марченко А.Г., Морозов В.Н.* Электрическая структура нестационарного приземного слоя в приближении турбулентного электродного эффекта. //Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. Приложение №5, 2005. С. 46-51.

Редин Александр Александрович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге

E-mail: alexandr_redin@mail.ru

347928, Россия, г. Таганрог, ГСП 17а, пер. Некрасовский, 44

Тел.: 8(8634) 32-16-17

Клово Александр Георгиевич

E-mail: klovo@egf.tsure.ru

Куповых Геннадий Владимирович

E-mail: kupovykh@users.tsure.ru

Redin Alexandr Alexandrovich

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

E-mail: alexandr_redin@mail.ru

44, Nekrasovsky, Taganrog, GSP-17a, 347928, Russia, Ph.: +7 (8634) 32-16-17

Klovo Alexandr Georgievich

E-mail: klovo@egf.tsure.ru

Kupovich Gennadiy Vladimirovich

E-mail: kupovykh@users.tsure.ru

УДК 621.372

Л. Г. Стаценко, Ю. В. Миргородская, А. А. Чусов

**СИСТЕМА ЭФФЕКТИВНОГО КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ПРИ
ПЕРЕДАЧЕ ПО КАНАЛАМ СВЯЗИ В СЛУЧАЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ
СИТУАЦИЙ НА МОРЕ**

Проблема своевременной доставки информации о чрезвычайной ситуации на морских судах, терпящих бедствия, является актуальной. Предлагаемый метод кодирования позволяет передавать не только информацию о местоположении