

*на правах рукописи*

**Петрова Галина Григорьевна**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НИЖНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ**

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени кандидата**  
**физико-математических наук**

Ростов-на-Дону  
2004

Работа выполнена на кафедре общей и экспериментальной физики Ростовского государственного педагогического университета.

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук  
**Куповых Геннадий Владимирович**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
**Хучунаев Бузигит Муссаевич**  
кандидат физико-математических наук  
**Богаченко Евгений Моисеевич**

**Ведущая организация:** Научно - исследовательский центр  
дистанционного зондирования  
атмосферы, г.Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 28 декабря 2004 г. в 15 час. на заседании диссертационного совета Д.327.001.01 при Высокотгорном геофизическом институте по адресу: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Высокотгорного геофизического института.

Автореферат разослан 15 ноября 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор географических наук



**Разумов В.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современный интерес к изучению атмосферно-электрических характеристик вызван как фундаментальными проблемами физики Земли, так и практическими задачами, связанными с экологией человека и с необходимостью успешной эксплуатации современных средств техники в среде с определенными электрическими параметрами и при наличии такого опасного для современной техногенной цивилизации явления, как гроза.

Накопленные за многие десятки лет к настоящему моменту на сети пунктов атмосферно-электрических измерений и в экспедициях результаты наблюдений свидетельствуют о значительной региональной изменчивости всех характеристик атмосферного электричества и региональных особенностях протекания электрических процессов в атмосфере. Это естественным образом связано с особенностями климата, широтного районирования региона, характера и состояния подстилающей поверхности и орографии местности. Все эти факторы определяют физико-географические особенности метеорологических процессов и состояний атмосферы в регионе, что, в свою очередь, обуславливает особенности атмосферно-электрических процессов, поскольку электрические процессы являются неотъемлемой частью метеорологических. Знание типичных особенностей атмосферного электричества в разных регионах Земли должно способствовать более успешному решению как фундаментальных научных проблем глобального характера, так и частных прикладных задач, связанных с проявлениями электричества атмосферы.

Особенностью нижних слоев атмосферы является значительная вертикальная изменчивость ее характеристик, в том числе электрических. Распределение электрических характеристик приземного слоя по вертикали недостаточно исследовано в экспериментальном плане. Определение масштабов изменчивости электрических величин, исследование обуславливающих ее факторов, в частности, влияния физических свойств подстилающей поверхности, может способствовать уточнению рекомендаций по постановке длительных измерений в пунктах с разными физическими характеристиками подстилающей поверхности, что крайне важно для развития атмосферно-электрической науки. Прежде всего, это касается выработки рекомендаций по высоте установки первичных преобразователей атмосферно-электрических измерителей на сети пунктов Росгидромета, которую планируется расширить за счет постановки измерений в пунктах, менее подверженных местным загрязнениям атмосферного воздуха. При решении вопроса о размещении атмосферно-электрических датчиков особое внимание потребуется уделить такому фактору, как содержание радона в почвенном газе,

исследованию условий эманирования почвы и распространения радона в приземном слое по вертикали.

**Цель работы.** Экспериментальное исследование электрического состояния приземного слоя атмосферы, физики процессов, протекающих в ее электродном слое, и активности грозовых процессов и выявление региональных особенностей атмосферного электричества.

Для реализации поставленной в работе цели необходимо было решить следующие **задачи исследования:**

1. Организация и проведение комплексных экспедиций по изучению физики электрических процессов в приземном слое атмосферы в различных физико-географических условиях (пункты Ростовской области, Прибайкалье).

2. Нахождение на основе многолетнего экспериментального материала эмпирических связей между атмосферно-электрическими характеристиками и физическими параметрами приземного слоя для оценки влияния разных факторов на электрическое состояние слоя.

3. Исследование пространственно-временных закономерностей поведения электрических характеристик электродного слоя в различных условиях.

4. Организация и проведение сбора инструментальных данных о грозовой активности в разных пунктах Ростовской области.

5. Сравнительный анализ инструментальных данных о грозах с данными стандартных наблюдений метеорологической сети, установление связей между параметрами грозовой активности применительно к Ростовской области.

### **Научная новизна работы.**

1. Проведено комплексное многолетнее исследование пространственно-временных закономерностей атмосферно-электрических характеристик приземного слоя в 6 пунктах Ростовской области и на берегу озера Байкал, в результате чего получены новые экспериментальные данные об электрической структуре приземного слоя, позволившие выявить особую роль радона в формировании этой структуры.

2. Получены экспериментальные данные о содержании радона-222 в приземном слое атмосферы и верхнем слое почвы на территории Ростовской области. Введен высотный индекс электропроводности, позволяющий оценивать концентрацию радона-222 в приповерхностном слое почвы по атмосферно-электрическим измерениям.

3. На основании комплексных экспериментальных данных показано формирование особенностей электрической структуры электродного слоя атмосферы в пункте наблюдений под влиянием совокупности значимых факторов: эманирование подстилающей поверхности, условия

перемешивания, содержание аэрозолей в атмосфере. Выявлено, что региональные особенности атмосферно-электрических процессов в приземном слое в значительной мере определяются местными особенностями вышеуказанных факторов.

4. Впервые для территории Ростовской области проведены инструментальные наблюдения грозовой активности, что позволило рассчитать коэффициент грозопоражаемости для районов Ростовской области. По данным непрерывной регистрации гроз в г. Ростове-на-Дону исследованы параметры отдельных гроз. На основании этих исследований предложена типизация гроз, наблюдаемых в Ростовской области.

#### **Практическая значимость результатов работы.**

Полученные в диссертации данные использованы:

– в тематических отчетах отдела радиологии Центра государственного санитарно-эпидемиологического надзора в Ростовской области (ЦГСЭН РО), в работе отдела для радиологического мониторинга приземного слоя атмосферы и выявления территорий, представляющих интерес для служб ЦГСЭН в плане их потенциальной радоноопасности;

– кафедрой общей и экспериментальной физики при разработке спецкурса “Физические основы метеорологии”, который предлагается студентам отделения физики института физики, математики, информатики, естествознания и технологий (ИФМИЕТ) РГПУ; для работы со студентами научно-исследовательского кружка при лаборатории геофизических исследований ИФМИЕТ в плане экологического воспитания;

– при формировании региональной составляющей учебных программ курса “Физика атмосферы” в Ростовском филиале Российского государственного гидрометеорологического университета;

– Центром математического моделирования экологических систем (ЦММЭС) ТРТУ для создания математических моделей физических процессов в приземном слое атмосферы вблизи акватории Азовского моря.

Полученные в диссертации данные могут быть использованы:

– для оценки региональных атмосферно-электрических параметров и при расчетах с использованием полученных в работе эмпирических соотношений;

– для построения моделей глобальной атмосферно-электрической цепи и электродного слоя атмосферы;

– для разработки методик наземных атмосферно-электрических измерений;

– в энергетике при расчете грозопоражаемости территории Ростовской области;

- в геологии для совершенствования методов поиска полезных ископаемых, основанных на данных об ионизации атмосферы и содержании в ней радона;
- в экологии для совершенствования методов мониторинга интегрального загрязнения приземного слоя атмосферы с помощью атмосферно-электрических наблюдений;
- в образовании при разработке программ преподавания учебных дисциплин в цикле наук о Земле;
- в экологическом воспитании при организации работы научно-исследовательских кружков в школах и вузах.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

На защиту выносятся следующие положения и научные результаты:

1. Экспериментальные данные об электрической структуре приземного слоя; ее региональные особенности как следствие проявления связи электрических характеристик с ионизацией воздуха, метеорологическими параметрами и степенью загрязнения атмосферы в регионе.
2. Экспериментальные данные о содержании радона-222 в приземном слое атмосферы и почвенном газе, позволившие в совокупности с атмосферно-электрическими данными выделить особую роль радона-222 в формировании структуры электродного слоя атмосферы.
3. Инструментальные данные о грозовой активности в Ростовской области.

### **Апробация результатов работы.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на II, III и IV Всесоюзных симпозиумах по атмосферному электричеству (Ленинград, 1982; Тарту, 1986; Нальчик, 1990), IX, X, XI и XII Международных конференциях по атмосферному электричеству (С.-Петербург, 1992; Осака, Япония, 1996; Алабама, США, 1999; Версаль, Франция, 2003), VIII Международной конференции “Математические модели физических процессов и их свойства” (Таганрог, 2002), V Российской конференции по атмосферному электричеству (Владимир, 2003), VII Всероссийской конференции молодых ученых “Малые примеси, атмосферное электричество и динамические процессы в атмосфере” (Н.Новгород, 2003), Третьей Международной научно-технической конференции “Экология 2004 – море и человек” (Таганрог, 2004), научных семинарах отдела атмосферного электричества ГГО им.А.И.Воейкова (Ленинград, 1985-1987), кафедры физики РИСИ (Ростов-на-Дону, 1985), лаборатории электричества атмосферы ТГУ (Тарту, 1987), кафедры метеорологии ИГУ (Иркутск, 1990), кафедры физики ТРТУ (г.Таганрог,

2000-2003, кафедры общей и экспериментальной физики РГПУ (Ростов-на-Дону, 1993-2003).

#### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 19 работ, список которых приведен в конце автореферата.

#### **Личный вклад автора.**

Данная диссертационная работа выполнена в лаборатории геофизических исследований кафедры общей и экспериментальной физики РГПУ (руководитель А.И. Петров) под методическим руководством сотрудников отдела атмосферного электричества ГГО им. А.И. Воейкова (Санкт-Петербург) проф. И.М. Имянитова, Т.В. Лободина, В.Н. Морозова, Я.М. Шварца и др.

Экспериментальные материалы по электричеству приземного слоя получены автором совместно с И.Н. Панчишкиной, Т.В. Кудринской и коллективом студентов - участников многолетних ежегодных геофизических экспедиций кафедры общей и экспериментальной физики РГПУ - под руководством А.И. Петрова.

Все основные результаты диссертации получены лично автором под руководством научного руководителя. Постановка задачи исследований и обсуждение их результатов осуществлялись совместно с научным руководителем Г.В. Куповых и руководителем лаборатории геофизических исследований А.И. Петровым. Анализ полученных данных, планирование эксперимента, подготовка публикаций по электричеству приземного слоя осуществлялись также в сотрудничестве с А.И. Петровым и И.Н. Панчишкиной - постоянными соавторами научных публикаций по теме диссертации.

#### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложена на 235 страницах печатного текста, включая 54 рисунка, 20 таблиц и список используемой литературы из 188 наименований.

*Работа выполнена при поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF, проект REC004) и гранта Президента РФ "Поддержка ведущих научных школ Российской Федерации" НШ – 1793.2003.5 (научные руководители Г.Г. Щукин, А.Х. Аджиев)*

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи работы, перечислены положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об их апробации, о публикациях, объеме и структуре работы.

**Первая глава** диссертации носит обзорный характер и посвящена рассмотрению этапов развития, современного состояния и проблем исследования электрических свойств приземного слоя атмосферы. Глава разбита на 4 раздела. В разделе 1.1 обсуждаются общие проблемы атмосферного электричества и роль исследований электрических свойств приземного слоя атмосферы в решении этих проблем. Констатируется, что интерес к электрическим свойствам приземного или, так называемого, электродного слоя, помимо естественного стремления исследователей понять физику процессов, протекающих в нем, стимулируется желанием отслеживать глобальные атмосферно-электрические вариации, используя данные наземных наблюдений, что возможно при отсутствии в атмосфере локальных генераторов тока. Методические проблемы, вызванные поиском возможностей использования измеряемых у поверхности земли величин  $E$  и  $\lambda$  для решения глобальных задач, обсуждаются в известном обзоре Колоколова и Шварца (1976). Авторы обзора рекомендуют, во-первых, создавать замкнутую систему измерений:  $E$ ,  $\lambda$  и  $i$ , - во-вторых, использовать численные критерии классификации и отбраковки данных, в частности, критерий Долезалека  $\Omega$  (1960).

В разделе 1.2 обсуждаются основные физические факторы, определяющие электрическое состояние приземного слоя. В разделе представлен обзор работ, где показана определяющая роль для электричества приземного слоя естественной радиоактивности атмосферы, устойчивости атмосферы и интенсивности ее турбулентного перемешивания, обсуждаются экологические аспекты влияния аэрозольного загрязнения на электрические характеристики приземного слоя атмосферы, указывается на взаимозависимости атмосферно-электрических характеристик, в частности, отмечается влияние электрического поля на полярные электропроводности атмосферы вблизи земной поверхности.

Раздел 1.3 посвящен обзору теоретических исследований электродного эффекта в атмосфере вблизи земной поверхности. Отмечается, что современное состояние теории электродного эффекта подробно изложено в работах Мареева (1994,1999,2000,2003), Морозова (1984,1986,1991,2003), Морозова и Куповых (1989,1992), а так же в известной монографии Куповых, Морозова и Шварца (1998). В указанной монографии рассматривается система уравнений для описания электродного слоя:

$$\frac{\partial n_{\pm}^i}{\partial t} + \text{div}(n_{\pm}^i \vec{V}) + \text{div}(n_{\pm}^i b_{\pm}^i \vec{E}) - \text{div} \bar{D}_{\pm}^i \text{grad} n_{\pm}^i = v_{\pm}^i(r) - \alpha_{\pm}^i n_{+}^i n_{-}^i + K_{\pm}^i$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{j} = 0$$

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$



$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= 0 \\ \vec{j} &= \lambda \vec{E} + \rho \vec{V} - D_T \nabla \rho + \sum_s \vec{j}_s \\ \lambda &= \sum_i (e_+^i b_+^i n_+^i + e_-^i b_-^i n_-^i) = \lambda_+ + \lambda_- \end{aligned}$$

Здесь  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума,  $n_{\pm}^i$  - объемная концентрация ионов  $i$ -той группы,  $b_{\pm}^i$  - их подвижность,  $\vec{v}$  - гидродинамическая скорость,  $\bar{D}_{\pm}^i = D_{\pm}^i + D_T$  - коэффициент диффузии,  $D_{\pm}^i$  - коэффициент молекулярной диффузии,  $D_T$  - коэффициент турбулентной диффузии,  $K_{\pm}^i$  - член, описывающий взаимодействие ионов с ионами других групп и с аэрозольными частицами,  $\nu_{\pm}^i$  - интенсивность ионообразования ионов  $i$ -той группы,  $\alpha_{\pm}^i$  - коэффициенты рекомбинации ионов,  $\rho$  - плотность объемного заряда,  $j$  - плотность электрического тока,  $j_s$  - плотность тока, создаваемого  $i$ -тым источником. Указывается, что из-за математических трудностей задача об электродном эффекте в атмосфере в общем виде не решается. Рассматриваются частные случаи решения задачи: классический (нетурбулентный) электродный эффект, нетурбулентный электродный эффект с учетом аэрозолей, турбулентный электродный эффект и случай сильного турбулентного перемешивания. Известны примеры аналитического решения задачи об электродном эффекте и примеры применения численного моделирования к описанию электрического состояния приземного слоя атмосферы (помимо указанных выше работ следует отметить труды Noppel (1967,1969,1971), Willet (1978,1983), Tuomi (1982) и др.).

Сложность математического описания электрических свойств приземного слоя атмосферы делает особенно важным экспериментальное изучение электродного слоя. В разделе 1.4 дан обзор экспериментальных исследований электрической структуры приземного слоя атмосферы. Показано развитие представлений о предмете исследований на протяжении длительного периода и рассмотрено их современное состояние: от работ Watson (1929), Scrase (1935), Hogg (1939) до исследований Nolan (1940), O'Donnel (1952) и выполненных в 60-е годы основополагающих работ Dolezalek (1960), Law (1963), Crozier (1965), Higazi and Chalmers (1966) и др., ознаменовавших поворотный этап в экспериментальных исследованиях электрической структуры приземного слоя.

Успешное развитие теоретических исследований в этот период, связанное с применением численных методов решения задачи об электродном эффекте, обусловило выявление значимых для электрического состояния приземного слоя факторов: интенсивность ионообразования и ее пространственное распределение, интенсивность турбулентного перемешивания, пропадание легких ионов при их контакте

с поверхностями твердых тел, в частности, аэрозолей. Поэтому, начиная с 70-х годов прошлого века, экспериментальные исследования носят более целенаправленный, системный характер. Так, работа Aspinall (1972) полностью посвящена исследованию процесса механического переноса ионов вблизи земли, вклад которого в обмен зарядами между землей и атмосферой долгое время считался пренебрежимо малым. Исследования Israelsson (1978) показывают роль естественной радиоактивности для электрического состояния приземного слоя и необходимость учета метеорологических параметров, в частности, устойчивости атмосферы при анализе и интерпретации атмосферно-электрических данных. В работах Анисимова и др. (1999,2000,2001,2003) обнаружены аэроэлектрические структуры в приземном слое атмосферы, изучаются их пространственно-временные закономерности. Систематически на протяжении последних десятилетий исследуется электродный слой в экспериментальных работах Петрова и др. (1984,1988,1990,1996,1999,2003,2004): атмосферно-электрические измерения, образующие замкнутую систему, производятся на нескольких уровнях в различных физико-географических условиях и сопровождаются градиентными метеорологическими наблюдениями и измерениями концентрации радона-222.

Во **второй главе** представлены результаты исследований атмосферно-электрических характеристик приземного слоя по данным измерений в Ростовской области и в Прибайкалье.

Раздел 2.1 посвящен методам измерений и обработки их результатов. Существенной чертой этих многолетних измерений является то, что все они выполнены посредством одного и того же измерительного комплекса. Это делает результаты измерений более надёжными с точки зрения сопоставимости данных, полученных в разные периоды и в разных пунктах наблюдений.

Измерительный комплекс включает в себя одновременные измерения полярных удельных электрических проводимостей атмосферы (в дальнейшем называемых полярными электропроводностями атмосферы) и характеристик атмосферного электрического поля в слое 0-3 метра, плотностей вертикального полного и механического токов из атмосферы на землю, а также градиентные измерения температуры и влажности воздуха и скорости ветра в изучаемом слое. В экспедициях, проводившихся в Ростовской области, измерялась концентрация радона-222 в почвенном газе и в атмосфере.

Целый ряд характеристик атмосферы, рассматривающихся в работе и привлекающихся к анализу, получены расчетным путем: плотность объемного заряда легких ионов по данным о полярных электропроводностях и средняя плотность полного объемного заряда для двух областей исследуемого слоя по данным о потенциалах, градиенты

потенциала атмосферы для трех слоев (Имянитов, 1957), коэффициент турбулентности по методам Будыко и Орленко.

Измерение полярных электропроводностей осуществлялось на 6 уровнях аспирационным измерителем электрической проводимости воздуха конструкции профессора Литвинова, работающим по методу разряда. Метод этот хорошо известен и описан (Имянитов, 1957; Качурин, 1955). Методики измерений и обработки материала отработаны десятилетиями. Измерения напряженности поля на уровне земли выполнялись электростатическим флюксометром системы ГГО “Поле-2”. Измерения потенциала атмосферы осуществлялись на высотах 1, 2, 3 метра методом радиоактивного коллектора, в качестве которого использовался иониевый  $\alpha$ -излучатель (Имянитов, 1957). Концентрация радона-222 измерялась на 5 высотах в слое до 2 м датчиком типа “Alpha-guard”. Метеорологические характеристики определялись общепринятыми для метеонаблюдений приборами и методами. Наблюдения велись преимущественно в летние месяцы круглосуточно непрерывно в течение 10-20 дней. Данные всех приборов и установок осреднялись за час, измерение профилей электропроводности и концентрации радона длилось почти 2 часа. Для каждого из пунктов наблюдений получены ряды данных, насчитывающие сотни часов. В работе приводится описание измерительных площадок во всех пунктах наблюдений.

В разделе 2.2 обсуждаются результаты статистической обработки данных измерений. Приведен сравнительный анализ статистических характеристик массивов данных о полярных электропроводностях и концентрации радона, о характеристиках электрического поля атмосферы и плотности объемного заряда на разных высотах. Статистический анализ массивов данных показывает, что эмпирические распределения рассматриваемых атмосферно-электрических характеристик близки к нормальному. Физико-статистический анализ атмосферно-электрических параметров в различных пунктах наблюдений показывает их значительную пространственно-временную изменчивость. Коэффициенты вариации величин за период наблюдений в большинстве своем лежат в пределах 50-150 %. Вариабельность электропроводности выше в пунктах с высокой радиоактивностью почвы и атмосферы, градиента потенциала – в условиях повышенного аэрозольного загрязнения.

В разделе 2.3 рассматриваются основные физические параметры и взаимосвязи, определяющие атмосферно-электрические характеристики приземного слоя.

В первой части раздела 2.3 изложены результаты исследования зависимости полярных электропроводностей атмосферы от концентрации в ней радона-222. В разделе сообщается, что по результатам наших исследований, одним из важнейших факторов, влияющих на электричество приземного слоя, является содержание в атмосфере радона-222. Особенно

тесную взаимосвязь с концентрацией радона обнаруживают полярные электропроводности атмосферы. Их величина напрямую зависит от концентрации ионов в воздухе, а значит и от ионообразующих факторов, основными из которых вблизи поверхности земли являются радиоактивность почвы и атмосферы и космические лучи. Радиоактивные эманации среди ионизаторов приземного слоя атмосферы играют особую роль. В ходе исследований обнаружено, что полярные электропроводности положительно коррелируют с концентрацией радона-222. Получены статистически достоверные коэффициенты корреляционных отношений этих величин: 0,70 на высоте 0,05 м и 0,45 – на высоте 2 метра. Методами математической статистики показано наличие линейной регрессии квадратов полярных электропроводностей по концентрации радона-222.

После преобразования уравнений регрессии квадратов полярных электропроводностей по концентрации радона-222, получены уравнения, аппроксимирующие связь полярных электропроводностей с концентрацией радона. Если удельная электрическая проводимость  $\lambda$  измеряется в фСм/м, а концентрация радона – в Бк/м<sup>3</sup>, то уравнения выглядят следующим образом:

$$\text{для высоты 0,05 м: } \lambda_{-} = (1,01Rn + 5,4)^{1/2} \quad (1)$$

$$\lambda_{+} = (1,50Rn + 10,0)^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{для высоты 2 м: } \lambda_{-} = (1,30Rn + 18,3)^{1/2} \quad (3)$$

$$\lambda_{+} = (1,19Rn + 24,3)^{1/2} \quad (4)$$

Эмпирические ряды регрессии полярных электропроводностей по концентрации радона-222 и аппроксимирующие их кривые представлены на рис. 1.

Для интерпретации особенностей атмосферно-электрических процессов осуществлялись в том или ином объеме измерения концентрации радона-222 в почве и атмосферном воздухе всех пунктов Ростовской области. Результаты обследования территорий изложены в разделе 2.3.2. В первой его части отмечается, что по результатам измерений концентрации радона-222 в почве и атмосфере выявлены пункты Ростовской области с повышенным содержанием радона: Ростов-на-Дону, Орловский, Первомайское Кашарского района. Обнаружено, что содержание радона в воздухе всех пунктов Ростовской области в среднем существенно выше, чем средние для Европейской части России.

Во второй части раздела 2.3.2 приведены результаты расчета скорости эксхалиции радона из почвы в атмосферу для разных пунктов наблюдений с учетом характера почв.

Средняя скорость эксхалиции радона в Орловском в 1,5 раза выше, чем в других пунктах Ростовской области. То же относится и к средней концентрации Rn-222 в приземном слое атмосферы.

В разделе 2.3.3 исследована роль турбулентного перемешивания и определяющих его факторов в формировании электрического состояния приземного слоя атмосферы. Исследование влияния условий перемешивания на полярные электропроводности привело к следующим выводам. Значительные отрицательные градиенты электропроводности появляются в приземном слое при сочетании слабого ветра и температурной инверсии при наличии эманирования земной поверхности. Это способствует накоплению радона вблизи земной поверхности и,

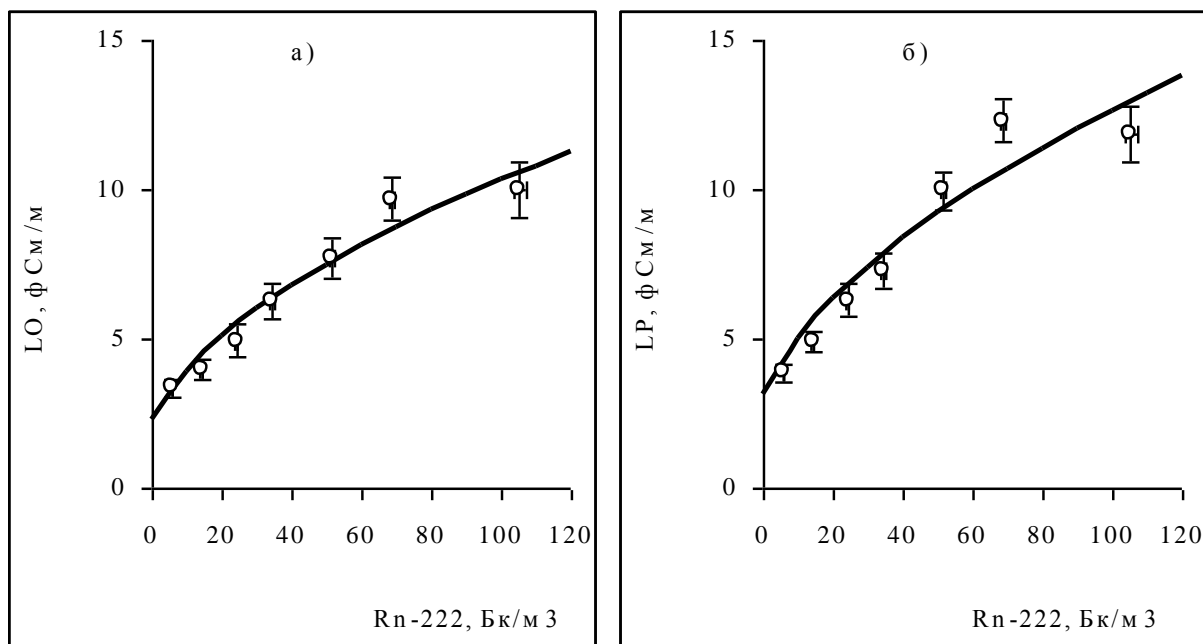


Рисунок 1. Эмпирические ряды регрессии отрицательной (а) и положительной (б) удельных электрических проводимостей атмосферы по концентрации радона-222 на высоте 0,05 м (Михайловка, 314 часовых серий парных измерений). Планками показаны величины стандартных погрешностей.

соответственно, заметному повышению электропроводности на самых нижних уровнях. В отсутствие эманирования градиент электропроводности не возникает.

Процессы перемешивания влияют на распределение полярных электропроводностей через перенос радиоактивных газов, в частности, радона-222. Вертикальные градиенты концентрации радона-222 и полярных электропроводностей становятся несущественными при скорости ветра, превышающей 2 м/с на высоте 2 м: рассматриваемые характеристики становятся независимыми от скорости ветра и практически постоянными по высоте. Градиенты величин быстро уменьшаются при ослаблении температурной инверсии и исчезают при отрицательном градиенте температуры (неустойчивая стратификация) около  $0,2^\circ/\text{м}$ . С

увеличением интенсивности турбулентного перемешивания градиенты по абсолютной величине уменьшаются и при коэффициенте турбулентности, близком к  $0,05 \text{ м}^2/\text{с}$ , достигают стабильно низких абсолютных значений, не меняющихся при дальнейшем усилении турбулентного обмена.

В разделе 2.3.4 изложены результаты анализа микроклиматических условий, которые определяют эксхалацию из почвы радиоактивных эманаций. Оказалось, что на выход радона из почвы при прочих равных условиях влияет распределение температуры почвы по глубине: радона в атмосфере у земной поверхности наблюдается тем больше, чем теплее почва на глубине 20 см по сравнению с 5-сантиметровой глубиной.

Раздел 2.3.5 посвящен исследованию нелинейных эффектов в процессах проводимости в приземном слое атмосферы, связанных с близостью электродной поверхности и проявляющихся в зависимости электропроводности от напряженности электрического поля. Усиление электрического поля в приземном слое вызывает снижение электропроводности соответствующего знака, что приводит к образованию объемного заряда. Плотность объемного заряда легких ионов увеличивается с ростом поля и уменьшается при росте скорости ветра от 0 до  $1,5\text{-}2 \text{ м/с}$  и до значений коэффициента турбулентности  $0,05\text{-}0,10 \text{ м}^2/\text{с}$  (по Орленко). При дальнейшем усилении перемешивания значения плотности заряда легких ионов перестают меняться, оставаясь низкими.

При исследовании влияния аэрозольных загрязнений атмосферы на электрические характеристики приземного слоя (раздел 2.3.6) обнаружено следующее. Атмосферно-электрические характеристики реагируют на повышение содержания аэрозолей как естественного, так и антропогенного происхождения. При наличии в атмосфере помутняющих частиц средние значения градиента потенциала электрического поля атмосферы снижаются вплоть до перехода через ноль, и существенно возрастает изменчивость величины поля. Значения полярных электропроводностей уменьшаются при увеличении содержания аэрозолей в атмосфере. В летние месяцы в Ростове-на-Дону они в 2-3 раза ниже, чем в сельских пунктах Ростовской области, несмотря на высокую естественную радиоактивность в Ростове-на-Дону.

Проведенные исследования обнаруживают влияние индустриальных центров, являющихся мощными источниками аэрозолей, на электрическое состояние приземного слоя атмосферы на прилегающих территориях. Статистически достоверным является факт снижения электропроводности атмосферы на окраине Ростова-на-Дону при ветрах со стороны города: зимой – на 40%, летом – на 20%. Обнаружено повышение электропроводности атмосферы в Ростове-на-Дону в выходные и праздничные дни по сравнению с буднями: зимой – на 30%, летом – на 10%, - из-за снижения количества промышленных и автотранспортных выбросов в атмосферу. При устойчивой стратификации пограничного слоя

атмосферы, оцениваемой по параметру  $\mu_{2-H}$ , предложенному Орленко (1979), описываемые эффекты проявляются резче. Таким образом, можно заключить, что электропроводность атмосферы реагирует на ее аэрозольное загрязнение, позволяя отслеживать расположение его источников и помогая осуществлять экологический мониторинг.

В **третьей главе** обсуждаются особенности электрической структуры электродного слоя атмосферы в различных микроклиматических условиях. Утверждается, что электрическая структура электродного слоя определяется интегральным действием совокупности значимых для атмосферного электричества факторов. Основные факторы, определяющие состояние электродного слоя, которые были исследованы в предыдущей главе, по-разному проявляют себя в различных физико-географических условиях. Вследствие этого распределение в пространстве и временная динамика атмосферно-электрических характеристик обнаруживают свои особенности в разных пунктах наблюдений.

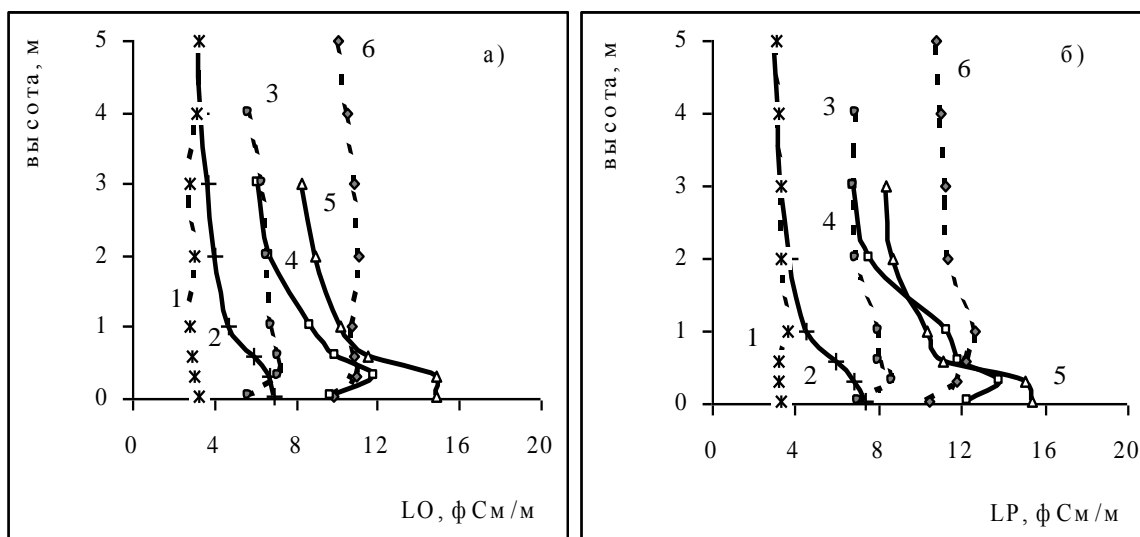


Рисунок 2. Вертикальное распределение отрицательной (а) и положительной (б) удельных электрических проводимостей приземного слоя атмосферы в среднем за период наблюдений: 1– Ростов н/Д, зима 1991 г., 109 профилей; 2– Ростов-на-Дону, июль-август 1989 г., 108 профилей; 3– Михайловка Кашарского района, июль-август 1995-1998 г.г., 314 профилей; 4– Орловский, август 1999 г., 67 профилей; 5– Первомайское Кашарского района, июль – август 1992-1994 г.г., 148 профилей; 6– Байкал, август 1990-1991 г.г., 206 профилей.

Поскольку в приземном слое атмосферы величины претерпевают значительное изменение по высоте, а площадки наблюдений были однородны в горизонтальном направлении, то исследовались вертикальные распределения характеристик атмосферы. В разделе 3.1.1

третьей главы рассматриваются средние за период наблюдений вертикальные распределения полярных электропроводностей (рис.2) и концентрации радона-222 в зонах с различным радиоактивным дыханием почвы. В итоге проведенных исследований оказалось, что для площадок наблюдений с высоким содержанием радиоактивного газа в почве (Орловский, Ростов-на-Дону, Первомайское) характерно значительное убывание полярных электропроводностей с высотой до уровня 2-3 метра. Для указанных пунктов электропроводность оказалась на высоте 3 метра в 1,8 - 2,0 раза ниже, чем на уровне 0,3 метра. В Михайловке, где радиоактивность почвы существенно ниже, эти коэффициенты составили 1,1 - 1,3. Отрицательная электропроводность в слое 0,3–3,0 м снижается с высотой несколько медленнее, чем положительная, что является следствием электродного эффекта.

Исследования показали, что вертикальное распределение электропроводности в приземном слое дает больше информации о почве, как источнике радиоактивности, чем сама электропроводность, зависящая в значительной мере от содержания аэрозолей. Для оценки содержания радона-222 в почве по вертикальному распределению электропроводности приземного слоя атмосферы может служить отношение градиента электропроводности в слое 0,3-3,0 метра к ее значению на высоте 0,3 м: высотный индекс электропроводности  $LH$ .

В разделе 3.1.2 исследуются особенности вертикального распределения полярных электрических проводимостей приземного слоя при устойчивой и неустойчивой стратификации его в пунктах с различной эксхалацией радона из почвы. По данным измерений содержание радона-222 в нижних слоях атмосферы в районах Ростовской области в условиях устойчивой стратификации (параметр стратификации  $m < 0,7$ , коэффициент турбулентности по Орленко 0,00–0,01 м<sup>2</sup>/с) в среднем достигает 50-100 Бк/м<sup>3</sup>, снижаясь для неустойчивой атмосферы ( $m > 1,3$  и коэффициент турбулентности 0,05-0,10 м<sup>2</sup>/с) до 10-20 Бк/м<sup>3</sup> вследствие диффузии его в более высоко расположенные слои. Вследствие этого вертикальные профили полярных электропроводностей разнятся для устойчивой и неустойчивой стратификации и, особенно, в пунктах наблюдений с повышенной скоростью эксхалации радона из почвы в атмосферу.

Экспериментальные распределения полярных электропроводностей по высоте в слое 0,3–3 м можно аппроксимировать степенной функцией:

$$\lambda = Ch^\alpha.$$

Коэффициенты  $\alpha$  и  $C$  зависят как от концентрации радона в пункте наблюдений, так и от коэффициента турбулентности: абсолютные значения обоих коэффициентов в пунктах, где много радона, выше, чем в других, и во всех пунктах они выше при малом коэффициенте турбулентности, чем при большом.



Профили полярных электропроводностей можно аппроксимировать степенной функцией лишь выше некоторого уровня  $H$ . Ниже уровня  $H$  находится слой, который может быть назван слоем поглощения. Это слой, который относительно обеднён ионами вследствие адсорбции их поверхностью почвы, а при наличии растительного покрова - и поверхностью растений. Толщина слоя достигает 0,6-1 м, но чаще составляет 0,3 м. Оценить потерю ионов вследствие адсорбции можно по разности измеренного значения электропроводности на высоте 0,05 м и ее значения на этой высоте, рассчитанного путем экстраполяции степенной функции, аппроксимирующей профиль электропроводности для слоя 0,3-3 метра. Определенные таким образом “потери” электропроводности из-за адсорбции ионов из слоя на высоте нескольких сантиметров могут составлять 30-60 %.

В разделе 3.1.3 рассматривается суточная трансформация профилей и связанные с ней особенности суточных вариаций в различных физико-географических условиях. В пунктах наблюдений с повышенной скоростью эксхалации радона-222 (Орловский, Первомайское, Ростов-на-Дону) отчетливо проявляется расслоение значений электропроводности в ночной период при низких скоростях ветра: на самых нижних уровнях ночью полярные электропроводности испытывают существенный подъем, в то время, как на высоте 3 м они изменяются по сравнению с дневными часами незначительно. Днем электропроводность на всех высотах в слое до 3 метров практически одинакова. На Байкале суточный ход коэффициента турбулентности слабо выражен, так как бризовая циркуляция обеспечивает ощутимую скорость ветра в любое время суток. В сочетании с незначительным эманированием это обуславливает то, что электропроводность на всех уровнях мало меняется на протяжении суток и мало различается по высотам, как днем, так и ночью.

Раздел 3.2 диссертации посвящен очень важной для электричества приземного слоя характеристике – плотности объемного заряда атмосферы. Отмечается, что атмосферно-электрические характеристики в электродном слое находятся в сложных взаимосвязях друг с другом. Следствием тока проводимости вблизи земной поверхности является электродный эффект, проявляющийся в дефиците ионов одной из полярностей. В свою очередь, этот дефицит приводит к образованию объемного заряда, а последний способствует изменению напряженности поля по высоте. Причиной генерации объемного заряда легких ионов в атмосфере может также служить прохождение тока проводимости через слой с вертикальным градиентом электропроводности. Образовавшийся вблизи земли объемный заряд легких ионов при наличии аэрозолей адсорбируется твердыми и жидкими частицами, продолжая влиять на локальные вариации атмосферно-электрических характеристик.

В разделе 3.2.1 дается оценка плотности объемного заряда легких ионов по результатам расчетов ее значений на основании данных об измерении полярных электропроводностей (средние подвижности легких ионов принимались в расчетах равными  $1,56 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/В·с для отрицательных ионов и  $1,36 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/В·с для положительных). В разделе 3.2.2 оценивается плотность заряда ионов всех подвижностей по данным измерения градиента потенциала (Имянитов, 1957).

Как показали исследования, профиль плотности объемного заряда легких ионов  $\rho_l$  в значительной мере определяется совокупностью воздействия электродного эффекта и высотного изменения интенсивности ионообразования. Закономерности вертикального распределения  $\rho_l$  можно интерпретировать исходя из того, что в электродном слое на любой высоте

$$\rho_l = \pm \rho_{\text{эз}} \pm \rho_{\Delta\lambda},$$

где  $\rho_{\text{эз}}$  - плотность объемного заряда, образовавшегося под действием электродного эффекта, а  $\rho_{\Delta\lambda}$  - плотность объемного заряда, возникающего вследствие тока проводимости в атмосфере при наличии в ней градиента электропроводности.

При слабом турбулентном обмене в слое, расположенном выше  $0,3 \div 0,6$  м, при наличии эксхалации радона наблюдается значительный отрицательный градиент электропроводности и, соответственно, образуется отрицательный объемный заряд, частично или полностью компенсирующий положительный объемный заряд электродного эффекта. В результате в профиле  $\rho_l$  выше  $0,3 \div 0,6$  метра часто наблюдается впадина в сторону отрицательных значений, а в определенных условиях - и переход  $\rho_l$  через ноль в этом слое. Отрицательный объемный заряд выше слоя с повышенной электропроводностью обнаруживается и по профилю поля. Наиболее эффективно объемный заряд легких ионов генерируется в условиях отсутствия турбулентного перемешивания (“условия хорошей погоды”) и повышенного эманирования почвы.

Плотность объемного заряда, дислоцированного на ионах всех подвижностей, в том числе и на заряженном вследствие адсорбции зарядов легких ионов аэрозоле, в среднем на порядок больше, чем плотность объемного заряда легких ионов. Заряженный аэрозоль может долгое время находиться в атмосфере, тогда как время жизни легких ионов невелико. По-видимому, в генерации объемного заряда в приземном слое участвуют легкие ионы, так как эта генерация связана с током проводимости, а уже готовый заряд, оседая на частицах аэрозоля, может длительно присутствовать в электродном слое, определяя его электрическую структуру. Аэрозоль в таком случае играет роль аккумулятора объемного заряда, способного перенимать его у легких ионов и накапливать, обуславливая увеличение плотности заряда.

Как показывают исследования (раздел 3.3 диссертации), характеристики электрического поля в приземном слое атмосферы, их распределение по высоте и вариации во времени тесно связаны с плотностью объемного заряда ионов всех групп. Локальные вариации атмосферного поля полностью определяются генерацией, распределением и перемещением формирующихся в пункте наблюдений объемных зарядов обоих знаков. Поэтому интерпретация поведения атмосферно-электрического поля в приземном слое возможна только при учете процессов образования объемного заряда и закономерностей вариаций его плотности.

Оказалось, что в пунктах Ростовской области с высокой скоростью эксхалляции радона (Орловский, Первомайское, Ростов-на-Дону) средний для пункта наблюдений градиент потенциала в целом по слою ниже, чем в Михайловке Ростовской области и на Байкале. Физически это вполне объяснимо повышенной ионизацией атмосферы и генерацией отрицательного объемного заряда в приземном слое. Вид профилей градиента потенциала различается, что связано с локальными особенностями механизмов генерации объемного заряда в приземном слое. Как правило, в профилях поля перемежаются слои с понижением градиента потенциала по высоте и слои, в которых градиент потенциала с высотой увеличивается.

Для всех пунктов наблюдений имеет место трансформация профиля градиента потенциала от дня к ночи: в ночные часы кривая вертикального распределения на графике в целом смещается в сторону более низких значений. Это обусловлено суточными изменениями в деятельности генератора отрицательного объемного заряда: ночью, в часы с более высокими градиентами электропроводности, он более эффективен, что и приводит к общему снижению поля в приземном слое.

В четвертой главе обсуждаются результаты инструментальных исследований грозовой деятельности в Ростовской области.

Раздел 4.1 носит обзорный характер: обосновывается актуальность проводимых исследований, обсуждается современное состояние вопроса. В плане теоретических исследований электрических процессов в атмосфере изучение грозовой деятельности имеет особый смысл, связанный с вопросом о взаимосвязи грозовой деятельности и унитарной вариации напряженности электрического поля Земли, с проблемой глобальной атмосферно-электрической цепи. Включить в круг рассматриваемых атмосферно-электрических проблем исследования грозовой деятельности, кроме актуальности вышеуказанной задачи, нас побудило также то, что во время грозовой деятельности наблюдаются экстремальные значения электрического поля, плотности тока, резкие колебания их значений, возможны быстрые изменения направления поля. Отсюда следует, что грозовые процессы должны учитываться при

исследовании пространственно-временных вариаций атмосферно-электрических характеристик, в частности, в приземном слое.

Отмечается, что необходимость получения научно-обоснованной информации об интенсивности грозовых процессов в различных регионах, помимо нужд теории, продиктована также потребностями все более развивающейся и усложняющейся техники, причем для нужд техники требуются как оперативные, так и режимные данные о грозах в том или ином регионе. Точность этих данных должна быть достаточной для решения практической задачи. К таким задачам относятся, прежде всего, защита от поражения молнией ЛЭП, радиотехнических сооружений, летательных аппаратов, зданий (Базелян и др., 1978). В связи с тем, что в малонаселенных лесных районах, по данным ряда исследователей от ударов молний возникает до 60-80 % лесных пожаров, определение зон повышенной интенсивности грозоразрядной деятельности позволяет выделить районы повышенной пожароопасности (Камышанова, Столярчук, 1984). Знание закономерностей разрядной деятельности гроз необходимо также при проведении активных воздействий на грозовые облака с тем, чтобы иметь возможность делать обоснованные заключения об эффективности этих воздействий (Аджиев, Богаченко, 1990).

Отмечается, что безусловными достоинствами инструментальных методов является объективность, точность, документальность. Наиболее распространены радиотехнические методы, позволяющие регистрировать разряды молний по их электромагнитному излучению (Бейтуганов, Аджиев, Зашакуев, 1990). Один из наиболее разработанных радиотехнических методов, перспективных с точки зрения оснащения метеостанций, связан с применением устройств, называемых счетчиками молний. Необходимо отметить, что работа по определению характеристик грозовой активности на территории Ростовской области проводилась в сотрудничестве с ГГО им. А.И. Воейкова и была начата в то время, когда концепция ведущих специалистов ГГО по разработке инструментальных методов измерения грозовой активности состояла в замене визуально – слухового метода наблюдений за грозами на инструментальный с использованием счетчиков грозовых разрядов известного эффективного радиуса приема импульсов радиоизлучения грозовых разрядов. В 1994 году была принята другая концепция, основанная на использовании широкополосных грозопеленгаторов - дальномеров. Внедрение этой концепции задержалось. Поэтому данные, полученные с помощью счетчиков молний, являются исключительно полезными в характеристике грозопоражаемости территорий.

Информация, получаемая с помощью счетчиков молний, дает возможность определять число разрядов, приходящихся в год на единицу земной поверхности, соотношение числа внутриоблачных и наземных разрядов, а при автоматической регистрации разрядов самопишущим

прибором – среднюю интенсивность отдельной грозы и изменение интенсивности разрядной деятельности на протяжении грозы, длительность отдельных гроз, временные интервалы между разрядами. Для обоснованной оценки грозоопасности территорий исследуется такая важная для мероприятий по грозозащите характеристика как плотность разрядов молнии в землю (Раков и др., 1990). Само собой разумеется, что при необходимости с помощью счетчика молний может определяться также и число дней с грозой, и суммарная годовая продолжительность гроз.

Раздел 4.2 посвящен приборам и методам, применявшимся при измерении числа грозовых разрядов и обработке полученных результатов. С помощью грозорегистраторов типа ПРГ-20 и ПРГ-100 системы ГГО (Лыдзар, 1964), впервые, насколько нам известно, получены данные о числе грозовых разрядов на территории области. Наблюдения с помощью полупроводниковых грозорегистраторов типа ПРГ велись в трех пунктах. На метеостанциях Б. Мартыновка (восток центральной части области, район Цимлянского водохранилища) и Чертково (северный район области) были установлены счетчики разрядов ПРГ-100. Отсчеты показаний счетчиков снимались раз в три часа в основные метеорологические сроки. В г. Ростове-на-Дону к выходу ПРГ-20 был присоединен самопишущий вольтметр, перо которого при каждом срабатывании счетчика разрядов оставляло на ленте засечку. Такая регистрация позволяла отслеживать изменения интенсивности грозовой деятельности во времени, что давало дополнительную информацию о закономерностях развития грозовых процессов в пункте наблюдений.

Для всех трех пунктов определялось число 3-часовых интервалов с грозовыми разрядами и число разрядов за 3-часовой интервал. Построены средние за период наблюдений суточные ходы этих величин. По данным, полученным на всех пунктах, рассчитывалось число разрядов на  $1 \text{ км}^2$  в год с учетом эффективных радиусов грозорегистраторов. Непрерывная регистрация грозовых разрядов в г. Ростове-на-Дону позволила получить данные об отдельных грозах. Грозы считались отдельными при наличии между соседними разрядами интервала времени, превышавшего 15 минут, в соответствии с Наставлениями гидрометеорологическим станциям и постам (1958). Определялось число разрядов за грозу  $N_{o.g.}$ , длительность отдельной грозы  $t$ , средняя интенсивность разрядов за грозу  $n$  и средний интервал времени между соседними разрядами  $i$ . Кроме того, от момента начала отдельной грозы подсчитывалась средняя за каждые последующие 5 минут интенсивность разрядов  $n_5$ , что позволяло отслеживать динамику разрядной деятельности на протяжении функционирования грозы. Статистическая обработка данных велась с помощью Пакета Анализа Microsoft Excel.

В разделе 4.3 рассматриваются результаты измерений числа грозных разрядов за 3-часовые интервалы для трех пунктов Ростовской области. Приводятся статистические характеристики исследуемой величины, а также средние суточные ходы числа разрядов и занятых разрядами 3-часовых интервалов. В исследуемых пунктах Ростовской области вариации грозовой активности на протяжении суток идентичны и характеризуются подъемом ее во второй половине дня, между 12 и 21 часами, то есть при наибольшем развитии конвективных движений в тропосфере. Таким образом, местная конвекция, которая летним днем в южнороссийских степях очень развита из-за большого притока солнечного тепла, вносит свой существенный вклад в формирование и поддержание грозных процессов на территории региона.

Для того, чтобы оценить грозопоражаемость территории  $\tau$ , рассчитано суммарное число разрядов (облачные плюс наземные), приходящееся на  $1 \text{ км}^2$  в год:  $n_\Sigma$ . Для этого суммарное число разрядов  $N_\Sigma$  за год, делилось на площадь, определяемую эффективным радиусом  $R_{\text{эфф}}$  действия счетчика:

$$n_\Sigma = \frac{N_\Sigma}{\pi R_{\text{эфф}}^2}.$$

Величина  $n_\Sigma$  оказалась практически одинаковой для разных пунктов и для счетчиков с разными эффективными радиусами. Как известно, счетчик ближних разрядов ПРГ-20 (он же ПРГ-15) имеет радиус обнаружения 15-20 км, а его эффективный радиус оценивается в 5-6 км. Счетчик ПРГ-100 имеет эффективный радиус 14-15 км (Иньков, Махоткин, 1982).

Если исходить из того, что соотношение внутриоблачных  $n_o$  и наземных  $n_z$  разрядов для пунктов, расположенных под  $47^\circ$  с.ш. (широта г. Ростова-на-Дону), соответственно 2:1 (Иньков, Махоткин, 1981), то число разрядов, поражающих каждый квадратный километр земной поверхности в год  $n_z$ , может быть определено как третья часть  $n_\Sigma$ , то есть:

$$n_z = \frac{n_\Sigma}{3}.$$

Коэффициент грозопоражаемости  $\tau$ : число наземных разрядов, поражающих  $1 \text{ км}^2$  исследуемой территории за час, - рассчитывался с привлечением данных метеостанций о годовой продолжительности гроз  $\Pi$  в часах для данной территории как  $\tau = \frac{n_z}{\Pi}$ .

Полученные таким образом значения коэффициента грозопоражаемости для разных станций лежат в пределах 0,08-0,14 разр./ $\text{км}^2$  час. Выполнена также оценка обсуждаемой величины с

использованием эмпирических формул (Лободин, 1981, 1986) на основании данных метеостанций о числе дней с грозой и продолжительности гроз. Полученные результаты хорошо согласуются с теми, что дают инструментальные наблюдения, и находятся в пределах 0,07-0,14 разр./км<sup>2</sup>час. Отмечается, что значения для Ростова-на-Дону примерно на треть ниже, чем те, что характеризуют два других пункта наблюдений. Таким образом, принимать коэффициент грозопоражаемости для всех территорий области одинаковым вряд ли возможно.

Следует отметить, что полученные для пунктов Ростовской области значения коэффициента грозопоражаемости несколько выше осредненной оценки  $\tau$ , приведенной, например, в работах Костенко и др. (1982), Тиходеева (1954): 0,06 – 0,10 разр./км<sup>2</sup>час, - и работе Новиковой (1979): 0,067 разр./км<sup>2</sup>час. Для уточнения величины  $\tau$  требуются более длинные ряды наблюдений. Одной из причин повышенной грозопоражаемости исследуемых территорий, если принять во внимание результаты работы Ершовой (2004), может являться существенно более высокое, чем в среднем по Европе, содержание радона в приземном слое атмосферы Ростовской области, обсуждаемое в главе 2 настоящей работы. Ершовой обнаружено статистически значимое увеличение грозовой активности в Южной Германии при росте концентрации в атмосфере  $\alpha$ - активных аэрозолей и объемной концентрации  $\beta$ -радиоактивности воздуха. Повышенной фоновой радиоактивности атмосферы соответствуют максимальные значения плотности разрядов молнии и числа дней с грозой. Необходимо также иметь в виду, что регистрация грозовой активности в пунктах Ростовской области проводилась в период 1983-1989 г.г. По данным инструментальных исследований гроз Агзаговой (2003) обнаружено снижение грозовой активности за последние десятилетия с начала 80-х годов на равнинной части территории Северного Кавказа, что связывается с антропогенными процессами трансформации естественных ландшафтов. Учитывая обозначенную тенденцию, можно предполагать, что грозовая активность в Ростовской области к настоящему времени снизилась по сравнению с периодом проведенных в 80-е годы измерений.

Раздел 4.4 посвящен параметрам отдельных гроз. Исследовались следующие параметры гроз: продолжительность (длительность) отдельной грозы  $t$ ; число разрядов, генерируемых отдельной грозой,  $N_{o.g.}$ ; средняя интенсивной отдельной грозы  $n$  - число разрядов в минуту; средний интервал времени между разрядами  $i$ .

При рассмотрении распределений указанных параметров для всех зарегистрированных гроз обращает на себя внимание то, что эти распределения далеки от нормального. Как известно, причиной асимметрии и эксцесса распределения случайной величины может служить неоднородность совокупности данных. В этом случае получается сложное распределение, являющееся результатом сложения нескольких

нормальных распределений, описывающих однородные совокупности данных (Урбах, 1964). С точки зрения физики эта однородность означает, что данные были получены для идентичных физических условий. Эти соображения дают понимание того, что подобная статистическая группировка гроз позволит, возможно, получить выходы на классификацию грозовых ситуаций, имеющую физические основы.

При изучении временной динамики интенсивности отдельной грозы

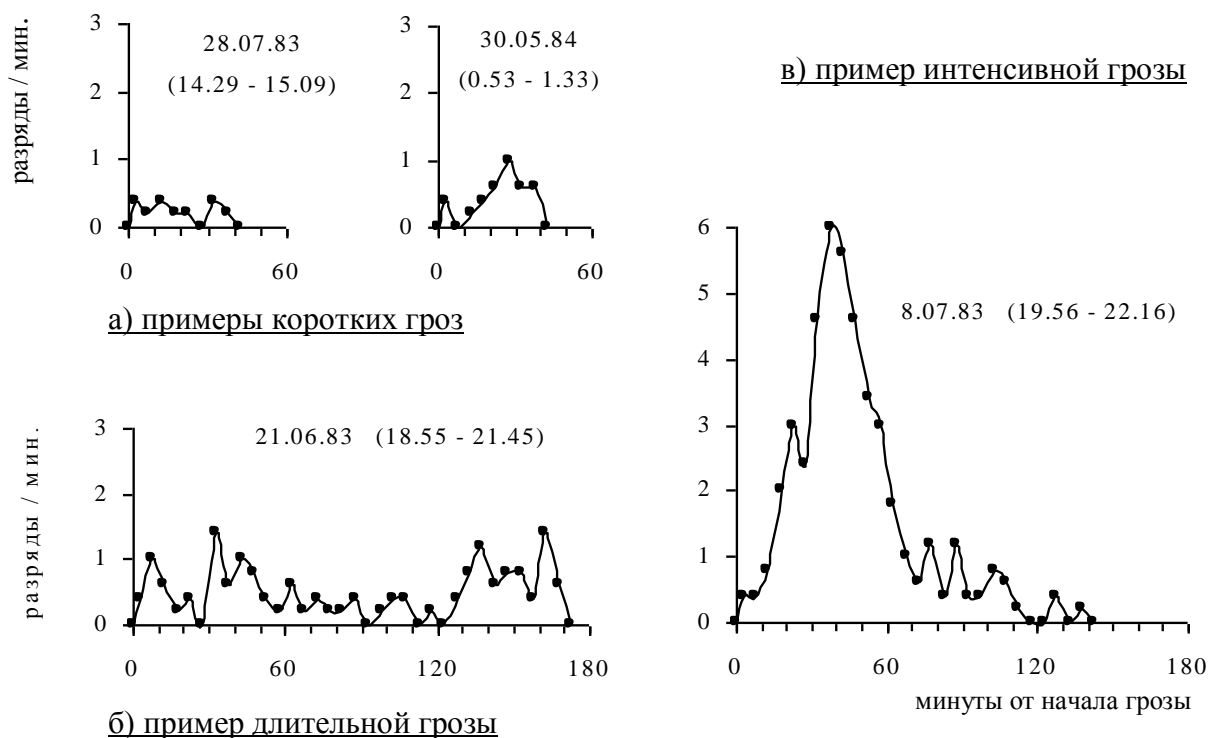


Рисунок 3. Примеры динамики во времени интенсивности коротких (а), длительных (б) и интенсивных (в) гроз при периоде осреднения 5 минут (г.Ростов-на-Дону, ПРГ-20).

было замечено, что по характеру вариаций разрядной деятельности наблюдавшиеся грозы можно разделить на три группы, которые условно назовем: 1) короткие; 2) длительные; 3) интенсивные. В работе для каждой из групп представлены примеры типичных вариаций во времени интенсивности разрядной деятельности грозы, оцениваемой числом разрядов за минуту, осредненным для 5-минутных интервалов (рис.3).

К группе коротких гроз были отнесены грозы с продолжительностью менее 45 минут (рис.3,а). Таких оказалось 55% от общего числа грозовых ситуаций. Средняя интенсивность отдельной грозы в этой группе не превышала 0,75 разр./мин., а осредненное по всей группе значение ее составило 0,34 разр./мин.

Продолжительность длительных гроз (рис.3,б) может составлять от 1 до 3 часов, а интенсивность на протяжении грозы колеблется возле



некоторого сравнительно небольшого значения (около 0,5 разр./мин.), близкого к наибольшим значениям интенсивности, достигаемым в коротких грозах. Относительная стабильность интенсивности разрядов при длительности грозы более 1 часа и явилась критерием при отборе гроз во вторую группу. Длительные грозы составили 34% всех наблюдавшихся гроз.

Для гроз, названных “интенсивными” характерно стремительное нарастание интенсивности разрядной деятельности в начале грозового процесса, с достижением высоких значений в период ее пика (иногда нескольких пиков) и быстрый спад разрядной активности в конце грозы (рис.3,в). Кривая интенсивности при этом часто напоминает колокол или купол. В третьей группе оказались продолжительные грозы со средней интенсивностью не менее 0,75 разряда за минуту. Средняя для группы интенсивность составила 1,21 разр./мин. Грозы этой группы наблюдались в 11% случаев.

Первые две группы гроз были достаточно многочисленны, поэтому оказалось возможным построить для каждой из них статистическое распределение характеристик отдельной грозы: длительности, числа разрядов и средней интенсивности. В работе даны таблицы, в которых приведены параметры этих распределений. Для группы “интенсивных” гроз в силу ее малочисленности такие статистические оценки могут рассматриваться лишь как ориентировочные. Статистические распределения характеристик гроз для выделенных групп, графики которых приведены в работе, оказались значительно более близкими к нормальному, чем для полной совокупности зарегистрированных гроз. Это можно рассматривать как косвенный признак однородности массивов данных, а значит того, что особенности статистики каждой группы гроз связаны с особенностями физических условий формирования грозовых процессов.

Если принять во внимание характерное время жизнедеятельности грозовой ячейки, “короткие” грозы, по-видимому, являются в большинстве своем одноячейковыми. В грозах, классифицируемых здесь как “длительные”, проявляющих свою активность в течение 2-3 часов, очевидно, ячеек несколько и “включаются” они последовательно. Стабильная и сравнительно невысокая интенсивность на протяжении грозы может являться результатом того, что в каждый момент времени генерирует разряды одна, “очередная” ячейка, и действие разных ячеек не накладывается друг на друга. Для “интенсивных” гроз возможно допустить одновременную активность нескольких ячеек: в таком случае результат их действия будет суммироваться, что и обусловит особенно большое наблюдаемое число генерируемых грозой в единицу времени разрядов.

В поиске причин, обуславливающих 2-3-кратное превышение средней частоты разрядов в интенсивных грозах по сравнению с прочими

грозовыми ситуациями, не стоит забывать о тесной взаимосвязи между грозовыми и градовыми процессами. Так, по данным работы Аджиевой (2003) при комплексном исследовании характера развития грозовой и градовой активности облаков обнаружено, что средняя интенсивность грозы существенно возрастает при градовых явлениях: при выпадении града интенсивность разрядной деятельности в 2 - 2,5 раза выше, чем в его отсутствие. Причем, для такого возрастания грозовой активности достаточно появления хотя бы одного градоопасного облака в радиусе 100 км (Аджиев, 1990). По исследованиям Агзаговой (2003) 10% наблюдавшихся в течение 2 лет гроз оказались суперячейковыми с грозо - градовыми процессами, а из общего числа гроз 15% сопровождалось градом. Вероятно, тем же отличаются от прочих грозовых ситуаций 11% наблюдавшихся в Ростове-на-Дону гроз, составивших группу интенсивных.

Далее приводится статистика массивов данных по каждому типу гроз и по каждому параметру отдельной грозы, и обсуждаются полученные результаты в сравнении с ранее опубликованными аналогичными результатами других авторов по иным территориям.

В пределах указанных выше групп проводился поиск возможных регрессионных зависимостей между параметрами отдельных гроз. В рамках каждой группы продолжительность гроз и их средняя интенсивность не обнаруживают коррелированности. Число разрядов за грозу  $N_{o.z}$  в каждой группе гроз линейно растет с увеличением продолжительности грозы  $t$ : получены следующие уравнения регрессии ( $t$  измеряется в минутах):

$$N_{o.z} = 0,30t \quad - \text{ для коротких гроз } (t < 45 \text{ мин.});$$

$$N_{o.z} = 0,45t \quad - \text{ для длительных гроз } (t > 45 \text{ мин.});$$

$$N_{o.z} = 1,40t - 25 \quad - \text{ для интенсивных гроз } (t > 60 \text{ мин.}).$$

Линейная регрессия получена и для связи между числом разрядов за грозу  $N_{o.z}$  и средней интенсивностью разрядной деятельности грозы  $n$ , выраженной в разрядах за минуту:

$$N_{o.z} = 15n \quad - \text{ для коротких гроз};$$

$$N_{o.z} = 95n \quad - \text{ для длительных гроз};$$

$$N_{o.z} = 185n - 25 \quad - \text{ для интенсивных гроз } (n > 0,75 \text{ разр./мин.}).$$

Наклон линий регрессии для обеих зависимостей наибольший в случае интенсивных гроз, наименьший – для коротких. Так называемые, длительные грозы занимают промежуточное положение. Полученные уравнения линейной регрессии статистически достоверны с вероятностью не менее 95%.

В разделе 4.5 диссертации исследована периодичность разрядной деятельности отдельных гроз в Ростовской области. Периодичность интенсивности разрядов, регистрируемых счетчиком молний, представляет

интерес, поскольку отражает динамику работы грозового генератора, а значит, может способствовать более детальному изучению механизма генерации разрядов в грозовом облаке.

Для исследования изменения во времени активности отдельной грозы были построены ряды динамики интенсивности разрядов с осреднением числа разрядов за разные интервалы времени: от 5 до 65 минут. Представлены графики рядов с осреднением за 5, 15, 45 и 60 минут. Изучение графиков показывает, что укрупнение масштаба осреднения приводит к сглаживанию мелких “зубцов” и проявлению вариаций большего периода. Выявлены периоды, равные 15-20 минутам и 50 минутам. Отмечается, что Колоколов и др. (1980) получили аналогичные результаты по данным исследования гроз в Ленинградской области.

На графиках автокорреляционной функции, построенных по рядам динамики частоты разрядов при 5-минутном осреднении для каждого типа гроз также четко прослеживается период колебаний грозовой активности порядка 15-20 минут (от 12 до 23 минут), а при длительных и интенсивных грозах отмечаются максимумы коэффициента автокорреляции для 40-50 минут.

Для изучения изменчивости разрядной активности в ходе отдельной грозы по описанным выше объединенным рядам динамики подсчитывался коэффициент вариации частот молний при различных временных интервалах ее осреднения: от 5 до 65 минут. Для всех типов гроз при укрупнении масштабов осреднения по времени коэффициент вариации снижается, а начиная с интервала осреднения 45-50 минут и выше становится стабильным, независимым от масштаба осреднения. Численные значения коэффициента вариации частоты разрядов для счетчика молний ПРГ-20 по Ленинградским данным находятся в пределах 50-130%, по нашим данным для Ростовской области – 50-100%.

В конце раздела подводится итог: при наблюдении естественного цикла развития гроз в Ростовской области посредством счетчика молний ПРГ-20 отчетливо выявляются периоды колебаний разрядной деятельности в отдельной грозе 15-20 и 45-50 минут. Соответствующие периоды колебаний частоты разрядов по данным ПРГ, полученным другими авторами в Ленинградской области (Павлова, Шевченко, 1982) при аналогичных методах обработки и анализа материала, составляют соответственно 10-15 и 30-40 минут. Некоторое различие в результатах обусловлено физико-географическими особенностями сравниваемых регионов. Видимо, период 45-50 минут можно поставить в соответствие с продолжительностью жизни единичной грозовой ячейки, а период 15-20 минут соответствует флуктуациям разрядной деятельности в пределах функционирования такой ячейки.

В **заключении** обсуждаются перспективы развития проводящихся на протяжении ряда лет комплексных атмосферно-электрических исследований.

В исследованиях приземного слоя атмосферы для того, чтобы глубже разобраться в физике приэлектродных процессов и оценить мощность действующих здесь генераторов атмосферного электричества, необходимо пополнить существующий измерительный комплекс непосредственным измерением плотности объемного заряда методом Оболенского на разных уровнях. Для развития исследований необходимы также измерения интенсивности ионообразования и концентрации аэрозолей в атмосфере.

Для получения более достоверной картины электрической структуры приземного слоя в разных условиях в совокупности с экспериментальными исследованиями атмосферно-электрических процессов необходимо применять методы их математического моделирования.

В связи с наблюдающейся тенденцией к снижению грозовой активности в регионе следует возобновить инструментальные исследования гроз в Ростовской области для отслеживания ситуации.

Отмечено, что дальнейшее развитие исследовательской работы требует модернизации части измерительной аппаратуры и организации измерений с применением современной вычислительной техники.

#### **Основные результаты и выводы проведенных исследований:**

1. Электрическая структура приземного слоя атмосферы в значительной мере определяется концентрацией радона-222 в почвенном газе и условиями выхода его в атмосферу. Последние зависят от состояния верхнего слоя почвы.

2. Введен высотный индекс электропроводности приземного слоя атмосферы, определяемый как отношение градиента электропроводности в слое 0,3-3 метра к значению самой электропроводности на высоте 0,3 метра. Установлена логарифмическая зависимость высотного индекса электропроводности от концентрации радона в почвенном газе на глубине 10 см, позволяющая оценивать содержание радона в почве на основании атмосферно-электрических данных.

3. Полярные электропроводности обнаруживают статистически достоверную с вероятностью 95% положительную корреляцию с концентрацией радона-222 в приземном слое. Регрессионные зависимости квадратов полярных электропроводностей от концентрации радона-222 в атмосфере хорошо аппроксимируются линейной функцией.

4. Распределение полярных электропроводностей по высоте выше уровня поглощения хорошо аппроксимируется степенной функцией.

5. Влияние турбулентного перемешивания на вертикальное распределение электропроводностей в большой степени опосредовано: турбулентное перемешивание модулирует концентрацию радона, которая в свою очередь определяет величину электропроводности на

соответствующем уровне. В пунктах наблюдений с незначительным эманированием почвы турбулентность мало влияет на вариации электропроводности.

6. Суточные вариации полярных электропроводностей вблизи земли в значительной мере вызваны суточными вариациями концентрации радона-222, которые обусловлены суточными изменениями турбулентной диффузии радона от земной поверхности в вышележащие атмосферные слои. Амплитуда суточных вариаций полярных электропроводностей убывает с высотой и мала в тех пунктах наблюдений, где мал выход радона из почвы. Наблюдается соответствующая трансформация вертикальных профилей полярных электропроводностей и концентрации радона-222 в течение суток, в ходе которой значения величин на нижних уровнях между днем и ночью существенно нарастают или убывают, а на высоте 2-3 метра варьируют относительно мало.

7. Плотность объемного заряда легких ионов вблизи земной поверхности в значительной мере определяется величиной электрического поля атмосферы и меняет свой знак при перемене знака поля. Уменьшение по высоте электропроводности атмосферы обуславливает генерацию в соответствующем слое отрицательного объемного заряда легких ионов, что влияет на вертикальное распределение плотности объемного заряда. С усилением турбулентного перемешивания плотность заряда уменьшается.

8. В приземном слое атмосферы градиент потенциала обнаруживает сложное распределение по высоте, обусловленное наличием слоев с объемными зарядами разной плотности и знака. Тип вертикального профиля градиента потенциала связан с метеоусловиями.

9. Атмосферно-электрические характеристики чувствительны к аэрозольным загрязнениям: пыль, дым, туман вызывает снижение электропроводности, вызывает уменьшение и переход через ноль градиента потенциала, а также резко увеличивает его изменчивость. Значения электропроводности существенно снижаются в периоды, когда направление ветра совпадает с направлением на мощные источники аэрозолей, что вызывает интерес к этой характеристике как к индикатору аэрозольных загрязнений атмосферы.

10. Рассчитанный по результатам регистрации числа грозовых разрядов счетчиками ПРГ для трех пунктов Ростовской области средние значения коэффициента грозопоражаемости за период измерений составляет 0,08-0,14 разр./км<sup>2</sup>час. Оценка коэффициента грозопоражаемости с использованием эмпирических формул на основании данных метеостанций о числе дней с грозой и продолжительности гроз дает близкие результаты: в пределах 0,07-0,14 разр./км<sup>2</sup>час.

11. На основании анализа рядов динамики интенсивности разрядной деятельности отдельных гроз в совокупности со статистическими исследованиями параметров отдельных гроз можно выделить три типа гроз

среди тех, что зарегистрированы в Ростове-на-Дону в период с 1983 по 1986 г.г.:

1) Короткие – с продолжительностью менее 45 минут и средней интенсивностью гроз до 0,75 разр./мин.;

2) Длительные – с продолжительностью более 45 минут и средней интенсивностью отдельной грозы не более 0,75 разр./мин.;

3) Интенсивные – со средней интенсивностью более 0,75 разр./мин.

13. При наблюдении естественного цикла развития гроз в Ростовской области посредством счетчика молний ПРГ-20 отчетливо выявляются периоды колебаний разрядной деятельности в отдельной грозе 15-20 и 45-50 минут. Видимо, период 45-50 минут можно поставить в соответствие с продолжительностью жизни единичной грозовой ячейки, а период 15-20 минут соответствует флуктуациям разрядной деятельности в пределах функционирования такой ячейки.

### **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Петров А.И., Бык (Петрова) Г.Г. Изменения плотности объемного заряда легких ионов в электродном слое атмосферы. // Труды II Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Ленинград, ГГО им.А.И.Воейкова, 1982. Гидрометеиздат, 1984. С.26-27.
2. Петров А.И., Петрова Г.Г. Вертикальные профили полярных электропроводностей и плотности объемного заряда в электродном слое атмосферы. // Труды ГГО, 1988. Вып.514. С.12-16.
3. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н. Измерения компонент вертикального атмосферно-электрического тока в г. Ростове-на-Дону // Труды ГГО, 1988. Вып.514. С.17-22.
4. Петров А.И., Петрова Г.Г. Результаты измерений электропроводности в электродном слое атмосферы. // Труды ГГО, 1990. Вып.527. С.12-17.
5. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н. Влияние индустриального загрязнения воздушного бассейна на электропроводность атмосферы в Ростове-на-Дону. // Труды ГГО, 1990. Вып.527. С.41-43.
6. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н. Измерение атмосферно-электрических характеристик в различных физико-географических условиях. // Тезисы докладов. IV Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству. Нальчик, ВГИ, 1990. С.345-346.
7. Петрова Г.Г., Петров А.И. Инструментальные исследования гроз в Ростовской области. // Тезисы докладов. IV Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству. Нальчик, ВГИ, 1990. С.182.

8. Буриков Е.А., Петров А.И., Петрова Г.Г. Комплексные гелиогеофизические исследования. // Проблемы астрономической подготовки студентов в педагогических институтах: Межвузовский сб. науч. тр.// Мин.нар.образ.РСФСР, РГПУ. Ростов-на-Дону, 1990. С.56-61.
9. Petrov A.I., Petrova G.G., Panchishkina I.N. Experimental research of electrode layer. // Proc.9th Int. Conf. Atm. Electricity. S.-Petersburg, 1992. P.619.
10. Petrov A.I., Petrova G.G., and Panchishkina I.N., Measurements of polar conductivities in the surface layer of the atmosphere.// Proc.10th Int. Conf. Atm. Electricity. Osaka, Japan, 1996. Pp.188-191,
11. Petrov A.I., Petrova G.G., and Panchishkina I.N. Variations of vertical "atmosphere-earth" current components and its probable interpretation. // Proc.10th Int. Conf. Atm. Electricity. Osaka, Japan, 1996. Pp. 548-551.
12. Petrov A.I., Petrova G.G., and Panchishkina I.N. On factors determining the variations of the electric characteristics of a surface layer. // Proc.11th Int. Conf. Atm. Electricity. Alabama, USA, 1999. Pp. 547-550.
13. Куповых Г.В., Клово А.Г., Морозов В.Н., Петров А.И., Петрова Г.Г. Моделирование распределения объемного заряда в турбулентном приземном слое. // Труды VIII Международной конференции "Математические модели физических процессов и их свойства". Таганрог, ТГПУ, 2002. С.119-123.
14. Petrov A.I., Petrova G.G., and Panchishkina I.N. Statistic structure of variations of vertical «atmosphere-earth» currents. // Proc.12th Int. Conf. Atm. Electricity. Versailles, France, 2003.
15. Кудринская Т.В., Петров А.И., Петрова Г.Г. Электрическое поле атмосферы и аэрозоль. // Тезисы докладов. VII Всероссийская конференция молодых ученых "Малые примеси, атмосферное электричество и динамические процессы в атмосфере". Н.Новгород, 2003. С.30.
16. Панчишкина И.Н., Петрова Г.Г., Петров Н.А. Вертикальный электрический ток в атмосфере и на границе атмосфера-земля. // Труды V Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир, ВГУ, 2003. С.121-124.
17. 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. // Труды V Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир, ВГУ, 2003. С.124-127.
18. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н. Инструментальные исследования грозовой деятельности в Ростовской области. // Труды V Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир, ВГУ, 2003. С.334-337.

19.Калинина М.В., Куповых Г.В., Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н. Радиоактивность и ионизация воздуха в приземном слое атмосферы. // Таганрог, Известия ТРТУ, 2004. № 5. С.175-179.