



На правах рукописи

Марченко Александр Геннадьевич

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В
ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

250030— Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нальчик 2005

Работа выполнена на кафедре высшей математики Таганрогского государственного радиотехнического университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Сухинов Александр Иванович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, доцент
Куповых Геннадий Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Щукин Георгий Георгиевич

кандидат физико-математических наук
Богаченко Евгений Моисеевич

Ведущая организация:


Ставропольский государственный университет, г. Ставрополь

Защита состоится 1 июля 2005 г. в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д327.001.01 при Высокотгорном геофизическом институте по адресу: 360030, КБР, г.Налмик, пр.Ленина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Высокотгорного геофизического института.

Автореферат разослан 30 мая 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

 **А.В. Шаповалов**

Актуальность проблемы.

Одной из специальных задач атмосферного электричества является исследование вариаций электрического поля в приземном слое атмосферы глобального и локального происхождения. Экспериментальное решение этой проблемы требует длительных рядов наблюдений. Кроме того» даже в условиях «хорошей погоды» (скорость ветра не более 6 м/с, облачность не выше 3-4 баллов, отсутствие дождя, тумана, метелей и т.п.) на получаемые данные оказывают значительное влияние метеорологические факторы, степень ионизации воздуха, наличие аэрозольных частиц в атмосфере и т.п. В связи с этим, с одной стороны, необходим поиск мест, пригодных для осуществления мониторинга электрического поля атмосферы, с другой стороны, необходимо развитие теоретических моделей, описывающих нестационарные электрические процессы в приземном слое. Электрическая структура приземного слоя обусловлена действием электродного эффекта вблизи земной поверхности. Известно достаточно большое число работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию электродного эффекта. Однако в большинстве теоретических работ электрическое состояние приземного слоя рассматривается стационарным, что оправдано общепринятым часовым или трехчасовым осреднением данных при регулярных наблюдениях за атмосферным электричеством. Для выявления короткопериодических вариаций электрического поля, например при исследовании грозových явлений, необходимо развитие нестационарных моделей электродного эффекта применительно к условиям атмосферы.

Цель работы состоит в теоретическом и экспериментальном исследовании нестационарных электрических процессов в приземном слое атмосферы. Для достижения поставленной цели решены следующие научные задачи:

1. Разработка нестационарной модели электрического состояния приземного слоя в приближении классического электродного эффекта.
2. Разработка нестационарной модели электрического состояния приземного слоя в приближении турбулентного электродного эффекта.
3. Теоретическое исследование электрических характеристик нестационарного приземного слоя в зависимости от значения напряженности электрического поля, скорости ионизации воздуха, степени турбулентного перемешивания и метеорологических факторов.
4. Экспериментальное исследование вариаций электрических характеристик приземного слоя в горных условиях.

Научная новизна работы.

1. Впервые разработана и численно реализована нестационарная модель электрического состояния приземного слоя атмосферы в приближениях классического и турбулентного электродного эффекта.
2. Исследованы пространственно-временные характеристики классического электродного слоя в слабом и сильном электрических полях, а также в зависимости от степени ионизации воздуха.

3. Исследованы пространственно-временные распределения электрических параметров в турбулентном приземном слое в зависимости от степени турбулентного перемешивания, ионизации воздуха и различных метеорологических условий.

4. Исследован механизм образования и эволюция объемного электрического заряда в классическом и турбулентном электродном слоях.

5. Исследованы вариации электрического поля в приземном слое атмосферы под действием глобальных и локальных факторов.

6. Разработан автоматизированный комплекс для измерения атмосферно-электрических величин, включающий в себя измерительные приборы (измерители градиента потенциала электрического поля, полярных проводимостей воздуха и плотности электрического тока), сопряженные с компьютером посредством АЦП.

7. Получены новые экспериментальные данные об электрических характеристиках приземного слоя на горных станциях в Приэльбрусье. Установлены закономерности вариаций электрических величин как результат совокупного действия глобальных и локальных факторов.

Научная и практическая значимость работы состоит в развитии представлений о механизмах возникновения вариаций электрического поля в приземном слое атмосферы глобального и локального происхождения.

Полученные на основе теоретических и экспериментальных исследований положения и результаты могут быть использованы:

- для расчетов электрических характеристик нестационарного приземного слоя атмосферы;
- для исследования влияния радиоактивности воздуха на электрические характеристики вблизи поверхности земли;
- при анализе данных наземных наблюдений за атмосферным электричеством;
- при разработке методов контроля антропогенного воздействия на атмосферу;
- при построении нестационарных моделей глобальной электрической цепи, учитывающих вклад генераторов, действующих в приземном слое;
- для организации регулярных наблюдений за атмосферным электричеством в горных условиях;
- при исследовании вариаций электрических полей, обусловленных грозовой деятельностью.

В рамках сформулированной в работе проблемы на защиту выносятся следующие **результаты и положения**:

1. Нестационарные модели электрического состояния приземного слоя атмосферы в приближениях классического и турбулентного электродного эффекта.

2. Зависимости пространственно-временных распределений параметров электродного слоя от: напряженности электрического поля, степени ионизации воздуха, метеорологических условий в атмосфере.

3. Автоматизированный комплекс для измерения атмосферно-электрических величин и результаты экспериментальных исследований атмосферного электричества (электрического поля, плотности тока, проводимости воздуха, плотности объемного заряда) приземного слоя в горных условиях.

4. Механизмы возникновения глобальных и локальных вариаций электрических характеристик приземного слоя.

Публикации результатов и личный вклад автора.

По результатам исследований опубликовано 10 научных работ.

Постановка задачи моделирования электрического состояния нестационарного приземного слоя, а также выбор численной схемы и исследование ее устойчивости осуществлялись совместно с научным руководителем и консультантом.

Автору принадлежит разработка, реализация численных моделей, проведение расчетов и их интерпретация. Соискатель принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях, обработке полученных данных, разработке аппаратуры и методики наблюдений.

Обсуждение отдельных разделов работы проводилось с В.Н. Морозовым и Я.М. Шварцем.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Всероссийской НТК студентов и аспирантов, «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». КРЭС-98, (Таганрог, 1998), Conference Parallel Computational Fluid Dynamics - Advanced Numerical Methods, Software and Applications (Moscow, 2003), 9 - 10-ой Международных конференциях «Математические модели физических процессов и их свойства» (Таганрог, 2003 - 2004), 5-ой Российской конференции по атмосферному электричеству (Владимир, 2003), научных семинарах кафедр высшей математики и физики Таганрогского государственного радиотехнического университета (Таганрог, 1998 - 2005).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы составляет 133 страницы, включая 52 рисунка, 8 таблиц. Список литературы содержит 97 наименований.

Диссертационная работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ «Поддержка ведущих научных школ Российской Федерации» НШ-1793.2003.5, а также при частичной финансовой поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF, проект REC-004).

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертационной работы, раскрывается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся данные об апробации работы.

Глава 1 носит обзорный характер и посвящена двум основным проблемам атмосферного электричества. Первая проблема — методы и приборы измерения атмосферно-электрических параметров приземного слоя.

Рассматриваются конструкции современных приборов для измерения напряженности электрического поля, удельных полярных проводимостей воздуха, плотность тока, скорости новообразования. Проанализированы принципы их действия и основные физические законы, позволяющие проводить электрометрические измерения в атмосфере. Вторая проблема - интерпретация получаемых атмосферно-электрических данных на основе математического моделирования. Предполагается, что электрическое состояние приземного слоя атмосферы формируется под действием электродного эффекта. Рассматриваются два приближения - классического и турбулентного электродного эффекта - вытекающие из общей постановки задачи об электродинамическом состоянии приземного слоя. Формулируется задача о моделировании нестационарного электродного слоя в атмосфере.

В главе 2 приводится постановка задачи о распределении электрических характеристик в нестационарном приземном слое в приближении классического электродного эффекта. Рассматривается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_1}{\partial t} + b_1 \frac{\partial(E \cdot n_1)}{\partial z} = q - \alpha n_1 n_2 \\ \frac{\partial n_2}{\partial t} - b_2 \frac{\partial(E \cdot n_2)}{\partial z} = q - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2). \end{cases} \quad (1)$$

где $b_{1,2}$ - подвижности положительных и отрицательных легких ионов (аэроионов), q - скорость ионизации, α - коэффициент рекомбинации аэроионов, e - элементарный заряд, ϵ_0 - электрическая постоянная.

Начальные условия заданы в виде:

$$n_1(z)|_{z=0} = n_2(z)|_{z=0} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \left(1 - e^{-\frac{z}{l_0}} \right), \quad E(z) = E_0, \quad (2)$$

где E_0 - значение напряженности электрического поля у поверхности земли, l_0 - характерная толщина классического электродного слоя.

Граничные условия:

$$n_2|_{z=0} = 0, \quad E|_{z=0} = E_0, \quad n_1|_{z=l} = n_2|_{z=l} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}. \quad (3)$$

Значения параметров в системе (1) задавались следующими: $b_1 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, $b_2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$, $E_0 = -100 \text{ В м}^{-1}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

В диссертации поставленная задача решалась конечно-разностным методом, с предварительным исследованием характерных масштабов пространственных и временных распределений описываемых процессов, а также исследованием устойчивости численной схемы. Аналитически

определены характерные масштабы пространственно-временных распределений процессов, которые составили $l_0 = 4,2л^*$ и $\tau = 300с$.

Проведен анализ результатов моделирования для случая установления стационарного режима в зависимости от напряженности электрического поля и скорости новообразования. Время установления (300 с) стационарного режима в классическом электродном слое хорошо согласуется с аналитической оценкой. В таблице 1 приведены значения параметров классического электродного слоя в различные моменты времени моделирования.

Таблица 1.

| t, с. | 0 | 4 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| E_0/E_∞ | 1,0 | 1,04 | 1,81 | 2,11 | 2,19 | 2,21 | 2,22 | 2,22 |
| $n_1(0,5)/n_1(\infty)$ | 0,39 | 0,43 | 0,87 | 0,94 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 |
| $n_1(1)/n_1(\infty)$ | 0,63 | 0,65 | 0,91 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 |
| $n_1(2)/n_1(\infty)$ | 0,86 | 0,87 | 0,96 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| $n_2(0,5)/n_2(\infty)$ | 0,39 | 0,37 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| $n_2(1)/n_2(\infty)$ | 0,63 | 0,62 | 0,34 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,36 |
| $n_2(2)/n_2(\infty)$ | 0,86 | 0,86 | 0,8 | 0,68 | 0,69 | 0,69 | 0,69 | 0,69 |
| $E_0/E(0,5)$ | 1 | 1,01 | 1,16 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,19 |
| $E_0/E(1)$ | 1 | 1,02 | 1,35 | 1,40 | 1,41 | 1,41 | 1,41 | 1,41 |
| $E_0/E(2)$ | 1 | 1,03 | 1,65 | 1,82 | 1,83 | 1,83 | 1,83 | 1,82 |

Обозначения: $n_{1,2}$, $E(z)$ — значения электрических характеристик на высоте z , E_∞ — значение электрического поля на верхней границе электродного слоя.

Исследования показали, что плотность тока проводимости, рассчитываемая согласно выражению:

$$j(z, t) = e(b_1 n_1(z, t) + b_2 n_2(z, t)) E_\infty \quad (4)$$

на верхней границе электродного слоя уменьшается от 9 до 4 nA/m^2 в течение первых трех минут, а затем становится практически постоянной. Эволюция j_0 на верхней границе классического электродного слоя представлена на рис. 1.

Плотность объемного заряда ρ на высотах 0,5, 1 и 2 метра, представленная на рис. 2, принимает свои стационарные значения через 4 минуты и составляет 260; 200 и 100 $nKл/m$ соответственно. Расчет проводился согласно выражению:

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

При решении рассматривался профиль скорости новообразования:

$$q(z) = q_1 + q_0 e^{-z/0,423}. \quad (6)$$

Слагаемое $q_1 = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ является постоянной ионизацией, обусловленной космическим излучением. Величина q_0 (вклад в ионизацию

воздуха района и продуктов его распада) рассматривается в пределах $(4,8 + 80) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, что соответствует скорости новообразования, наблюдаемой в реальных условиях. В ходе работы исследован знак объемного заряда в зависимости от скорости ионообразования. Результаты расчетов представлены на рис. 3, 4. Так, если напряженность электрического поля составляет $E_0 = -100 \text{ В м}^{-1}$, объемный заряд вблизи поверхности земли становится отрицательным при $q_0 \geq 45 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

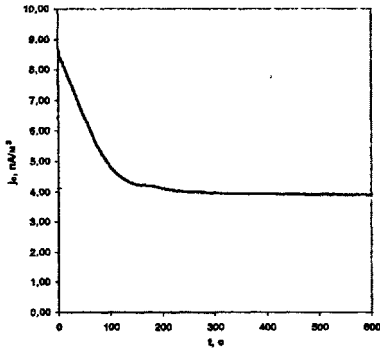


Рис. 1.

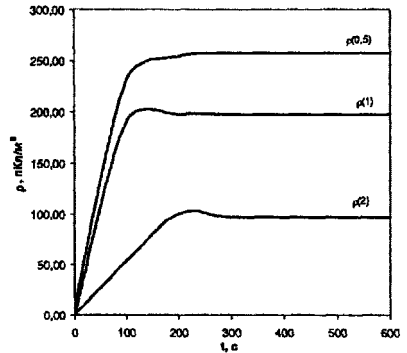


Рис. 2.

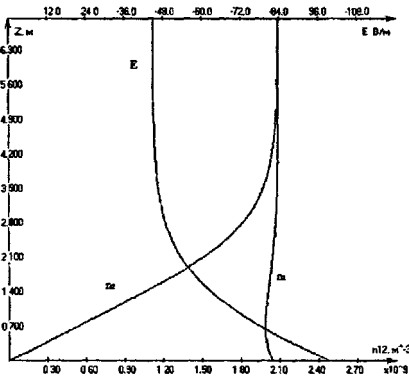


Рис. 3.

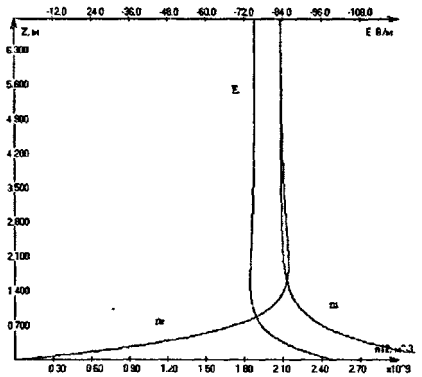


Рис. 4.

Учет в профиле ионообразования α -распада приводит к появлению в выражении (6) дополнительного слагаемого $q_a = 50th(8 \cdot 10^9 / z^4) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Численные расчеты показывают, что влияние α -излучения на параметры электродного слоя не превышает нескольких процентов.

Исследованы параметры электродного слоя в зависимости от величины напряженности электрического поля E_0 на нижней границе слоя. Установлено следующее: при скорости ионообразования $q_0 = 4,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ и полях $E_0 < 43 \text{ В м}^{-1}$ внутри электродного слоя возникает отрицательный

объемный заряд. Полученные результаты систематизированы, и выявлена закономерность, позволяющая судить о знаке объемного заряда в зависимости от параметров E_0 и q_0 .

Проведено исследование пространственно-временной структуры электродного слоя с учетом воздействия глобальных факторов, в частности глобальной унитарной вариации потенциала ионосферы. Рассмотрены случаи формирования электрической структуры при сильных и слабых электрических полях. Анализ результатов расчетов показывает, что унитарная вариация потенциала ионосферы в значительной степени влияет на толщину электродного слоя (увеличение толщины электродного слоя достигает 35%), а также на его параметры, в частности, концентрация отрицательных аэроионов вблизи поверхности земли изменяется на 40%. Значение объемного заряда при этом на высоте 1-2 метра меняется на 10%.

Установлено, что вариации электрического поля на верхней границе классического электродного слоя, обусловленные глобальными факторами с точностью до нескольких процентов соответствуют вариациям электрического поля на высоте 0,5-2 метра с учетом времени установления (таблица 2). Таким образом, объемный заряд, обусловленный электродным эффектом, увеличивает абсолютные значения напряженности электрического поля, но не влияет на его вариации.

Таблица 2.

| УТ | 00-03 | 03-06 | 06-09 | 09-12 | 12-15 | 15-18 | 18-21 | 21-00 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E/\langle E \rangle$ | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,0 |
| $E_{\infty}, B/m$ | -113 | -100 | -113 | -125 | -125 | -138 | -150 | -125 |
| $E_0, B/m$ | -257 | -228 | -257 | -285 | -285 | -314 | -342 | -285 |
| E_0/E_{∞} | 2,32 | 2,31 | 2,32 | 2,32 | 2,32 | 2,33 | 2,33 | 2,32 |
| $E(0,5), B/m$ | -240 | -211 | -240 | -269 | -269 | -296 | -326 | -269 |
| $E(1), B/m$ | -225 | -197 | -225 | -252 | -252 | -280 | -308 | -252 |
| $E(2), B/m$ | -196 | -169 | -196 | -224 | -224 | -253 | -280 | -224 |

В главе 3 рассматривается постановка задачи о распределении электрических характеристик в нестационарном приземном слое в приближении турбулентного электродного эффекта. Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_1}{\partial t} + b_1 \frac{\partial(E \cdot n_1)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z) \frac{\partial n_1}{\partial z} \right) = q(z) - \alpha n_1 n_2 \\ \frac{\partial n_2}{\partial t} - b_2 \frac{\partial(E \cdot n_2)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z) \frac{\partial n_2}{\partial z} \right) = q(z) - \alpha n_1 n_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2)$$

Начальные условия:

$$n_1(z)|_{z=0} = n_2(z)|_{z=0} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \left(1 - e^{-\frac{z}{L_0}} \right), \quad E(z) = E_0, \quad (8)$$

где E_0 — значение напряженности электрического поля у поверхности земли, L_0 — характерная толщина турбулентного электродного слоя.

Граничные условия:

$$n_1|_{z=z_0} = n_2|_{z=z_0} = 0, \quad n_1|_{z=l} = n_2|_{z=l} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \quad E|_{z=z_0} = E_0, \quad (9)$$

где $z_0 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м — параметр шероховатости земной поверхности.

Для функции интенсивности ионообразования q использовалось представление (6). Коэффициент турбулентной диффузии аэроионов задавался в виде:

$$D_T(z) = D_m z^m, \quad (10)$$

где m — параметр стратификации приземного слоя. Отдельно рассматриваются случаи устойчивой ($m = 0$), нейтральной ($w = 1$) и термически неустойчивой ($m = 4/3$) стратификации.

Для численного решения (7) с начальными и граничными условиями (8), (9) произведен переход к дискретной задаче и исследована устойчивость использованного численного метода решения. Аналитически определены характерные масштабы пространственно-временных распределений процессов, которые составили $L_D = 30$ м и $\tau = 300$ с.

По результатам расчетов для турбулентного приземного слоя время установления стационарного режима составляет порядка 500 секунд, что заметно превышает аналогичное время в классическом электродном слое (таблица 3).

Таблица 3.

| t, с. | 0 | 20 | 100 | 200 | 300 | 500 | 800 | 1000 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| E_0/E_∞ | 1,00 | 1,14 | 1,53 | 1,84 | 1,99 | 2,07 | 2,09 | 2,10 |
| $n_1(0,5)/n_1(\infty)$ | 0,39 | 0,62 | 0,64 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| $n_1(1)/n_1(\infty)$ | 0,63 | 0,74 | 0,75 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 |
| $n_1(2)/n_1(\infty)$ | 0,86 | 0,84 | 0,84 | 0,83 | 0,83 | 0,82 | 0,82 | 0,82 |
| $n_2(0,5)/n_2(\infty)$ | 0,39 | 0,50 | 0,47 | 0,46 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |
| $n_2(1)/n_2(\infty)$ | 0,63 | 0,64 | 0,61 | 0,59 | 0,58 | 0,58 | 0,58 | 0,58 |
| $n_2(2)/n_2(\infty)$ | 0,86 | 0,78 | 0,73 | 0,71 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 |
| $E_0/E(0,5)$ | 1,00 | 1,02 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 |
| $E_0/E(1)$ | 1,00 | 1,04 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 |
| $E_0/E(2)$ | 1,00 | 1,07 | 1,11 | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,12 |

Сравнительный анализ результатов моделирования классического и турбулентного электродного эффекта показал, что в случае перехода от классического электродного эффекта к турбулентному величина плотности

тока проводимости на верхней границе электродного слоя остается одинаковой (рис. 5), однако существенно меняется величина плотности объемного заряда на характерных высотах установки аппаратуры 0,5-2 м (рис. 6). Так, на высоте 0,5 метра ее величина уменьшилась с 260 $nКл/м^3$ (в классическом случае) до 60 $nКл/м^3$.

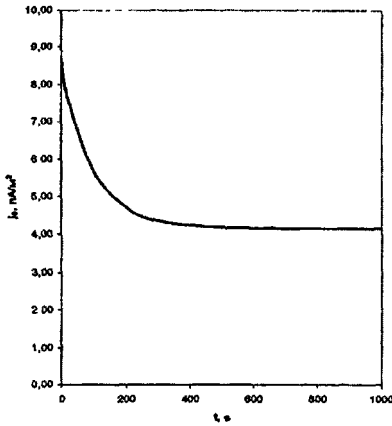


Рис. 5.

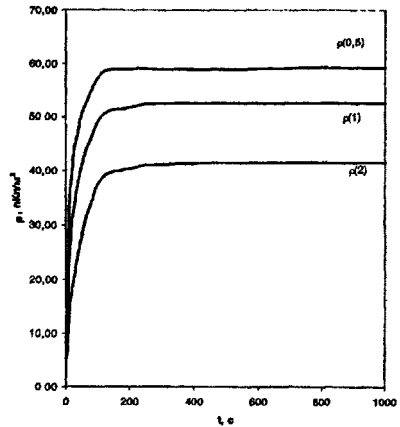


Рис. 6.

Проведен анализ результатов моделирования процесса эволюции различных электрических характеристик приземного слоя (рис. 7) в зависимости от следующих факторов: напряженности электрического поля, скорости новообразования, скорости турбулентной диффузии, стратификации атмосферы. Отмечено возникновение нелинейности и характерного максимума на высоте нескольких метров в профиле плотности тока проводимости для турбулентного электродного слоя (рис. 8), в то время как в классическом электродном слое в установившемся состоянии плотность тока являлась величиной постоянной.

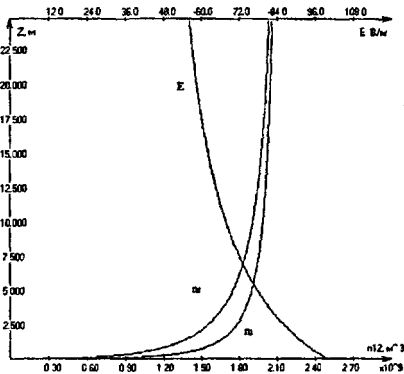


Рис. 7.

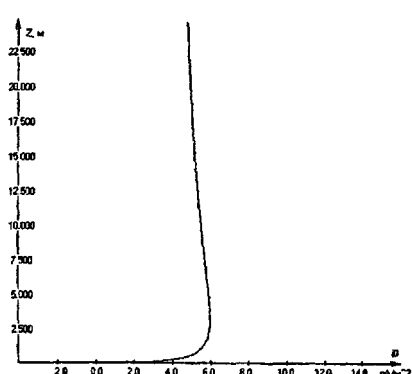


Рис. 8.

Результаты расчетов показывают, что, как и в случае классического электродного эффекта, глобальные вариации электрического поля на верхней границе турбулентного электродного слоя, хорошо согласуются с соответствующими вариациями на высоте 0,5-2 метра (таблица 4).

Таблица 4.

| UT | 00-03 | 03-06 | 06-09 | 09-12 | 12-15 | 15-18 | 18-21 | 21-00 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $E/\langle E \rangle$ | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,0 |
| $E_{\infty}, B/m$ | -113 | -100 | -113 | -125 | -125 | -138 | -150 | -125 |
| $E_0, B/m$ | -242 | -213 | -242 | -269 | -269 | -298 | -324 | -269 |
| E_0/E_{∞} | 2,14 | 2,13 | 2,14 | 2,15 | 2,15 | 2,16 | 2,16 | 2,15 |
| $E(0,5), B/m$ | -235 | -207 | -235 | -261 | -261 | -292 | -318 | -261 |
| $E(1), B/m$ | -228 | -201 | -228 | -254 | -254 | -281 | -306 | -254 |
| $E(2), B/m$ | -216 | -190 | -216 | -240 | -240 | -266 | -292 | -240 |

В главе 4 описан измерительный комплекс для проведения наблюдений за параметрами атмосферного электричества в автоматическом режиме, который включает в себя измерители градиента потенциала электрического поля, полярных проводимостей воздуха и плотности электрического тока. Первичные блоки приборов устанавливаются на измерительной площадке, вторичные блоки — производят преобразования сигналов к стандартным значениям напряжений, пропорциональным измеряемым величинам ($U_{\max} = \pm 1B$). Сигналы со вторичных блоков подаются на входы аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который имеет 16 дифференциальных входов и позволяет последовательно опрашивать их с частотой до 125 кГц, и далее обрабатываются компьютером. Частота опроса каждого из четырех задействованных каналов составляет 25 кГц. Входное сопротивление платы не менее 1 МОм.

Данный комплекс использовался при экспедиционных исследованиях атмосферно-электрических величин на станциях Кызбурун (600 м н.у.м.) в 2003 г. и Пик Терскол (3003 м н.у.м.) в 2004 г. в Приэльбрусье.

Анализ полученных данных свидетельствует об общих закономерностях в вариациях градиента потенциала V электрического поля на обеих станциях. Общими чертами суточного хода электрического поля являются утренний минимум (00-03 UT), дневной (08-15 UT) и вечерний (19-21 UT) максимумы (рис. 9). Коэффициент корреляции между среднечасовыми вариациями электрического поля на станциях Кызбурун и Пик Терскол составил 0,85.

Положительная компонента проводимости воздуха L_+ на Пике Терскол в большинстве случаев превышает отрицательную компоненту и не имеет суточного хода, тогда как на станции Кызбурун наблюдался ярко выраженный дневной минимум (рис. 10). Последнее свидетельствует о

значительном влиянии аэрозольных частиц (загрязнений) на проводимость воздуха и, соответственно, на электрическое поле и ток проводимости на станции Кызбурун, что неприемлемо с точки зрения глобального мониторинга электрического поля атмосферы.

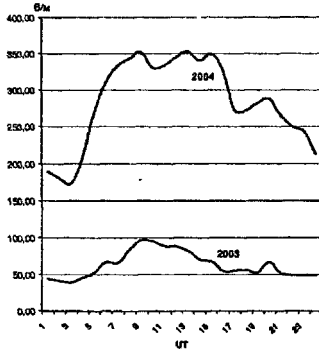


Рис. 9 – Суточный ход V' на станциях Кызбурун и Пик Терскол.

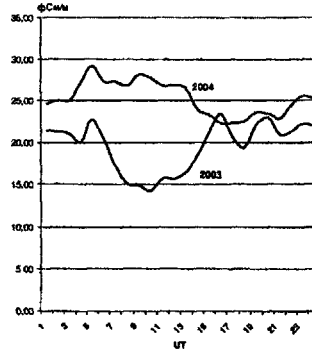


Рис. 10 – Суточный ход λ_+ на станциях Кызбурун и Пик Терскол.

Суточная вариация плотности полного тока j_0 на Пике Терскол (рис.11), также как и V , имеет утренний минимум (00-03 UT), дневной (08-15 UT) и вечерний (19-21 UT) максимумы. При этом коэффициент корреляции между E и j_0 составляет 0,67. Суточный ход плотности объемного заряда ρ на Пике Терскол представлен на рис. 12. Максимальные значения ρ принимает в дневные часы.

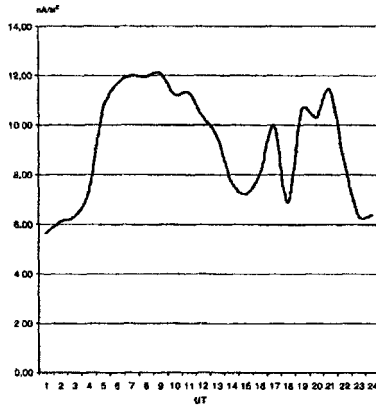


Рис. 11 - Суточный ход j_0 на станции Пик Терскол.

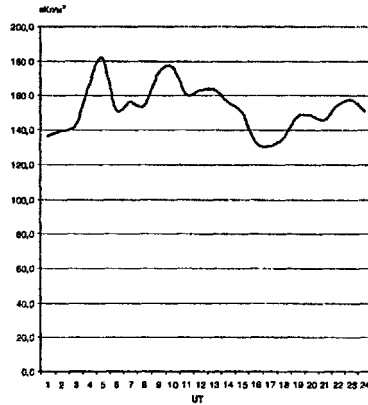


Рис. 12-Суточный ход ρ на станции Пик Терскол.

Значения плотности полного тока и тока проводимости на Пике Терскол практически одинаковы. Об этом свидетельствуют также значения параметра Долезалека $\Omega = j_0/j_{np}$, который близок к единице (рис. 13). Таким образом, можно сделать вывод, что в вариациях электрического поля и плотности тока в высокогорных условиях проявляются элементы глобальной унитарной вариации в утренние и вечерние часы.

Сопоставление среднечасовых и мелкомасштабных (1,3,5 и 10 минутных) вариаций градиента потенциала электрического поля и плотности объемного заряда по данным полученными ранее на Пике Чегет (1989 г.), показывает, что возможной причиной локальных вариаций электрического поля является объемный заряд вследствие электродного эффекта вблизи поверхности земли. Об этом свидетельствуют высокие коэффициенты корреляции между указанными параметрами в дни, когда величина объемного заряда значительна.

По результатам данных, полученных на Пике Терскол, рассчитаны коэффициенты корреляции между среднечасовыми и двухминутными вариациями E и ρ (рис. 14). В утренние и вечерние часы коэффициент корреляции между вариациями указанных величин составляет в среднем 0,2, тогда как в дневные часы его значение увеличивается до 0,5-0,6.

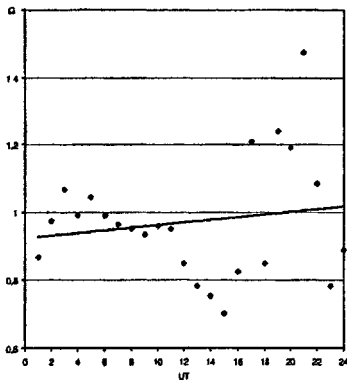


Рис. 13 – Значения Ω по данным станции Пик Терскол.

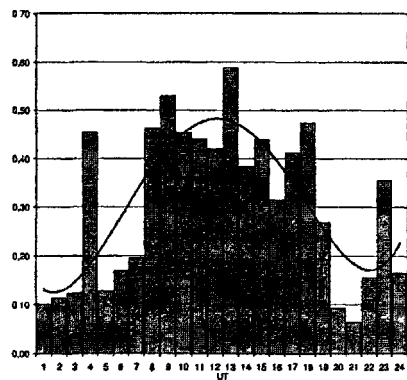


Рис. 14 – Коэффициент корреляции между двухминутными значениями ρ и V' .

Таким образом, проведенный корреляционный анализ показывает, что возможной причиной локальных вариаций электрического поля является объемный заряд вследствие электродного эффекта вблизи поверхности земли.

На основании результатов моделирования пространственно-временных распределений характеристик электродного слоя в результате действия глобальной унитарной вариации потенциала ионосферы и анализа экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что утренний и вечерний экстремумы электрического поля и плотности тока обусловлены

глобальными факторами, тогда как дневной максимум является следствием влияния объемного заряда в приземном слое.

В заключении приводятся результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана нестационарная модель электрического состояния приземного слоя атмосферы в приближении классического электродного эффекта. Определены характерные масштабы временных (порядка 300 с) и пространственных (4-5 м) распределений в классическом электродном слое. В результате численных экспериментов установлено, что время установления стационарного состояния практически не зависит от значений вне электродного слоя.

2. Исследованы пространственно-временные распределения электрических характеристик в приземном слое в зависимости от значений электрического поля, степени ионизации воздуха и турбулентного перемешивания. Выявлены закономерности распределения электрического объемного заряда в приземном слое в различных физических условиях.

3. Исследованы глобальные вариации электрического поля в классическом и турбулентном электродном слое.

4. Разработана нестационарная модель электрического состояния приземного слоя атмосферы в приближении турбулентного электродного эффекта. Проведена аналитическая оценка времени установления стационарного режима, которое составило порядка **500** секунд. Установлено, что время выхода на стационарный режим превышает аналогичное время классического электродного эффекта примерно в 1,5 раза и практически не зависит от значений параметров электродного слоя.

5. Разработан автоматизированный комплекс, включающий в себя измерители градиента потенциала V' электрического поля, полярных проводимостей L_{\pm} воздуха и плотности вертикального тока j_0 , сопряженные с компьютером посредством аналого-цифрового преобразователя.

6. Установлены закономерности вариаций градиента потенциала электрического поля, полярных проводимостей воздуха и плотности электрического тока на станциях Пик Терскол и Кызбурун. С помощью корреляционного анализа установлена их обусловленность в основном глобальными факторами и выявлен вклад локальных факторов (объемного заряда, обусловленного электродным эффектом) в вариации электрического поля.

7. Анализ результатов экспериментальных исследований атмосферного электричества на Пике Терскол показывает возможность и целесообразность осуществления глобального мониторинга электрического поля атмосферы в высокогорных условиях.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Додаев С.Э., Марченко А.Г. Численное моделирование электрического состояния приземного слоя атмосферы. //Тезисы доклада. IV Всероссийская НТК студентов и аспирантов. Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления. КЮС-98, Таганрог, ТРТУ, 1998 г. С. 125.
2. Болдырев А.С., Куповых Г.В., Литвинова И.С., Марченко А.Г. О связи электрического поля с объемным зарядом в приземном слое атмосферы. //Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки, Приложение. № 3, 2003, С.42-45.
3. Болдырев А.С., Куповых Г.В., Литвинова И.С., Марченко А.Г. Электрическое поле и объемный заряд в нижнем слое атмосферы. //Сб. научных трудов 9-й международной конференции «Математические модели физических процессов». Таганрог: Изд-во ТГПИ. 2003. С. 79-82.
4. Морозов В.Н., Куповых Г.В., Марченко А.Г. Моделирование электрогидродинамических процессов в приземном слое. //Сб. научных трудов 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2003, Т.1. С. 101-103.
5. Болдырев А.С., Куповых Г.В., Литвинова И.С., Марченко А.Г. Вариации электрического поля в приземном слое. //Сб. научных трудов 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2003, Т.1. С. 104-106.
6. Klovo A.G., Kupovykh G.V., Marchenko A.G., Sukhinov A.I. Hydrothermodynamic model for sea surface layer and its realization on the distributed computing cluster. //Parallel Computational Fluid Dynamics- Advanced Numerical Methods, Software and Applications. / B. Chetverushkin, A. Ecer, J. Periaux., N. Satofuka and P. Fox (Editors). Elsevier. 2004. P.315-318.
7. Марченко А.Г., Морозов В.Н., Клово А.Г., Куповых Г.В., Сухинов А.И. Нестационарная модель классического электродного эффекта в атмосфере. //Сб. научных трудов 14-й международной конференции «Математические модели физических процессов». Таганрог: Изд-во ТГПИ. 2004. С. 127-132.
8. Куповых Г.В., Марченко А.Г. Автоматизированный комплекс для проведения атмосферно-электрических наблюдений //Известия ТРТУ, 2004, № 1.С. 203-204.
9. Куповых Г.В., Марченко А.Г., Морозов В.Н. Электрическая структура нестационарного приземного слоя в приближении классического электродного эффекта. //Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки, Приложение № 4,2005. С. 31-37.
10. 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.

Личный вклад соискателя по перечисленным работам может быть определен следующим образом:

- работы 1,8 - выполнены на паритетной основе;
- работы 4,6,7,9,10 - постановки задач выполнены совместно, расчеты и анализ результатов принадлежат соискателю;
- работы 2,3,5 - экспериментальная часть выполнена совместно, анализ результатов принадлежит соискателю.

Подписано к печати 25 05 05 г.

Бумага офсетная

Усл. п. л. - 1.1

Тираж 100 экз.

Формат 60x84Xв

Печать офсетная

Усл.-изд.л.12

Заказ № 320



Издательство Таганрогского государственного
радиотехнического университета, ГСП-17А,
Таганрог-28, Некрасовский пер.44

Типография Таганрогского государственного
радиотехнического университета ГСП-17А,
Таганрог-28, Энгельса,!

15 אב 2005

