

*На правах рукописи*



**Куповых Геннадий Владимирович**

**ЭЛЕКТРОДНЫЙ ЭФФЕКТ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

25.00.30 - Метеорология, климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

**Нальчик 2005**

Работа выполнена в Таганрогском государственном радиотехническом университете

**Научный консультант:** доктор физико-математических наук, профессор  
**Сушинов Александр Иванович**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук  
**Бейтуганов Мусаби Ногманович**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Каплан Лев Григорьевич**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Хоконов Мурат Хазреталиевич**

**Ведущая организация:**

Главная геофизическая обсерватория  
им. А.И. Воейкова, г. Санкт - Петербург

Защита состоится *18 февраля* 2005 г. в *13<sup>00</sup>* на заседании диссертационного совета Д.327.001.01 при Высокогорном геофизическом институте по адресу: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Высокогорного геофизического института.

Автореферат разослан *14 января* 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор географических наук



В.В. Разумов

Актуальность проблемы. Одним из направлений исследований физики атмосферы является атмосферное электричество. Важное место занимают исследования электрических характеристик нижней части тропосферы (приземного слоя), где протекает большая часть деятельности человека. Атмосферно-электрические характеристики вблизи поверхности земли тесно связаны с метеорологическими явлениями, которые в свою очередь определяются процессами взаимодействия между атмосферой и деятельным слоем земной поверхности. Установление внутренних связей между метеорологическими и электрическими элементами в приземном слое необходимо, а в ряде случаев и достаточно, для решения многих прикладных проблем физики атмосферы. Для интерпретации атмосферно-электрических явлений, происходящих в приземном слое необходимо проведение теоретического моделирования электродинамических процессов, протекающих вблизи земной поверхности.

Электрическая структура приземного слоя определяется действием, так называемого «электродного эффекта». Под электродным эффектом понимается совокупность процессов, происходящих вблизи электрода, помещенного в ионизированную среду, и приводящих к появлению зависимости электрических характеристик от расстояния до поверхности электрода. В атмосфере электродом является поверхность земли, а процессы ионизации воздуха обуславливаются, как естественными, так и искусственными причинами. Последние, как и загрязнения воздушной среды, могут быть связаны с антропогенным воздействием на атмосферу. Кроме того, существенное влияние на электрические характеристики приземного слоя оказывают метеорологические факторы. Толщина электродного слоя меняется от нескольких десятков сантиметров до десятков метров.

В экспериментальных исследованиях атмосферы значительное место занимают наземные атмосферно-электрические наблюдения. Одной из наиболее трудных проблем анализа и обобщения результатов экспериментальных исследований в приземном слое является наложение возмущений локального происхождения на глобальные вариации электрического поля. Электрические характеристики приземного слоя атмосферы определяются степенью ионизации воздуха, турбулентным перемешиванием и наличием аэрозольных частиц в атмосфере. Вследствие этого интерпретация получаемых экспериментальных данных 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.) является сложной задачей. В ряде случаев получаемые данные приводятся к значениям на равнине. При этом используется коэффициент редукции, который зависит, как от геометрии установки аппаратуры, так и от параметров электродного слоя.

Инициатива организации наземной сети наблюдений на территории бывшего СССР принадлежит Главной геофизической обсерватории (ГГО) им. А.И. Воейкова, сотрудниками которой разработаны методы и средства

наблюдений элементов атмосферного электричества. Ведущей организацией в этом направлении является Научно-исследовательский центр дистанционного зондирования атмосферы (НИЦ ДЗА) - филиал ГГО им. А.И. Воейкова, где проводятся многолетние наблюдения за атмосферным электричеством.

Теоретически проблема электродного эффекта формулируется в виде задачи о нахождении распределения концентрации положительных и отрицательных легких ионов (аэроионов), напряженности электрического поля и плотности электрического тока в приземном слое. Уравнения, описывающие электродный эффект нелинейны. Вследствие этого изменения электрического потенциала верхних слоев атмосферы приводит не только к соответствующему изменению электрических характеристик вблизи поверхности земли, но и меняет их распределение в электродном слое. Присутствие аэрозольных частиц в атмосфере, являющихся стоком для аэроионов, оказывает влияние на электродный эффект, и при достаточно больших концентрациях электрическое состояние приземного слоя может определяться только тяжелыми ионами, образовавшимися за счет взаимодействия аэрозоля с аэроионами.

Важный вклад в развитие теоретических представлений об электродном эффекте в атмосфере внесли J.J. Thomson, W.F.G. Swan, E.R. Schweidler, F.I.W. Whipple, J. Scholz, J.A. Chalmers, M. Bechacker, W.A. Hoppel, D.G. Latham, T.J. Tuomi, D. Jordanov, J.C. Willet, П.Н. Тверской, М. П. Тимофеев, В.Н. Морозов.

Несмотря на достаточно большое количество теоретических работ в данном направлении остается не выясненным ряд вопросов о механизмах формирования электрической структуры приземного слоя, в частности объемного электрического заряда. Недостаточно исследована связь электрических характеристик вблизи поверхности земли с метеорологическими факторами, ионизацией воздуха и наличием аэрозольных частиц в атмосфере. Сложность теоретических задач и применение только аналитических методов их решений требует физически упрощенных постановок задач. В частности, в ряде работ используются предположения о постоянстве электрического поля или проводимости воздуха в приземном слое, линеаризация системы ионизационно-рекомбинационных уравнений, использование постоянной функции интенсивности ионообразования без учета процесса рекомбинации аэроионов и т.п. Использование совокупности аналитических и численных методов решений расширяет возможности исследований и позволяет отказаться от вышеуказанных допущений.

Цель работы состоит в теоретическом и экспериментальном исследовании электрических процессов в приземном слое атмосферы, обусловленных действием электродного эффекта. Для достижения поставленной цели решены следующие научные задачи.

1. Теоретически и экспериментально исследовано формирование электрической структуры приземного слоя атмосферы в результате действия классического или турбулентного электродного эффекта.

2. Исследованы зависимости электрических характеристик приземного слоя от метеорологических факторов, степени ионизации воздуха и концентраций аэрозольных частиц в атмосфере.

3. Разработана модель электрического состояния приземного слоя в приближении сильного турбулентного перемешивания и исследованы его характеристики применительно к различным метеорологическим условиям в атмосфере, а также в зависимости от степени загрязнения воздуха аэрозольными частицами.

4. Исследованы нестационарные электрические процессы в атмосферном приземном слое и механизмы возникновения глобальных и локальных вариаций электрического поля вблизи поверхности земли.

5. Проведены экспериментальные исследования электричества приземного слоя атмосферы и исследованы пространственно-временные закономерности распределения электрического поля, проводимости воздуха и объемной плотности электрического заряда в высокогорных условиях.

#### Научная новизна работы

1. На основе численной модели классического электродного эффекта исследована электрическая структура нетурбулентного приземного слоя в слабом и сильном электрических полях, а также в зависимости от степени ионизации воздуха и концентрации аэрозольных частиц в атмосфере. Исследован механизм образования объемного электрического заряда в классическом электродном слое.

2. На основе численной модели турбулентного электродного эффекта установлены зависимости распределений концентраций положительных и отрицательных аэроионов, напряженности электрического поля, плотности объемного заряда и плотности электрического тока от метеорологических условий в приземном слое. Исследовано влияние аэрозольных частиц на электрическую структуру турбулентного электродного слоя. Исследована эволюция объемного электрического заряда в условиях турбулентного перемешивания в атмосфере.

3. Разработана модель и рассчитана электрическая структура приземного слоя в условиях сильного турбулентного перемешивания. Установлена зависимость характерных масштабов распределения электрического поля и плотности заряда для различных типов стратификации атмосферы от степени турбулентного перемешивания и концентраций аэрозольных частиц в атмосфере.

4. Разработаны нестационарные модели классического и турбулентного электродного эффекта в атмосфере. Исследованы нестационарные электрические процессы в приземном слое атмосферы глобального и локального происхождения.

5. Впервые проведены комплексные экспериментальные исследования электрического состояния приземного слоя в высокогорных условиях и

получены новые экспериментальные данные о распределении электрического поля, проводимости воздуха, плотности тока и объемной плотности электрического заряда. Доказана возможность и целесообразность организации фоновых атмосферно-электрических наблюдений в высокогорной зоне Приэльбрусья. Экспериментально и теоретически установлена связь коэффициента редукции с электрическим полем в различных метеорологических условиях.

**Научная и практическая значимость** работы состоит в существенном расширении представлений о механизмах формирования электрической структуры приземного слоя, основанных на взаимодействии электрических и гидродинамических процессов, протекающих в нижнем слое атмосферы. Результаты работы использованы при выполнении НИР и ОКР учреждениями Росгидромета и Министерства образования РФ, что подтверждено актами внедрений.

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

- для расчетов электрических характеристик приземного слоя атмосферы;
- для исследования влияния загрязнений и радиоактивности воздуха на электрические процессы вблизи поверхности земли;
- при построении моделей глобальной токовой цепи, учитывающих вклад генераторов объемного заряда, действующих в приземном слое;
- для анализа данных наземных атмосферно-электрических наблюдений;
- для организации атмосферно - электрических наблюдений в высокогорной зоне;
- при разработке методов контроля антропогенного воздействия на атмосферу;
- при прогнозировании опасных природных явлений (грозы, землетрясений и т. п.)
- при создании системы глобального мониторинга атмосферы.

**Достоверность и обоснованность** результатов, полученных в диссертации, подтверждаются: корректностью поставленных теоретических задач, примененными математическими методами их решений; принятыми физическими допущениями, использованными при их решении, которые основаны на реальных физических предпосылках; проведенным численным моделированием и проделанными оценками, а также хорошим совпадением теоретических результатов с полученными экспериментальными данными.

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

1. Теоретическое исследование электрической структуры приземного слоя атмосферы, формирующейся под действием электродного эффекта вблизи земной поверхности. Критерии применимости моделей электродного эффекта для исследования электрического состояния приземного слоя в зависимости от физических и метеорологических условий в атмосфере.

2. Зависимости электрических характеристик приземного слоя от метеорологических условий, степени ионизации воздуха и концентрации аэрозольных частиц в атмосфере, полученные в результате теоретических и экспериментальных исследований.

3. Результаты моделирования электрического состояния приземного слоя для различных типов стратификации атмосферы в приближении сильного турбулентного перемешивания.

4. Модель нестационарного электродного эффекта в атмосфере и исследования вариаций электрического поля в приземном слое глобального и локального происхождений.

5. Результаты экспериментальных исследований атмосферного электричества (распределения и вариаций электрического поля, плотности тока, проводимости воздуха, плотности объемного заряда) приземного слоя в высокогорных условиях.

6. Механизм образования объемного электрического заряда в приземном слое и его эволюция в зависимости от метеорологических условий для различных типов перемешивания в атмосфере.

7. Рекомендации по организации пунктов наблюдений в высокогорных условиях с целью осуществления глобального мониторинга электрического поля атмосферы.

### **Публикации результатов и личный вклад автора**

По результатам исследований опубликовано 49 научных работ, включая 2 монографии (в соавторстве) и 1 патент РФ.

Автор принимал непосредственное участие в проведении экспериментальных исследований, обработке получаемых данных, разработке аппаратуры и методики наблюдений. Автору принадлежит общая формулировка и постановки отдельных задач исследования электрических процессов в приземном слое, проведение численных расчетов и их интерпретация.

Ценная консультативная помощь оказана В.Н. Морозовым и Я.М. Шварцем.

**Апробация работы.** Основные результаты работы опубликованы в двух монографиях, научных статьях и докладывались на IV Всесоюзном симпозиуме по атмосферному электричеству (Нальчик, 1990), Всесоюзной научно-технической конференции. «Методы и средства дистанционного зондирования атмосферы в интересах авиации» (Киев, 1991), 9 - 12<sup>th</sup> International Conferences on Atmospheric Electricity (St.Petersburg, 1992; Osaka, 1996; Alabama, 1999; Versailles, 2003), 8 - 10-й Международных конференциях «Математические модели физических процессов и их свойства» (Таганрог, 2002 - 2004), Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование в научных исследованиях» (Ставрополь, 2000), Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (Нальчик, 2001), 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству (Владимир, 2003), 3-й Всероссийской научно-технической конференции с международным

участием «Экология 2004 - море и человек» (Таганрог, 2004), научных семинарах отдела атмосферного электричества Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (Санкт-Петербург, 1989 - 1992), Высокоторного геофизического института (Нальчик, 1986 - 1994), кафедры физики Таганрогского государственного радиотехнического университета (Таганрог, 1994-2004)

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 332 страницы, включая 98 рисунков, 14 таблиц и 9 страниц приложений. Список литературы содержит 186 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.

В главе 1 сформулирована общая постановка задачи о теоретическом моделировании электрических процессов в приземном слое атмосферы. Исходная система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{\partial n_{1,2}^i}{\partial t} + \operatorname{div} (n_{1,2}^i \vec{v}) + \operatorname{div} (n_{1,2}^i b_{1,2}^i \vec{E}) - \operatorname{div} D_{1,2}^i \operatorname{grad} n_{1,2}^i = q_{1,2}^i(\vec{r}) - \alpha_{1,2}^i n_{1,2}^i - k_{1,2}^i; \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho, \operatorname{div} \vec{H} = 0, \quad (1)$$

где  $n_{1,2}^i$  — объемная концентрация ионов  $i$ -ой группы,  $b_{1,2}^i$  — их подвижности,  $\vec{v}$  — скорость гидродинамических течений в приземном слое,  $D_{1,2}^i$  — коэффициенты молекулярной диффузии ионов,  $k_{1,2}^i$  — члены, описывающие взаимодействие ионов  $i$ -ой группы с ионами других групп и с аэрозольными частицами,  $q_{1,2}^i$  — интенсивность ионообразования ионов  $i$ -ой группы,  $\alpha_{1,2}^i$  — их коэффициенты рекомбинации,  $E, H$  — напряженность электрического и магнитного полей,  $j$  — плотность электрического тока,  $\rho$  — плотность электрического заряда,  $c$  — скорость света.

Предполагая, что электрическое поле является потенциальным, система уравнений (1) приводится к виду:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t} + \operatorname{div}(n'_{1,2} \vec{v}) + \operatorname{div}(n'_{1,2} b'_{1,2} \vec{E}) - \operatorname{div} D'_{1,2} \operatorname{grad} n'_{1,2} = \\
 & = q'_{1,2}(\vec{r}) - \alpha'_{1,2} n'_1 n'_2 - k'_{1,2}; \\
 & \quad \vec{v} = \vec{E} = 4\pi\rho, \quad E = -\nabla\varphi,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\varphi$  - потенциал электрического поля. Система уравнений (2) с соответствующими начальными и граничными условиями образуют полную систему уравнений для нахождения распределений  $E, \rho, \varphi$  в приземном слое атмосферы.

Для горизонтально-однородного турбулентного приземного слоя свободного от аэрозольных частиц система уравнений (2) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_T(z,t) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} E n_{1,2}) = q(z) - \alpha n_1 n_2; \\
 & \frac{\partial E}{\partial z} = 4\pi e(n_1 - n_2),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $D_T(z,t)$  - коэффициент турбулентной диффузии аэроионов.

Для анализа системы (3) представим ее в безразмерной форме:  $t' = t/T$ ,  $z' = z/l_1$ ,  $n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty$ ,  $E' = E/E_\infty$ ,  $n_\infty = \sqrt{q_\infty/\alpha}$ ,  $l_1 = D_T \cdot \tau$ ,  $\tau = (q_\infty \cdot \alpha)^{-1/2}$ .

$$\begin{aligned}
 & \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} - \frac{\partial}{\partial z'} \left( z' \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} E') = \frac{q}{q_\infty} - n'_1 n'_2; \\
 & \frac{\partial E'}{\partial z'} = \gamma (n'_1 - n'_2),
 \end{aligned} \tag{4}$$

Характерное время протекания гидродинамических процессов ( $T$ ) составляет несколько часов, тогда как время протекания электрических процессов  $\tau = 250$  с для  $q = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$  и  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . Поэтому во многих случаях стационарное приближение для решения атмосферно-электрических задач правомерно.

Система уравнений (4) характеризуется двумя безразмерными параметрам:

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| \cdot E_\infty \cdot \tau}{l_1}, \quad \gamma = 4\pi e l_1 \frac{n_\infty}{E_\infty}. \tag{5}$$

В случае  $|\gamma| \ll 1$ , электрическим полем, создаваемым плотностью электрического объемного заряда вблизи поверхности земли, можно пренебречь.

Когда параметр  $\xi_{1,2} \geq 1$ , электрическое состояние приземного слоя определяется классическим электродным эффектом, т.е. пространственно-временное распределение аэроионов в приземном слое обусловлено только электрическими силами.

Если  $\xi_{1,2} < 1$ , имеет место турбулентный электродный эффект. В этом случае предполагается, что перенос аэроионов в атмосфере осуществляется, наряду с электрическими силами, турбулентными потоками воздуха.

Если  $\xi_{1,2} \ll 1$ , имеет место приближение сильного турбулентного перемешивания, т.е. перенос ионов осуществляется только турбулентной диффузией.

Таким образом, параметры  $\xi_{1,2}$  и  $\gamma$  могут служить критериями применения той или иной модели электродного эффекта для исследования электричества приземного слоя атмосферы в зависимости от физических и метеорологических условий.

Сделан обзор современных методов и средств экспериментальных исследований элементов атмосферного электричества. Сформулированы общие и специальные задачи атмосферно-электрических наблюдений. Приведены требования к составу и размещению измерительных приборов.

Проведен сравнительный анализ экспериментальных исследований электрических характеристик приземного слоя и результатов теоретических расчетов параметров электродного слоя. Сделан вывод о возможности использования модели электродного эффекта для теоретического исследования электрического состояния приземного слоя атмосферы.

В главе 2 для исследования электрического состояния нетурбулентного приземного слоя используется стационарная модель классического электродного эффекта. В этом случае распределение электрических характеристик в электродном слое зависит от степени ионизации воздуха, величины электрического поля и концентрации аэрозольных частиц в атмосфере. В предположении, что количество аэрозольных частиц в атмосфере сравнимо с числом легких ионов, система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \pm \frac{d}{dz} (b_{1,2} E n_{1,2}) &= q(z) - \alpha n_1 n_2 - \eta_1 n_{1,2} N_{2,1} - \eta_2 n_{1,2} N_0; \\ \eta_1 n_{1,2} N_0 - \eta_1 n_{2,1} N_1 &= 0; \\ N_1 + N_2 + N_0 &= N = const; \\ \frac{dE}{dz} &= 4\pi e (n_1 - n_2 + N_1 - N_2). \end{aligned} \quad (9)$$

с граничными условиями:  $n_2(z=0) = 0$ ,  $E(0) = E_0$ ,  $n_{1,2}(\infty) = n_\infty = (q(\infty)/\alpha)^{1/2}$ .

При этом предполагается, что присутствие в атмосфере аэрозоля в стационарном состоянии и с постоянной концентрацией частиц приводит к образованию тяжелых ионов, подвижность которых на несколько порядков меньше, чем легких. В противном случае, когда число аэрозольных частиц намного превышает количество легких ионов, предположение о стационарности тяжелых ионов не выполняется.

Для исследования влияния источников ионизации на электрическую структуру приземного слоя рассмотрен профиль интенсивности ионообразования в виде:

$$q(z) = q + Q_0 \exp(-z/l). \quad (7)$$

Первый член  $q = 7 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  - ионизация, создаваемая космическими лучами и  $\beta$ -излучением поверхности земли. Второй член отражает ионизацию, создаваемую радоном и продуктами его распада с характерным масштабом распределения  $l$ .

В результате численного моделирования получены следующие результаты. В свободной от аэрозоля атмосфере при усилении электрического поля у поверхности земли значение электродного эффекта ( $E_0/E_\infty$ ) практически не меняется, а толщина электродного слоя и, следовательно, масштаб распределения электрических величин увеличивается. Как следствие этого, изменяются параметры электродного слоя: электродный эффект ( $E/E_\infty$ ) на высоте нескольких метров с усилением поля на поверхности увеличивается, отношение  $n_1/n_\infty$  меняется в пределах нескольких процентов, отношение  $n_2/n_\infty$  уменьшается (таблица 1).

Таблица 1- Классический электродный эффект при различных значениях  $E_0$

$E_0, \text{В} \cdot \text{м}^{-1}$	-100	-200	-500
$n_1 \cdot 10^9, \text{м}^{-3}, z = 0 \text{ м}$	2,05	1,98	1,90
$n_\infty \cdot 10^9, \text{м}^{-3}$	2,10	2,10	2,10
$n_1/n_\infty, z = 1 \text{ м}$	0,95	0,92	0,90
$n_2/n_\infty, z = 1 \text{ м}$	0,37	0,17	0,06
$E/E_\infty, z = 1 \text{ м}$	1,58	1,95	2,26
$n_1/n_\infty, z = 2 \text{ м}$	0,97	0,94	0,90
$n_2/n_\infty, z = 2 \text{ м}$	0,69	0,33	0,18
$E/E_\infty, z = 2 \text{ м}$	1,21	1,65	2,11
$E_0/E_\infty$	2,22	2,33	2,43

Появление в приземном слое аэрозольных частиц ( $N \sim (10^8 - 10^9) \text{ м}^{-3}$ ) уменьшает толщину электродного слоя, электродный эффект ( $E_0/E_\infty$ ) при этом с точностью до нескольких процентов не меняется. Вблизи земной поверхности значения  $n_1/n_\infty$ ,  $n_2/n_\infty$  и  $E/E_\infty$  меняются нелинейно, что обусловлено нелинейностью самого электродного эффекта. При

концентрациях аэрозольных частиц превышающих  $5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$  электрическое состояние приземного слоя определяется в основном только тяжелыми ионами.

Усиление электрического поля у земли при наличии аэрозоля в атмосфере, так же как и в чистой атмосфере, приводит к увеличению электродного эффекта ( $E/E_x$ ) на высоте нескольких метров, но в меньшей степени. При этом параметры электродного эффекта меняются: отношения  $n_1/n_x$  и  $N_2/N_x$  уменьшаются, отношение  $N_1/N_x$  увеличивается, отношение  $n_1/n_x$  практически остается постоянным (таблица 2).

Таблица 2 - Классический электродный эффект при наличии аэрозольных частиц

$E_0, \text{ В/м}$	$N = 10^8 \text{ м}^{-3}$		$N = 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$		$N = 10^9 \text{ м}^{-3}$	
	-100	-500	-100	-500	-100	-500
$N_1 \cdot 10^9, z = 0 \text{ м}$	2,01	1,89	1,84	1,72	1,65	1,52
$n_x \cdot 10^9$	1,94	2,03	1,85	1,85	1,63	1,52
$n_1/n_x, z = 1 \text{ м}$	1,01	0,92	0,97	0,92	0,98	0,98
$n_2/n_x, z = 1 \text{ м}$	0,44	0,07	0,45	0,08	0,49	0,10
$E/E_x, z = 1 \text{ м}$	1,39	2,01	1,41	2,0	1,37	1,83
$N_1/N_x, z = 1 \text{ м}$	1,90	3,80	1,94	3,88	1,80	3,76
$N_2/N_x, z = 1 \text{ м}$	0,38	0,02	0,39	0,03	0,44	0,04
$n_1/n_x, z = 2 \text{ м}$	1,03	0,93	0,98	0,93	0,99	1,00
$n_2/n_x, z = 2 \text{ м}$	0,78	0,14	0,77	0,16	0,80	0,18
$E/E_x, z = 2 \text{ м}$	1,11	1,87	1,14	1,85	1,12	1,69
$N_1/N_x, z = 2 \text{ м}$	1,43	3,33	1,26	2,90	1,21	4,10
$N_2/N_x, z = 2 \text{ м}$	0,95	0,01	0,78	0,09	0,83	0,10
$E_0/E_x$	1,94	2,16	2,01	2,16	1,98	2,0

В условиях «хорошей погоды» объемный электрический заряд вблизи поверхности земли положителен, а масштаб его распределения определяется толщиной электродного слоя и составляет несколько метров. Значения плотности объемного электрического заряда определяются, как мощностью источника ионообразования, так и величиной электрического поля.

Присутствие в атмосфере аэрозольных частиц приводит к образованию тяжелых ионов и, как следствие, уменьшает объемный заряд, обусловленный аэроионами. При концентрациях аэрозольных частиц превышающих  $10^{10} \text{ м}^{-3}$  объемный заряд, создаваемый тяжелыми ионами, играет основную роль в электрическом состоянии приземного слоя атмосферы.

Отрицательный объемный заряд появляется при наличии тонкого слоя (несколько десятков сантиметров) повышенной ионизации вблизи поверхности земли и приводит к реверсу электродного эффекта (рис. 1,  $Q_0 = 80 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $E_0 = -100 \text{ В/м}$ ). Такой же эффект возникает при небольшой степени ионизации воздуха, но при слабых электрических полях (порядка

нескольких десятков вольт на метр). При усилении электрического поля (рис.2,  $Q_0 = 80 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $E_0 = -200 \text{ В/м}$ ) или увеличении масштаба распределения функции ионообразования объемный заряд становится положительным.

В главе 3 исследуется электрическое состояние турбулентного приземного слоя. Для изучения влияния турбулентности на электрические процессы в приземном слое использован метод Рейнольдса.

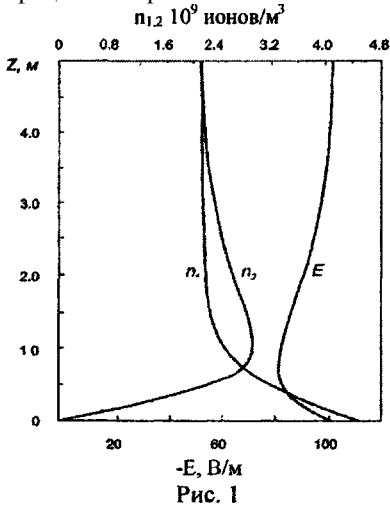


Рис. 1

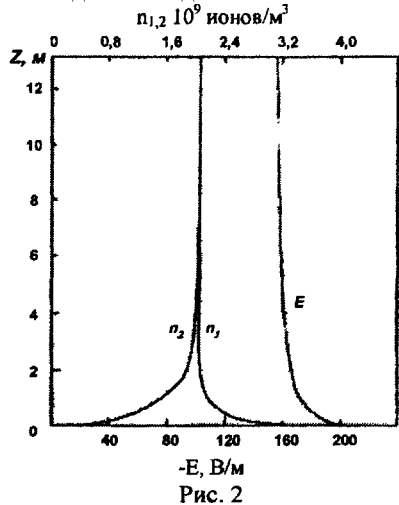


Рис. 2

Величины  $\bar{v}$ ,  $\vec{E}$ ,  $n'_{1,2}$ , входящие в систему (2), представляются в виде:  $\bar{v} = \langle \bar{v} \rangle + \bar{v}'$ ,  $n'_{1,2} = \langle n'_{1,2} \rangle + n'_{1,2}'$ ,  $\vec{E} = \langle \vec{E} \rangle + \vec{E}'$ . Угловые скобки означают усреднение по времени:  $\langle f \rangle = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} f dt$ , где  $T_f$  - масштаб времени, удовлетворяющий условию  $\tau \ll T_f \ll T$ ,  $\tau$  - характерный временной масштаб флуктуаций,  $T$  - характерный временной масштаб изменения средних величин, причем  $\langle f' \rangle = 0$ .

При  $T \gg \tau$  (где  $T$  - характерное время изменения электрических характеристик атмосферы,  $\tau = (q\alpha)^{-1}$ ) система уравнений турбулентного электродного эффекта (3) становится стационарной:

$$-\frac{d}{dz} \left( D_r(z) \frac{dn_{1,2}}{dz} \right) \pm \frac{d}{dz} (b_{1,2} E n_{1,2}) = q(z) - \alpha n_{1,2};$$

$$\frac{dE}{dz} = 4\pi e(n_1 - n_2), \quad (8)$$

с граничными условиями:  $n_1(z = z_0) = n_2(z = z_0) = 0, n_1(\infty) = n_2(\infty) = (q(\infty)/\alpha)^{1/2}$ ,  
 $E(\infty) = j_0/\lambda_\infty$ ,  $\lambda_\infty = e \cdot (b_1 n_1(\infty) + b_2 n_2(\infty))$

Введение параметра шероховатости  $z_0$ , зависящего от числа Рейнольдса, эквивалентно определению характера динамического взаимодействия турбулентного потока с подстилающей поверхностью. В случае аэродинамически гладкой поверхности параметр  $z_0 = 0$ .

Для исследования влияния метеорологических факторов коэффициент турбулентной диффузии аэроионов задавался в виде:  $D_i(z) = D_i \cdot z$ , где  $D_i$  – коэффициент турбулентности, определяющийся метеорологическими условиями.

Анализ численных расчетов показывает, что толщина электродного слоя с увеличением значений скорости ветра увеличивается. При небольших скоростях ветра ( $u \sim 1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $D_i \approx 0,02 - 0,03 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) профиль концентрации положительных ионов  $n_1$  очень быстро растет и на высоте  $\approx 1 \text{ м}$  достигает своего асимптотического значения. Положительный объемный заряд вблизи поверхности в этом случае максимален, а на высоте 6 м разница в значениях  $n_1$  и  $n_2$  уже не превышает 5% (таблица 3). Все это делает профиль похожим на распределение электрических величин вблизи поверхности в случае классического электродного эффекта.

Таблица 3 - Турбулентный электродный эффект при нейтральной стратификации приземного слоя

$u, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$	1	2	3	4	5
$D_i, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$	0,02	0,05	0,07	0,09	0,11
$n_1/n_x, z = 1 \text{ м}$	1,00	0,91	0,85	0,81	0,78
$n_2/n_x, z = 1 \text{ м}$	0,64	0,63	0,63	0,62	0,62
$E/E_x, z = 1 \text{ м}$	1,84	2,00	2,06	2,09	2,12
$n_1/n_x, z = 2 \text{ м}$	1,00	0,99	0,93	0,86	0,83
$n_2/n_x, z = 2 \text{ м}$	0,80	0,79	0,77	0,74	0,73
$E/E_x, z = 2 \text{ м}$	1,59	1,81	1,89	1,95	1,99

При увеличении скорости ветра до  $5 - 6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  ( $D_i \geq 0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) профили  $n_1$  и  $n_2$  становятся близкими, и разница значений на высоте 1 м не превышает 10%. Толщина электродного слоя и масштаб распределений электрических характеристик увеличивается и достигает нескольких десятков метров.

С увеличением скорости ветра электродный эффект на высоте 1 - 2 метра (стандартной для установки датчиков при атмосферно-электрических наблюдениях) увеличивается, что является следствием увеличения толщины электродного слоя, но отношение  $E_0/E_x$  остается постоянным. Это объясняется тем, что турбулентность «размывает» объемный заряд, образующийся вблизи поверхности земли, но она не является дополнительным генератором объемного заряда.

Для исследования влияния источников ионизации на электрическую структуру приземного слоя рассмотрен профиль интенсивности ионообразования в виде выражения (8).

При повышенной степени ионизации воздуха и небольшой скорости ветра вблизи поверхности земли появляется отрицательный объемный заряд, как и в случае классического электродного эффекта, но масштаб его распределения увеличивается до 10 — 15 м, а плотность заряда уменьшается (рис. 3,  $Q_0 = 80 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $D_I = 0,03 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $E_0 = -100 \text{ В/м}$ ). При увеличении турбулентного перемешивания (рис. 4,  $D_I = 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) или электрического поля объемный заряд становится положительным.

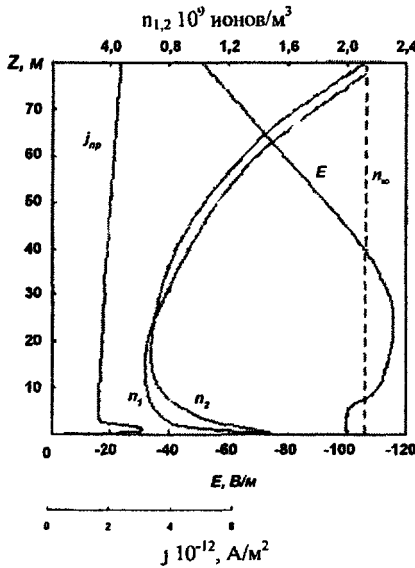


Рис. 3

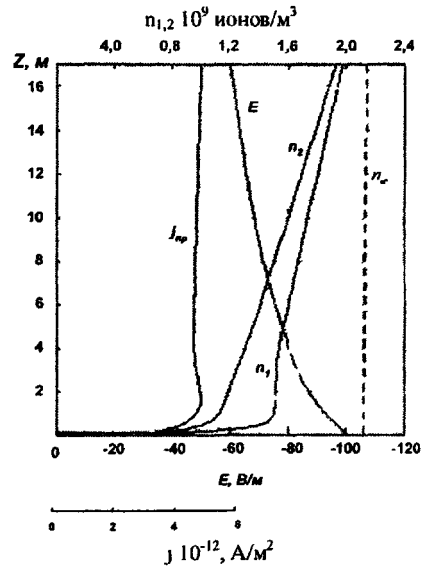


Рис. 4

Одновременно с усилением электрического поля влияние турбулентности ослабевает: положительный объемный заряд увеличивается, электродный эффект вблизи поверхности земли немного усиливается, и распределения электрических величин становятся похожими на классический электродный эффект (рис. 5,  $Q_0 = 4,8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $D_I = 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $E_0 = -500 \text{ В/м}$ ).

Для оценки влияния на электрическое состояние приземного слоя аэрозольных частиц введены следующие допущения. Предполагается, что при концентрациях  $N \sim (10^9 - 10^{10}) \text{ м}^{-3}$  током заряженных аэрозольных частиц можно пренебречь по сравнению с током аэроионов, условия равновесия между аэрозольными частицами и аэроионами считаются выполненными и время установления равновесия внутри электродного слоя много больше времени жизни легких ионов. При этих предположениях

система уравнений турбулентного электродного эффекта с учетом однократно заряженного аэрозоля принимает вид:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{d}{dz} \left( D_T(z) \frac{dn_{i,2}}{dz} \right) \pm \frac{d}{dz} (b_{i,2} E n_{i,2}) = q - \alpha n_i n_2 - \eta_1 n_{i,2} N_{2,i} - \eta_2 n_{i,2} N_a; \\
 & \frac{dE}{dz} = 4\pi e \cdot (n_1 - n_2 + N_1 - N_2); \\
 & N_1 + N_2 + N_a = N = const; \\
 & -\frac{d}{dz} \left( \tau(z) \cdot \frac{dN_{i,2}}{dz} \right) = \eta_2 N_a n_{i,2} - \eta_1 N_{i,2} n_{2,i}, \quad (9)
 \end{aligned}$$

где  $\tau(z)$  - коэффициент турбулентного перемешивания для тяжелых ионов. Граничные условия:  $E(z = z_0) = E_0$ ,  $\left( \frac{dN_{i,2}}{dz} \right)_{z=z_0} = 0$ ,  $N_1(\infty) = N_2(\infty)$ ,  $n_{i,2}(z = z_0) = 0$ ,  $n_{i,2}(\infty) = n_a$ .

Результаты расчетов показывают, что наличие аэрозольных частиц концентрацией менее  $10^9 \text{ м}^{-3}$ , как и в случае классического электродного эффекта, практически не влияет на его характеристики. При концентрациях  $\sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$  в слое толщиной несколько метров возникает реверс электродного эффекта, что свидетельствует о преобладании отрицательного объемного заряда, создаваемого тяжелыми ионами, над положительным объемным зарядом, обусловленным аэроионами (рис. 6,  $E_0 = -100 \text{ В/м}$ ,  $D_T = 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $N = 10^{10} \exp(-z/5) \text{ м}^{-3}$ ). Дальнейшее увеличение концентрации аэрозольных частиц приводит к тому, что электрический режим приземного слоя начинает определяться распределением тяжелых ионов, концентрациями легких ионов можно пренебрегать.

Для того чтобы оценить влияние на электрическое состояние приземного слоя аэрозольных частиц, заряженных двукратно и более, рассматривается следующая система:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{d}{dz} \left( D_T(z) \frac{dn_{i,2}}{dz} \right) \pm \frac{d}{dz} (n_{i,2} b_{i,2} E) = q(z) - \alpha n_i n_2 - n_i \Phi_{i,2}; \\
 & \Phi_1 = \beta_{11}^{(0)} N_0 + \beta_{11}^{(1)} N_1^{(1)} + \beta_{12}^{(1)} N_2^{(1)} + \beta_{12}^{(2)} N_2^{(2)} + \dots; \\
 & \Phi_2 = \beta_{22}^{(0)} N_0 + \beta_{22}^{(1)} N_2^{(1)} + \beta_{21}^{(1)} N_1^{(1)} + \beta_{21}^{(2)} N_1^{(2)} + \dots; \\
 & \frac{dE}{dz} = 4\pi e \cdot (n_1 - n_2 + N_1^{(1)} - N_2^{(1)} + 2(N_1^{(2)} - N_2^{(2)}) + \dots); \\
 & N = N_0 + N_1^{(1)} + N_2^{(1)} + N_1^{(2)} + N_2^{(2)} + \dots, \quad (10)
 \end{aligned}$$

где  $\beta_{ii}^*$  - коэффициенты взаимодействия легких ионов с аэрозольными частицами,  $k$  - число элементарных зарядов на аэрозольной частице.

Расчеты выполнены для аэрозольных частиц с характерными размерами  $r = 0,02 \mu\text{км}$  и  $r = 0,1 \mu\text{км}$ . Получено, что основной вклад в величину объемного заряда вносят одно- и двукратно заряженные аэрозольные частицы, тогда как вклад частиц с зарядом от  $Ze$  до  $5e$  почти на порядок меньше.

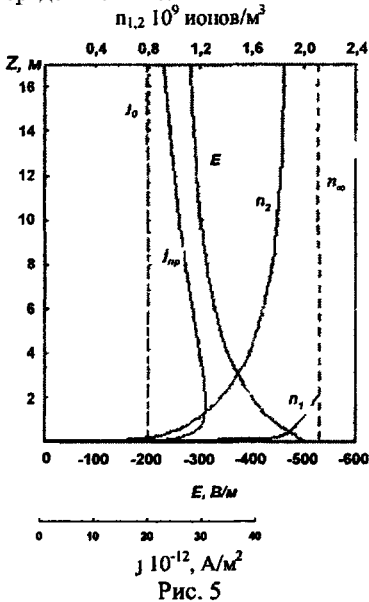


Рис. 5

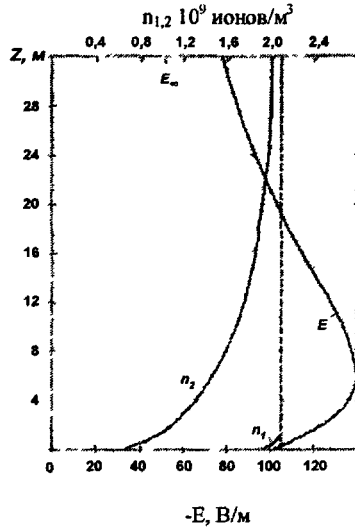


Рис. 6

Глава 4 посвящена решению задачи об электрическом состоянии приземного слоя в приближении сильного турбулентного перемешивания, когда основную роль в переносе аэроионов играет турбулентная диффузия.

Анализ уравнений электродного эффекта показывает, что при выполнении условия:  $\xi_{1,2} \ll 1$ , исходная система (3) расщепляется на систему линейных по электрическому полю уравнений и в нулевом приближении концентрация ионов не зависит от напряженности электрического поля, а определяется турбулентным обменом, процессами ионизации и рекомбинации. Распределение напряженности электрического поля  $E$  с высотой определяется изменением электрической проводимости  $\lambda(z)$ .

В приближении сильного турбулентного перемешивания система уравнений с граничными условиями, описывающая электрические процессы в приземном слое атмосферы для горизонтально однородного, стационарного случая, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{d}{dz} \left( D_T(z) \frac{dn_{1,2}}{dz} \right) = q - \alpha n_{1,2}^2; \\
 & -D_T(z) \frac{d^2 E}{dz^2} + 4\pi\lambda(z)E = 4\pi j_0; \\
 & \left. \frac{dE}{dz} \right|_{z=z_0} = 0, \quad E|_{z \rightarrow \infty} = j_0 / \lambda_\infty, \quad n_{1,2}(z=z_0) = 0, \quad n_{1,2}(z \rightarrow \infty) = n_\infty. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Распределение аэроионов по высоте  $z$  определяется масштабом  $l_m = (D_m \tau)^{\frac{1}{2-m}}$ ,  $\tau = (g_\infty \alpha)^{-1}$ , который представляет расстояние, проходимое ионом за счет турбулентной диффузии за время своей жизни.

Распределение напряженности электрического поля с высотой определяется изменением электрической проводимости с высотой и характерным масштабом  $L_m = (D_m \tau_{\lambda_\infty})^{\frac{1}{2-m}}$ ,  $\tau_{\lambda_\infty} = (4\pi \lambda_\infty)^{-1}$ . Физически масштаб  $L_m$  представляет толщину турбулентного электродного слоя.

Для коэффициента турбулентной диффузии  $D_T(z)$  используется следующее представление:

$$D_T(z) = D_m z^m, \quad (m = 0; 1; 4/3), \quad (12)$$

где  $m$  - параметр стратификации приземного слоя.

Расчеты показали, что в случаях устойчивой ( $m = 0$ ), нейтральной ( $m=1$ ) и термически неустойчивой ( $m = 4/3$ ) стратификации напряженность электрического поля убывает от некоторого значения у поверхности земли до асимптотического значения на верхней границе электродного слоя. При увеличении степени неустойчивости атмосферы масштаб распределения электрических характеристик увеличивается. Значение электрического потенциала на фиксированной высоте с увеличением масштаба уменьшается. Плотность электрического заряда резко возрастает вблизи поверхности, а затем убывает. Наиболее резкие изменения плотности электрического заряда получены при термически неустойчивой стратификации приземного слоя. Для нейтральной стратификации приземного слоя изменение концентрации аэроионов и электрической проводимости с высотой до небольших высот имеет логарифмический характер.

На рис. 7 и 8 приведены распределения электрического поля и плотности заряда в случаях нейтральной ( $m = 1$ ,  $L_1 = 15$  м (1); 30 м (2); 40 м (5); 50 м (4); 60 м (5)) и термически неустойчивой ( $m = 4/3$ ,  $L_{4,3} = 120$  м (6); 300 м (7); 1000 м (8)) стратификации приземного слоя.

Присутствие аэрозольных частиц в приземном слое уменьшает характерный масштаб распределения аэроионов  $l_m$  и увеличивает толщину  $L_m$  электродного слоя, а усиление степени ионизации воздуха приводит к ее уменьшению. Распределения электрических характеристик в присутствии аэрозольных частиц характеризуются уменьшением начальных значений

напряженности электрического поля и увеличением плотности электрического заряда

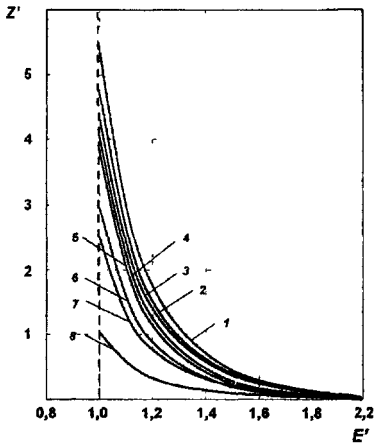


Рис 7

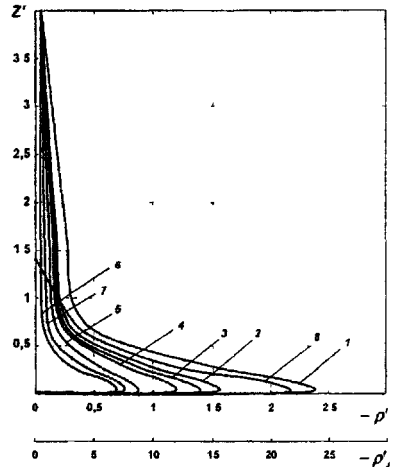


Рис 8

В главе 5 приведены результаты экспериментальных исследований глобальных и локальных вариаций электрического поля в высокогорной и высокоширотной зонах по данным синхронных измерений на станциях. Пик Чегет (3040 м), Шаджатмаз (2100 м) и Нижний Архыз (2100 м), на трех станциях Кольского полуострова: Верхнетуломский, Ловозеро, Апатиты и на горе Ай-Петри (2300 м). Установлено, что суточно-сезонные вариации электрического поля в высокогорной и высокоширотной зонах подобны.

Наиболее устойчивой особенностью суточных вариаций на высокогорных станциях, расположенных выше 2000 м, является утренний минимум (01 - 04) UT и вечерний максимум (16 - 22) UT. От месяца к месяцу и от станции к станции изменяются лишь относительные величины этих минимумов и максимумов. С уменьшением высоты станции наблюдения эта закономерность суточного хода электрического поля исчезает. Подобие суточных вариаций электрического поля в высокогорных условиях кривой Карнеги позволяет предположить, что устойчивая закономерность суточного хода электрического поля обусловлена глобальной унитарной вариацией ионосферного потенциала. Проведенные экспериментальные исследования позволяют рекомендовать пункты наблюдения, расположенные в горных районах, для создания сети глобального мониторинга электрического поля атмосферы. При этом необходима подробная детализация получаемых данных, связанная с влиянием электродного эффекта. Теоретически нестационарные

электрические процессы в приземном слое описываются соответствующими моделями электродного эффекта.

Для нестационарного классического электродного слоя система уравнений записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} E n_{1,2}) &= q(z) - \alpha n_{1,2}; \\ \frac{dE}{dz} &= 4\pi e(n_+ - n_-). \end{aligned} \quad (13)$$

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} n_1(z)|_{t=0} &= \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \quad n_2(z)|_{t=0} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \left(1 - e^{-z/l_0}\right), \quad E(z)|_{t=0} = 4\pi e \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \left(1 - e^{-z/l_0}\right) + E_0, \\ n_2|_{z=0} &= 0, \quad E|_{z=0} = E_0, \quad n_{1,2}|_{z=l} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $l_0$  - характерный масштаб классического электродного слоя.

Проведенные численные расчеты показывают, что толщина электродного слоя составляет 6 - 7 м и с течением времени возрастает, при этом на высоте 0,5 - 1 м значения электродного эффекта меняются незначительно. Концентрации положительных и отрицательных аэроионов вблизи поверхности земли уменьшается в течение первых 5 минут, а затем становится практически постоянной. Плотность объемного заряда значительно меняется первые 3 минуты, а затем практически постоянна. Проведенные численные эксперименты позволяют сделать вывод, что время установления стационарного режима, в классическом электродном слое составляет 5 - 7 минут (таблица 4).

Таблица 4 - Эволюция классического электродного эффекта в режиме установления стационарного состояния

$t, \text{с.}$	0	4	100	200	300	400	500	600
$l, \text{м.}$	6,92	6,92	6,8	6,59	6,36	6,13	5,92	5,77
$E_0/E_\infty$	1,77	1,78	2,15	2,43	2,57	2,64	2,67	2,69

Обозначения:  $E_0$  и  $E_\infty$  - значения напряженности электрического поля на нижней и верхней границах классического электродного слоя,  $l$  - толщина электродного слоя.

При невысокой степени ионизации воздуха, но малых электрических полях ( до 30 В/м), как и в стационарном случае, объемный заряд на высоте

0,5 - 2 м имеет отрицательный знак. При увеличении электрического поля знак объемного заряда становится положительным.

Рассмотрена модель нестационарного турбулентного электродного эффекта в атмосфере в соответствии с системой (3). Начальные и граничные условия:

$$n_{1,2}(z)|_{z=0} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \left(1 - e^{-z/L_0}\right), E(z)|_{z=0} = E_0, \quad (15)$$

$$n_{1,2}|_{z=z_0} = 0, n_{1,2}(\infty)|_{z=z_0} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, E|_{z=z_0} = E_0.$$

где  $E_0$  - значение напряженности электрического поля у поверхности земли на высоте  $z_0$ ,  $L_0$  - характерный масштаб турбулентного электродного слоя.

Численные расчеты показывают, что время установления стационарного состояния в турбулентном электродном слое в несколько раз больше, чем в классическом, и составляет примерно 15 минут.

Таблица 5 - Эволюция турбулентного электродного эффекта в режиме установления стационарного состояния

		t, с.	0	100	200	300	400	500	1000	1500
$E_0/E_m$	$D_l=0,0$ 3	1,00	1,62	1,93	2,06	2,11	2,13	2,14	2,14	2,14
	$D_l=0,1$	1,00	1,53	1,84	1,99	2,06	2,08	2,10	2,10	2,10
	$D_l=0,2$	1,00	1,50	1,81	1,97	2,04	2,07	2,09	2,09	2,09

Из системы (3) следует следующее уравнение для напряженности электрического поля:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + 4\pi\lambda E - D_l(z,t)\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = 4\pi j_e(t) \quad (16)$$

Вариации плотности электрического тока  $j_e(t)$  могут определяться нестационарностью электрических полей выше приземного слоя, то есть обуславливаются вариациями потенциала ионосферы, вызываемыми грозowymi токовыми генераторами, либо генераторами, находящимися в верхних слоях атмосферы. Рассмотрена задача об установлении стационарного электрического поля при включении тока  $j_e(t)$  в момент времени  $t=0$ . Предполагалось, что в приземном слое  $\lambda = const$ ,  $m=0$ ,  $D_r = D = const$ . Плотность электрического поля в следующем

виде:  $j(t) = j_0(1 + \varepsilon \cos \omega t)$ , где  $\varepsilon$  - некоторая постоянная. Тогда для определения напряженности электрического поля получаем уравнение:

$$\frac{\partial E}{\partial t} - D \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + 4\pi\lambda E = 4\pi j_0(1 + \varepsilon \cos \omega t) \quad (17)$$

Граничные условия для данного уравнения определяются следующим образом:

$$E|_{z=0} = E_0, \quad E|_{z=\infty} = E(0, z), \quad \left( \frac{\partial E}{\partial t} + 4\pi\lambda E \right) \Big|_{z \rightarrow \infty} = 4\pi j_0(t) \quad (18)$$

Решение получено с помощью преобразования Лапласа и имеет вид:

$$\begin{aligned} E(z, t) = & E_0 \int_0^t e^{-4\lambda\tau} \frac{z}{2\sqrt{\pi D \tau^3}} e^{-z^2/4D\tau} d\tau + \frac{j_0}{\lambda} (1 - e^{-4\lambda t}) + \\ & \frac{j_0}{\lambda} \varepsilon \frac{1}{1 + \omega^2 / (4\pi\lambda)^2} \times \left[ (\cos \omega t + \frac{\omega}{4\pi\lambda} \sin \omega t) - e^{-4\lambda t} \right] - \\ & - \frac{j_0}{\lambda} \left( \int_0^t e^{-4\lambda\tau} \frac{z}{2\sqrt{\pi D \tau^3}} e^{-z^2/4D\tau} d\tau - e^{-4\lambda t} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{z/2\sqrt{Dt}}^{\infty} e^{-x^2} dx \right) - \\ & - 4\pi j_0 \varepsilon \int_0^t \cos \omega(t - \tau) e^{-4\lambda\tau} \times \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{z/2\sqrt{Dt}}^{\infty} e^{-x^2} dx \right) d\tau + E(0) \times e^{-4\lambda t} \times \\ & \times \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{z/2\sqrt{Dt}}^{\infty} e^{-x^2} dx \right) \end{aligned} \quad (19)$$

При  $t \rightarrow \infty$  и  $\omega \ll 4 \cdot \pi \cdot \lambda$  вычисление интегралов, стоящих в правой части выражения (20), приводят к следующему представлению для  $E(z, \infty)$ :

$$E(z, \infty) = E_0 e^{-\sqrt{4\lambda D} z} + \frac{j_0}{\lambda} (1 - e^{-\sqrt{4\lambda D} z}) \quad (20)$$

Это асимптотическое решение соответствует решению стационарного уравнения, вытекающего из уравнения (17). Полученное решение имеет квазистационарный характер, т. е. электрическое поле в приземном слое «подстраивается» к изменениям плотности электрического тока.

Рассмотрена задача об установлении периодических вариаций электрического поля в турбулентном приземном слое, вызванных колебаниями плотности тока  $\vec{j}_0 e^{imt}$ . В этом случае решением уравнения (17) является выражение:

$$E(z,t) = e^{i\omega t} \left\{ E_0 e^{-\sqrt{\frac{4\pi\lambda + i\omega}{D}} z} + \frac{4\pi j_0 (4\pi\lambda - i\omega)}{\omega^2 + 16\pi^2 \lambda^2} \left[ 1 - e^{-\sqrt{\frac{4\pi\lambda + i\omega}{D}} z} \right] \right\} \quad (21)$$

Анализ вещественной части полученного выражения показывает, что масштаб распределения электрического поля вблизи поверхности земли уменьшается по сравнению со стационарным случаем. Уменьшается амплитуда электрического поля, проникающего сверху в приземный слой. При этом существует сдвиг фазы колебаний электрического поля по отношению к колебаниям плотности электрического тока.

Рассмотрен случай, когда коэффициент турбулентной диффузии есть функция времени:  $D_r(z,t) = D_r(z)(1 + \nu \cos \omega t)$ , т.е. выступает в качестве локального фактора. При условии:  $\lambda = const$ ,  $D_r(z) = D = const$  имеем:

следую 
$$\frac{\partial E}{\partial t} - D(1 + \nu \cos \omega t) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + 4\pi\lambda E = 4\pi j_0 \quad (22)$$

с грани 
$$\bar{E}|_{z \rightarrow \infty} = 0, \bar{E}|_{z=0} = E(0) - \frac{j_0}{\lambda}, \bar{E} = E - j_0 / \lambda, \bar{E}|_{z=0} = E_0 - \frac{j_0}{\lambda} \quad (23)$$

$$E(t) = \frac{j_0}{\lambda} + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\sqrt{a}} \left( E(0) - \frac{j_0}{\lambda} \right) \times e^{-4\pi\lambda t} e^{-z^2/4a} \int_0^{z/\sqrt{2a}} e^{-x^2} dx +$$

Решен

$$+ \left( E_0 - \frac{j_0}{\lambda} \right) \times \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-4\pi\lambda t} \int_0^{z/\sqrt{2a}} e^{-x^2} dx \right] -$$

$$- \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( E_0 - \frac{j_0}{\lambda} \right) 4\pi\lambda \int_0^t e^{-4\pi\lambda(t-t')} dt \times \int_0^{z/\sqrt{2(a(t)-a(t'))}} e^{-x^2} dx, \quad (24)$$

где:  $a(t) = a = Dt + \frac{D\nu}{\omega} \sin \omega t$ . При больших временах электрической релаксации атмосферы, полученное решение переходит в решение диффузионного уравнения (22) с  $\lambda = 0$ .

Решены квазистационарные задачи о вариациях электрических величин в приземном слое, вызванные временными изменениями коэффициента турбулентной диффузии:  $D_r(z,t) = D_r(1 - e^{-i\omega t})z$ . Результаты расчетов для

$T = 3$  ч,  $D_1 = 0,2$  м/с приведены в таблице 6. Установлено, что временной ход коэффициента турбулентной диффузии значительно влияет на распределение аэроионов, объемного заряда и электрического поля на высотах до 1 метра.

Расчеты, проведенные для Пика Чегет, показывают возможность возникновения дополнительного дневного максимума электрического поля вследствие суточной вариации коэффициента турбулентной диффузии (таблица 7). Этот эффект может проявляться на континентальных пунктах наблюдения, в условиях турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы.

Таблица 6 - Значения электрических характеристик вблизи поверхности земли в различные моменты времени

z, м	t, ч	1	2	3	6	9	12
0,01	$n_1 \times 10^{-9}$	0,69	0,31	0,3	0,18	0,15	0,14
0,01	$n_2 \times 10^9$	0,08	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
0,01	$E/E_\infty$	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27
0,1	$n_1 \times 10^{-9}$	2,10	1,35	0,99	0,73	0,65	0,59
0,1	$n_2 \times 10^9$	0,93	0,51	0,31	0,22	0,19	0,18
0,1	$E/E_\infty$	2,23	2,26	2,29	2,29	2,31	2,31
1	$n_1 \times 10^{-9}$	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
1	$n_2 \times 10^9$	1,51	1,66	1,73	1,76	1,79	1,81
1	$E/E_\infty$	1,94	2,02	2,08	2,11	2,12	2,12
10	$n_1 \times 10^{-9}$	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
10	$n_2 \times 10^9$	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
10	$E/E_\infty$	1,25	1,39	1,48	1,55	1,59	1,6

Таблица 7 - Суточные вариации электрического поля и коэффициента турбулентной диффузии на Пике Чегет

N	UT	00-03	03-06	06-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-00
1.	$E/\langle E \rangle$	0,9	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,0
2.	$E/\langle E \rangle$	0,7	0,8	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,0
3.	$E/\langle E \rangle$	0,8	0,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0
4.	$D$	0,04	0,10	0,18	0,16	0,12	0,10	0,03	0,03
5.	$E/E_\infty$	1,9	2,1	2,4	2,2	2,1	2,1	1,8	1,8
6.	$E/\langle E \rangle$	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,1

Обозначения: строка 1 - кривая Карнеги ; 2 - апрель ; 3,4 - август-сентябрь ; 5 - электродный эффект, соответствующий значениям  $D$ ; 6 - электрическое поле на высоте 1 м, соответствующее значениям  $D$ ;  $\langle E \rangle$ -среднесуточное значение электрического поля.

В главе 6 исследуются вариации атмосферно-электрических элементов на высокогорных станциях в Приэльбрусье: Пик Чегет, Пик Терскол и Кызбурун. Для исследования разработан комплекс, включающий в себя измерители градиента потенциала  $V'$  электрического поля «Поле-2», полярных проводимостей  $\lambda_{\pm}$  воздуха «Электропроводность-2» и пластину для измерения плотности вертикального тока  $j_0$ . В качестве регистратора использован компьютер Pentium-120 с платой АЦП.

Результаты атмосферно-электрических наблюдений представлены на рис. 9-12. Общей закономерностью суточного хода электрического поля являются утренний минимум (01 – 04 UT), дневной (08 – 12 UT) и вечерний (19 – 21 UT) максимумы. Величина минимума составляет 60 – 80% и увеличивается в весенне-зимний период. Величина дневного максимума равна 120 – 150%, а вечернего – 102 – 130%. На Пике Чегет утренний минимум наиболее глубокий (80%), а дневной максимум (125%) в летние месяцы проявляется раньше (06 – 09 UT), чем на других станциях.

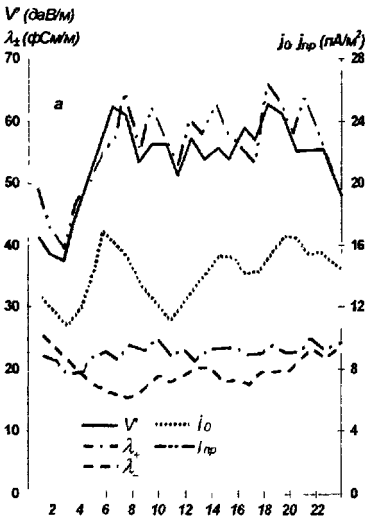


Рис. 9 - Пик Чегет август — сентябрь



Рис. 10 - Пик Чегет — апрель

Положительная компонента проводимости воздуха в большинстве случаев превышает отрицательную компоненту и не имеет суточного хода. Значения плотности полного тока и тока проводимости на Пике Чегет значительно различаются в летние месяцы. На Пике Терскол эти значения практически одинаковы. Среднее количество ядер конденсации в высокогорных условиях (Пик Чегет) составляет  $5 \cdot 10^8$  частиц в  $m^3$ , что практически не влияет на электрические параметры атмосферы.

На основе проведенных исследований сделан вывод, что в вариациях электрического поля и плотности тока в высокогорных условиях проявляются элементы глобальной унитарной вариацией потенциала ионосферы. Показано, что причиной локальных вариаций электрического поля является объемный заряд, создаваемый легкими ионами в приземном слое атмосферы, который играет существенную роль в летние месяцы. В соответствии с теоретическими представлениями, при практическом отсутствии аэрозоля в атмосфере, зафиксирован отрицательный объемный заряд в условиях повышенной ионизации, обусловленной метеорологическими условиями.

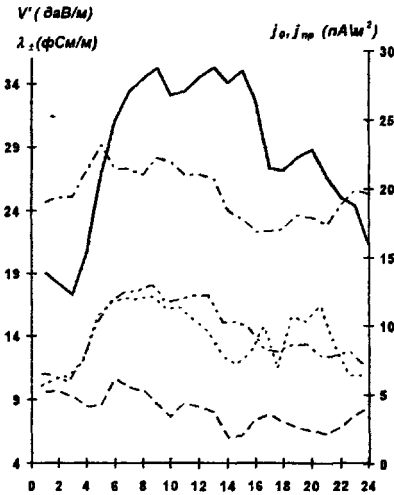


Рис. 11 — Пик Терскол июль — август

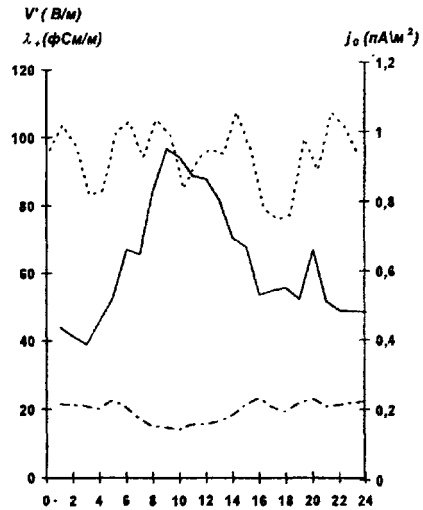


Рис. 12 - Станция Кызбурун - август

Разработано новое устройство для измерения интенсивности ионообразования (патент РФ), и получены характерные значения степени ионизации воздуха в равнинных и горных условиях (Воейково, Ленинградская обл., Пик Чегет, Приэльбрусье, Душети, Грузия). Средние значения интенсивности ионообразования на Пике Чегет составили 20 и 25 пар ионов/ $\text{м}^3\text{с}$  на высоте 1 м и на поверхности земли соответственно, на станции Душети - 21 и 28 п.и./ $\text{м}^3\text{с}$ , на станции Воейково - 16 и 23 п.и./ $\text{м}^3\text{с}$ . Повышенные значения степени ионизации воздуха в горах связаны с увеличением интенсивности космических лучей на больших высотах. Таким образом доказана возможность и целесообразность организации фоновых атмосферно-электрических наблюдений в высокогорной зоне Приэльбрусья.

Экспериментально и теоретически исследован коэффициент редукции электрического поля. Установлена зависимость его значений от величины

измеряемого поля как следствие действия электродного эффекта в приземном слое атмосферы.

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

1. Сформулирована общая постановка задачи моделирования электрического состояния приземного слоя атмосферы, учитывающая наличие турбулентных процессов обмена, поверхностных источников ионизации (радиоактивности), источников аэрозольных частиц. Показано, что электрическое состояние приземного слоя определяется действием электродного эффекта вблизи земной поверхности. Проведен анализ уравнений электродного эффекта применительно к атмосфере. Определены границы применимости различных моделей электродного эффекта в зависимости от метеорологического режима атмосферного приземного слоя.

2. Электрическая структура нетурбулентного приземного слоя атмосферы определяется действием классического электродного эффекта. Распределение электрических характеристик в электродном слое зависит от степени ионизации воздуха, величины электрического поля и концентрации аэрозольных частиц в атмосфере. В свободной от аэрозоля атмосфере при усилении электрического поля у поверхности земли значение электродного эффекта ( $E_0/E_{\infty}$ ) практически не меняется, а толщина электродного слоя и, следовательно, масштаб распределения электрических величин увеличивается. Появление в приземном слое аэрозольных частиц ( $\sim 10^8 - 10^9$  м<sup>-3</sup>) уменьшает толщину электродного слоя, электродный эффект при этом с точностью до нескольких процентов не меняется.

В условиях «хорошей погоды» объемный электрический заряд вблизи поверхности земли положителен, а масштаб его распределения определяется толщиной электродного слоя и составляет несколько метров. Значения плотности объемного электрического заряда определяются, как мощностью источника ионообразования, так и величиной электрического поля. Наличие аэрозольных частиц приводит к образованию тяжелых ионов и, как следствие, уменьшает объемный заряд, обусловленный аэроионами. При концентрациях аэрозольных частиц превышающих  $10^{10}$  м<sup>-3</sup> объемный заряд, создаваемый тяжелыми ионами, играет основную роль в электрическом состоянии приземного слоя атмосферы. Отрицательный объемный заряд появляется при наличии тонкого слоя (несколько десятков сантиметров) повышенной ионизации вблизи поверхности земли и приводит к реверсу электродного эффекта. Такой же эффект возникает при небольшой степени ионизации воздуха, но при слабых электрических полях (порядка нескольких десятков вольт на метр). При усилении электрического поля или увеличении масштаба распределения функции ионообразования объемный заряд становится положительным.

3. При наличии турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы его электрическая структура определяется действием турбулентного электродного эффекта. В отличие от классического электродного эффекта, наряду с электрическими силами перенос аэроионов

осуществляется турбулентной диффузией. Коэффициент турбулентной диффузии обуславливается метеорологическими условиями в атмосфере. При небольших скоростях ветра ( $\sim 1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) и, следовательно, коэффициентах турбулентности ( $D_t \approx 0,02\text{--}0,03 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) профиль концентрации положительных ионов очень быстро растет и на высоте  $\approx 1$  м достигает своего асимптотического значения. Положительный объемный заряд вблизи поверхности в этом случае максимален, а на высоте 6 м разница в значениях  $n_1$  и  $n_2$  уже не превышает 5%. При увеличении скорости ветра в приземном слое толщина электродного слоя и масштаб распределений электрических характеристик увеличивается и достигает нескольких десятков метров. Электродный эффект на высоте до 2 метров (стандартной для установки датчиков при атмосферно-электрических наблюдениях) увеличивается, но отношение  $E_0/E_\infty$  остается постоянным. Это объясняется тем, что турбулентность «размывает» объемный заряд, образующийся вблизи поверхности земли, но она не является дополнительным генератором объемного заряда. При скорости ветра  $5 - 6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  профили  $n_1$  и  $n_2$  становятся близкими, и разница значений на высоте 1 м не превышает 10%. Объемный заряд положителен, но его значения уменьшаются по сравнению с классическим электродным эффектом. При повышенной ионизации в тонком слое у земли и небольшой скорости ветра (до  $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) вблизи поверхности земли появляется отрицательный объемный заряд, как и в случае классического электродного эффекта, при этом масштаб его распределения увеличивается (до 10 - 15 м), а величина уменьшается. При усилении турбулентного перемешивания или электрического поля объемный заряд становится положительным. Электрическая структура приземного слоя в сильном электрическом поле (порядка 500 В/м) характеризуется ослаблением влияния турбулентности. Положительный объемный заряд увеличивается, электродный эффект вблизи поверхности земли усиливается и распределения электрических величин становятся похржими на классический электродный эффект.

В турбулентном электродном слое наличие аэрозольных частиц концентрацией менее  $10^9 \text{ м}^{-3}$ , как и в случае классического электродного эффекта, практически не влияет на его характеристики. При концентрациях  $\sim 10^{10} \text{ м}^{-3}$  в слое толщиной несколько метров возникает реверс электродного эффекта, что свидетельствует о преобладании отрицательного объемного заряда, создаваемого тяжелыми ионами, над положительным объемным зарядом, обусловленным аэроионами. При этом основной вклад в величину объемного заряда вносит одно- и двукратно заряженные тяжелые ионы, образовавшиеся за счет воссоединения аэрозольных частиц с аэроионами.

4. В случае сильного турбулентного перемешивания исходная система ионизационно-рекомбинационных уравнений электродного эффекта расщепляется на систему линейных по электрическому полю уравнений и в нулевом приближении концентрация аэроионов не зависит от напряженности электрического поля, а определяется только турбулентным обменом, процессами

ионизации и рекомбинации. В приближении сильного турбулентного перемешивания распределение аэроионов по высоте, определяется масштабом  $l_m$ , который представляет расстояние, проходимое ионом за счет турбулентной диффузии за время своей жизни. Распределение напряженности электрического поля с высотой определяется изменением электрической проводимости с высотой и характерным масштабом  $L_m$ . Физически масштаб  $L_m$  представляет толщину турбулентного электродного слоя.

В стратифицированном приземном слое напряженность электрического поля убывает от некоторого значения у поверхности земли до асимптотического значения на верхней границе электродного слоя. При переходе от нейтральной к неустойчивой стратификации масштаб распределения электрических характеристик увеличивается. Значение электрического потенциала на фиксированной высоте с увеличением масштаба уменьшается. Плотность электрического заряда резко возрастает вблизи поверхности, а затем убывает. Наиболее резкие изменения плотности электрического заряда получены при термически неустойчивой стратификации приземного слоя. Для нейтральной стратификации приземного слоя изменение концентрации аэроионов и электрической проводимости с высотой до небольших высот имеет логарифмический характер.

Присутствие аэрозольных частиц в сильнотурбулентном приземном слое уменьшает характерный масштаб распределения аэроионов и увеличивает толщину электродного слоя, а усиление степени ионизации воздуха приводит к ее уменьшению. Распределения электрических характеристик в присутствии аэрозольных частиц характеризуются уменьшением начального значения напряженности электрического поля и увеличением плотности электрического заряда.

5. Исследованы глобальные и локальные вариации электрического поля в высокогорной и высокоширотной зонах по данным синхронных измерений на станциях: Пик Чегет (3040 м), Шаджатмаз (2100 м) и Нижний Архыз (2100 м), на трех станциях Кольского полуострова: Верхнетуломский, Ловозеро, Апатиты, а также на горе Ай-Петри (2300 м). Наиболее устойчивой особенностью суточных вариаций на высокогорных станциях, расположенных выше 2000 м, является утренний минимум (01 - 04 UT) и вечерний максимум (16 - 22 UT). От месяца к месяцу и от станции к станции изменяются лишь относительные величины этих минимумов и максимумов. С уменьшением высоты станции наблюдения эта закономерность суточного хода электрического поля исчезает. Подобие суточных вариаций электрического поля в высокогорных условиях кривой Карнеги доказывает, что устойчивая закономерность суточного хода электрического поля обусловлена глобальной унитарной вариацией ионосферного потенциала.

Одинаковые суточно-сезонные вариации электрического поля в высокогорной и высокоширотной зонах и возможность выделения короткопериодических сигналов глобального характера на фоне локальных возмущений позволяют рекомендовать пункты наблюдения, расположенные

в этих районах, для создания сети глобального мониторинга в электрического слоя атмосферы.

Разработана нестационарная модель классического электродного эффекта. Проведенные численные расчеты показывают, что с течением времени толщина электродного слоя возрастает, при этом на высоте 0,5-1 м значения электродного эффекта меняются незначительно. Концентрации положительных и отрицательных аэроионов вблизи поверхности земли уменьшается в течение первых 5 минут, а затем становится практически постоянной. Плотность объемного заряда значительно меняется первые 3 минуты, а затем практически постоянна. Проведенные численные эксперименты позволяют сделать вывод, что время установления стационарного режима в классическом электродном слое составляет примерно 300 с. В нестационарном электродном слое при невысокой степени ионизации воздуха, но малых электрических полях (до 30 В/м), как и в стационарном случае, объемный заряд на высоте 0,5 - 2 м имеет отрицательный знак. При увеличении электрического поля знак объемного заряда становится положительным.

Разработана модель нестационарного турбулентного электродного эффекта в атмосфере. Время установления стационарного режима в турбулентном электродном слое составляет примерно 15 мин. Вариации плотности электрического тока определяются нестационарностью электрических полей выше приземного слоя, т.е. обуславливаются вариациями потенциала ионосферы. Электрическое поле в приземном слое «подстраивается» к изменениям плотности электрического тока. Решена задача об установлении периодических вариаций электрического поля в турбулентном приземном слое, вызванных колебаниями плотности тока. Получено, что масштаб распределения электрического поля вблизи поверхности земли уменьшается по сравнению со стационарным случаем. Уменьшается амплитуда электрического поля, проникающего сверху в приземный слой. При этом существует сдвиг фазы колебаний электрического поля по отношению к колебаниям плотности электрического тока.

6. Разработан комплекс, включающий в себя измерители градиента потенциала электрического поля, полярных, проводимостей воздуха и плотности вертикального тока. Исследованы вариации атмосферно - электрических элементов на высокогорных станциях в Приэльбрусье. Общей закономерностью суточного хода электрического поля являются утренний минимум (01 - 04 UT), дневной (08 - 12 UT) и вечерний (19- 21 UT) максимумы. Установлена связь вариаций электрического поля и плотности тока в высокогорных условиях с элементами глобальной унитарной вариацией потенциала ионосферы.

Выявлены локальные вариации электрического поля, обусловленные турбулентным и конвективным генераторами, действующими в приземном слое атмосферы. Показано, что причиной локальных вариаций электрического поля является объемный заряд, создаваемый легкими ионами в приземном слое атмосферы, который играет существенную роль в летние

месяцы. Разработан новый прибор и получены данные об интенсивности ионообразования в атмосфере в различных пунктах наблюдений. Экспериментально и теоретически исследован коэффициент редукции электрического поля. Установлена связь его значений с величиной измеряемого поля, как следствие действия электродного эффекта в приземном слое атмосферы.

На основании полученных в диссертационной работе результатов можно сформулировать **основные положения и выводы:**

- Электрическая структура приземного слоя формируется действием электродного эффекта в атмосфере. Теоретически электродный эффект описывается замкнутой системой электродинамических уравнений.

- Определены критерии применимости моделей электродного эффекта в зависимости от физических условий в атмосфере для исследования электрического состояния приземного слоя.

- Установлены зависимости распределений электрических характеристик в приземном слое от метеорологических факторов, степени ионизации воздуха и концентрации аэрозольных частиц в атмосфере. Показана необходимость учета указанных факторов при проведении и анализе данных наземных атмосферно-электрических наблюдений.

- Установлено, что локальные возмущения электрического поля в условиях «хорошей погоды» обусловлены объемным зарядом в приземном слое вследствие электродного эффекта.

- Нестационарные электрические процессы вблизи поверхности земли обусловлены совместным действием, как глобальных генераторов вне приземного слоя, так и локальных генераторов в нем.

- Анализ результатов экспериментальных исследований атмосферного электричества приземного слоя показывает целесообразность осуществления глобального мониторинга электрического поля атмосферы в высокогорных условиях.

Диссертационная работа является законченным научным исследованием электрических процессов в приземном слое атмосферы. Совокупность выполненных теоретических и экспериментальных исследований является *новым научным достижением в области атмосферного электричества и вносит существенный вклад в развитие нового научного направления: электродинамика приземного слоя атмосферы*

**Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

1. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Монография, Таганрог: Изд-во ТРТУ. 1998. 123 с.
2. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе. Монография, Таганрог: Изд-во ТРТУ. 2004. 137 с.
3. Куповых Г.В. Взаимодействие аэрозольных частиц с аэроионами в приземном слое // Сб. научных трудов 9-й международной конференции «Математические модели физических процессов». Таганрог: Изд-во ТГПИ. 2003. С. 73 - 76.

4. Куповых Г.В. Возникновение отрицательного объемного заряда вблизи поверхности земли в высокогорных условиях // Труды ВГИ.С.-Пб.: Гидрометеоздат. 1996, Вып 89. С. 73 - 80.
5. Куповых Г.В. Измерения интенсивности ионообразования в приземном слое атмосферы // Известия высших учебных заведений, Сев.-Кав. рег., Естест. науки.2004, №1. С. 40 - 42.
6. Куповых Г.В. Параметрический подход к моделированию электричества приземного слоя // Сб. научных трудов 9-й международной конференции «Математические модели физических процессов». Таганрог: Изд-во ТГПИ. 2003. С. 76-79.
7. Куповых Г.В. Теория электродного эффекта применительно к приземному слою атмосферы // <http://www.laboratory.ru>. 2003.
8. Куповых Г.В. Устройство для измерения интенсивности ионообразования в атмосфере // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. рег., Естест. науки.2003, Приложение №9. С. 34 - 37.
9. Куповых Г. В. Электрический объемный заряд в приземном слое// Известия ТРТУ. 1998 , №3 С. 202 - 205.
10. Куповых Г.В. Электричество приземного слоя // Известия высших учебных заведений, Сев.-Кав. рег., Естест. науки. 1995, №4. С. 32 - 34.
11. Куповых Г.В. Электрические характеристики приземного слоя в случае сильного турбулентного перемешивания// Сб. научных трудов 9-й международной конференции «Математические модели физических процессов». Таганрог: Изд-во ТГПИ. 2003. С. 70 - 72.
12. Куповых Г.В. Электродный эффект в сильном электрическом поле // Сб. научных трудов 10-й международной конференции «Математические модели физических процессов». Таганрог: Изд-во ТГПИ. 2004. С. 124 - 127.
13. Куповых Г.В. Моделирование влияния загрязнений на электрические характеристики приземного слоя атмосферы // Известия ТРТУ.2004, №5. С. 259-262
14. Kupovykh G.V. Global variations of ionospheric potential in surface layer // Proc 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Atmosph. Electr. Alabama. 1999. P. 555 - 558.
15. Kupovykh G.V. Negative space charge in surface layer // Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Atmosph. Electr., Osaka. 1996. P. 164 - 167.
16. Куповых Г.В., Морозов В.Н Классический (нетурбулентный) электродный эффект в приземном слое // Известия высших учебных заведений. Сев.- Кав. регион. Естеств. науки. 2003, №2. С. 43 - 46.
17. Куповых Г.В., Морозов В.Н. Нестационарные электрические процессы в приземном слое атмосферы // Известия высших учебных заведений. Сев.- Кав. регион. Естеств. науки.2001, №4.С. 82-85.
18. Куповых Г.В., Морозов В.Н. Структура электродного слоя вблизи поверхности земли в приближении сильного турбулентного перемешивания // Известия высших учебных заведений. Сев.- Кав. регион. Естественные науки. 2003. №4. С. 44 - 48.

19. Куповых Г.В., Морозов В.Н Турбулентный электродный эффект в приземном слое // Известия высших учебных заведений. Сев.- Кав. регион. Естеств. науки. 2003, Приложение №3. С. 55 - 62.
20. Куповых Г.В., Морозов В.Н Электродный эффект в приближении сильного турбулентного перемешивания // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естеств.науки. 2003. №3. С. 51 - 53.
21. Куповых Г.В., Морозов В.Н Электродный эффект в приземном слое атмосферы (постановка задачи) // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естеств. науки. 2003, Приложение №1. С. 38 - 40.
22. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М 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.
23. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Modeling of the electrode effect in surface layer // Proc. 9 th Int. Conf. on Atmosph. Electr. St.Petersburg, 1992. V.2. P. 615 - 618.
24. Kupovykh G., Morozov V, Shvartz Ya. Electrode Effect under Alpine Conditions Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Atmosph. Electr.,Versailles,2003, P. 421 - 424
25. Kupovykh G.V., Sukhinov A.I., Marchenko A.G., Klovo A.G. 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).Elseiver. 2004. P. 315 - 318.
26. Куповых Г.В., Аджиев А.Х. Особенности электрической структуры приземного слоя в высокогорной зоне // Труды ВГИ, вып.91, С.-Пб.: Гидрометеоиздат. 2002. С. 100 - 102.
27. Куповых Г.В., Болдырев А.С., Литвинова И.С, Марченко А.Г. О связи электрического поля с объемным зарядом в приземном слое атмосферы // Известия, высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естеств. науки.2003, Приложение №3. С. 42 - 45.
28. Куповых Г.В., Болдырев А.С., 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.
29. Куповых Г.В., Клово А.Г. Моделирование электрического состояния приземного слоя // Материалы Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование в научных исследованиях», Ставрополь. 2000. С. 60 - 64.
30. Куповых Г.В., Клово А.Г., Морозов В.Н., Петров А.И., Петрова Г.Г. Моделирование распределения объемного заряда в турбулентном приземном слое // Сб. научных трудов 8-й международной конференции «Математические модели физических процессов и их свойства».Таганрог: Изд-во ТГПИ. 2002. С. 119 - 124.
31. Куповых Г.В., Марченко А.Г. Автоматизированный комплекс для проведения атмосферно-электрических наблюдений // Известия ТРТУ, 2004, № 1. С. 203 - 204

32. 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.
33. Аджиев А.Х., Вакалов И.А., Ваюшина Г.П., Куповых Г.В. и др. Исследование атмосферного электричества на горной станции "Пик Чегет" // Труды ВГИ, М.: Гидрометеиздат. 1991, Вып. 83. С. 87 – 91.
34. Аджиев А.Х., Ваюшина Г.П., Куповых Г.В., Соколенко Л.Г., Шварц ЯМ. Экспериментальные исследования атмосферного электричества в высокогорных условиях // Сб. научных трудов 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир: Изд-во ВлГУ. 2003, Т.1. С. 106 — 109.
35. Болдырев А.С., Куповых Г.В., Литвинова И.А., Марченко А.Г. Вариации электрического поля в приземном слое // Сб. научных трудов 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир: Изд-во ВлГУ. 2003г, Т.1. С. 104-106.
36. Ваюшина Г.П., Куповых Г.В., Мартынов А.А., Соколенко Л.Г. и др. Результаты наблюдений за атмосферным электричеством на горной станции пик Чегет в Приэльбрусье // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1995. вып.545. С. 36-46.
37. Ерохин В.Н., Канаев А.С., Куповых Г.В. и пр. Анализ результатов синхронных измерений  $E$  в Приэльбрусье и на Кольском полуострове // Результаты исследований по международным геофизическим проектам. Магнитосферные исследования.- М. 1990, № 15. С. 44 - 47.
38. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Влияние турбулентности и аэрозоля на распределение электрических параметров в приземном слое атмосферы // Труды ВГИ. // М.: Гидрометеиздат, Вып. 77. 1989. С. 15 - 21.
39. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Моделирование электрического состояния приземного слоя в приближении сильного турбулентного перемешивания // Сб. научных трудов 8-й международной конференции «Математические модели физических процессов и их свойства»Лаганрог: Изд-во ТГПИ. 2002. С. 124 - 128.
40. Морозов В.Н., Куповых Г.В., Клово А.Г. Нестационарный электродный эффект в атмосфере // Материалы Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, Нальчик 2001, М.:Гидрометеиздат. 2003.С. 127 - 130.
41. Морозов В.Н., Куповых Г.В., Клово А.Г. Электродный эффект в атмосфере // Сб.научных трудов 8-й международной конференции «Математические модели физических процессов и их свойства».Таганрог: Изд-во ТГПИ.2002. С. 111 - 115.
42. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Клово А.Г. Электропроводность воздуха и концентрация радона в приземном слое // Сб. научных трудов 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир: Изд-во ВлГУ. 2003, Т.1. С. 124 - 127.
43. Калинина М.В, Куповых Г.В, Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н. Радиоактивность и ионизация воздуха в приземном слое атмосферы // Известия ТРТУ. 2004, №, 5. С. 175 - 179.
44. 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 10-й международной конференции «Математические модели физических процессов». Таганрог: Изд-во ТГПИ. 2004. С. 127 - 132.
45. Измеритель интенсивности ионообразования (патент РФ) / Г.В. Куповых, А.А. Мартынов, Я.М. Шварц, Х.-М.Х. Байсиев. Бюл. №24 4840115/25. 1994.
  46. Куповых Г.В., Мартынов А.А. Наблюдения за атмосферным электричеством на высокогорной станции «пик Чегет» // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству, Нальчик, 1990. С.57.
  47. Куповых Г.В., Морозов В.Н. К вопросу о моделировании электрического состояния атмосферы в горных районах // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству, Нальчик 1990. С.46.
  48. 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.
  49. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Влияние метеорологических процессов на распределение напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Методы и средства дистанционного зондирования атмосферы в интересах авиации». Киев. 1991 С. 94 - 95.

Личный вклад соискателя по перечисленным работам может быть охарактеризован следующим образом

- работы 1 - 2 выполнены на паритетной основе;
- работы 3 - 15 выполнены без соавторов;
- в работах 16 - 26, 38 - 41, 47 - 49 постановки задач выполнены совместно, расчеты и анализ результатов принадлежит соискателю;
- в работах 27 - 37, 42 - 46 экспериментальная часть выполнена совместно, анализ результатов принадлежит соискателю.

25,00

Подписано к печати 11.01.05 г.  
Бумага офсетная  
Усл. п. л. - 2.2.  
Тираж 100 экз.

Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Печать офсетная  
Уч.-изд. л. - 2.3  
Заказ № 290.

«С»

Издательство Таганрогского государственного  
радиотехнического университета, ГСП - 17А,  
Таганрог-28, Некрасовский пер. 44  
Типография Таганрогского государственного  
радиотехнического университета ГСП-17А,  
Таганрог-28, Энгельса, 1

22 MAR 2005

