

на правах рукописи

Панчишкина Ирина Николаевна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ
АТМОСФЕРЫ**

Специальность 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нальчик
2009

Работа выполнена на кафедре общей и экспериментальной физики педагогического института Южного федерального университета.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Куповых Геннадий Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Бейтуганов Мусаби Ногманович
кандидат физико-математических наук
Богаченко Евгений Моисеевич

Ведущая организация:

Научно-исследовательский центр дистанционного зондирования атмосферы – филиал Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «30» января 2009 г. в 14-00 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 «25» *декабря* 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук,

профессор



А.В. Шаповалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Исследования вертикальных атмосферно-электрических токов различной природы вблизи земной поверхности представляют научный интерес, прежде всего, тем, что процессы переноса заряда в значительной степени влияют на электродинамическую структуру приземного слоя. Сложность теоретического изучения этого слоя обусловлена тесной взаимосвязью атмосферно-электрических и метеорологических явлений, наличием аэрозольных частиц и источников ионизации в атмосфере, а также близостью границы раздела двух сред «атмосфера-земля», обуславливающей действие «электродного эффекта». Одной из причин, затрудняющей интерпретацию экспериментальных данных, полученных при наземных атмосферно-электрических измерениях, является наложение локальных возмущений электрического поля атмосферы на его глобальную унитарную вариацию. Существующие в настоящее время методики выделения условий «хорошей погоды» при отборе данных, не позволяют полностью исключить явления, приводящие к появлению заметных локальных составляющих электрического поля.

Данные измерений вертикальных электрических токов в атмосфере вблизи земной поверхности и на границе атмосфера-земля дают основания полагать, что наряду с током проводимости важную роль в обмене зарядами между атмосферой и землей играют процессы механического переноса. Измерения тока механического переноса в разных условиях представляют особый интерес, поскольку его можно рассматривать как локальный генератор электрического поля, действующий повсеместно в приземном слое атмосферы. Исследования закономерностей работы такого генератора позволяют оценить его влияние на формирование структуры электродного слоя. Для этого необходимо выявить связи тока механического переноса с другими физическими факторами, что является сложной многопараметрической задачей, решению которой способствует анализ экспериментальных данных об электрических и метеорологических характеристиках приземного слоя атмосферы.

Идея развития исследований в этом направлении была сформулирована проф. Имянитовым И.М. (Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова) в начале 80-х годов прошлого века.

Цель работы. Исследование процессов переноса заряда в атмосфере вблизи земной поверхности и их роли в формировании электродинамической структуры приземного слоя.

Для достижения поставленной цели решались следующие **научные задачи:**

1. Физико-статистический анализ массивов атмосферно-электрических параметров, полученных в различных пунктах наблюдений.

2. Установление закономерностей пространственно-временных вариаций вертикальных атмосферно-электрических токов.
3. Оценка интенсивности различных процессов переноса заряда из атмосферы на землю.
4. Сравнение методик определения исключаяющих условий при выборке нормальных дней (условий «хорошей погоды») для отбора данных с целью выявления динамики глобальных атмосферно-электрических процессов.
5. Установление эмпирических зависимостей между электрическими и метеорологическими параметрами в ненарушенных условиях.
6. Сравнительный анализ накопленных экспериментальных данных о процессах переноса заряда в атмосфере и на границе атмосфера-земля с результатами наблюдений других исследователей и результатами теоретических расчетов параметров электродного слоя.

Научная новизна работы.

1. Впервые выполнены измерения составляющих вертикального электрического тока в приземном слое атмосферы в совокупности с метеорологическими наблюдениями на территории Ростовской области и в районе озера Байкал.
2. Выявлены особенности процесса переноса электрического заряда из атмосферы на землю в пунктах с разными физико-географическими условиями.
3. На основе физико-статистического анализа экспериментальных данных установлено, что ток механического переноса на границе атмосфера-земля составляет 30-40% от тока проводимости, а для пунктов Ростовской области имеет в основном отрицательное значение.
4. Установлены механизмы образования и переноса объемного заряда вблизи поверхности земли и проведена типизация условий, определяющих интенсивность механического переноса заряда из атмосферы на землю.
5. Предложен новый физический критерий оценки условий «хорошей погоды» для атмосферно-электрических наблюдений, когда действием локальных генераторов электрического поля можно пренебречь.

Практическая значимость результатов работы.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы:

- для уточнения параметров глобальной атмосферно-электрической токовой цепи;
- для развития моделей «электродного эффекта» в приземном слое атмосферы;
- при интерпретации экспериментальных данных об атмосферно-электрических параметрах приземного слоя атмосферы, в частности для выделения влияния глобальных и локальных факторов;
- для разработки методов мониторинга и контроля антропогенных воздействий на атмосферу;

- при оценке условий «хорошей погоды» для сравнения данных атмосферно-электрических измерений, полученных в разных пунктах наблюдений;
- в системе образования разных уровней при разработке учебных программ дисциплин из цикла наук о Земле;
- в экологическом воспитании при организации научно-исследовательской работы студентов и школьников.

На защиту выносятся следующие положения и научные результаты:

1. Результаты комплексных исследований электродинамических процессов в приземном слое атмосферы на основе атмосферно-электрических и метеорологических наблюдений на территории Ростовской области и в районе озера Байкал.
2. Механизмы образования и переноса объемного электрического заряда из атмосферы на землю для различных метеорологических и физико-географических условий.
3. Оценки значений токов проводимости и механического переноса в приземном слое атмосферы и зависимость их интенсивности от метеорологических факторов.
4. Новый критерий оценки условий «хорошей погоды» для интерпретации атмосферно-электрических наблюдений.

Апробация результатов работы.

Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на III и IV Всесоюзных симпозиумах по атмосферному электричеству (Тарту, 1986; Нальчик, 1990), IX, X, XI, XII и XIII Международных конференциях по атмосферному электричеству (Санкт-Петербург, 1992; Осака, Япония, 1996; Алабама, США, 1999; Версаль, Франция, 2003; Китай, 2007), V и VI Российских конференциях по атмосферному электричеству (Владимир, 2003; Нижний Новгород, 2007), научных семинарах отдела атмосферного электричества ГГО им. А.И. Воейкова (Ленинград, 1985-1987), кафедры метеорологии ИГУ (Иркутск, 1990-1991), кафедры теоретической физики и кафедры общей и экспериментальной физики ПИ ЮФУ (Ростов-на-Дону, 2007, 2008), кафедры физики ТТИ ЮФУ (Таганрог, 2008), НИЦ ДЗА (Санкт-Петербург, 2008)

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 18 работ, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора.

Автор принимал непосредственное участие в планировании, подготовке и проведении полевого эксперимента в составе многолетних ежегодных геофизических экспедиций факультета физики ПИ ЮФУ под руководством зав. лабораторией геофизических исследований доц. Петрова А.И.

Все основные результаты диссертации получены лично автором. Постановки задач исследований и обсуждение их результатов осуществлялись совместно с руководителем аспирантуры д. ф.-м. н., проф. А.Х. Филипповым и научным руководителем д. ф.-м. н., проф. Г.В. Куповых.

Автор выражает признательность д. ф.-м. н., проф. Щукину Г.Г., д. ф.-м. н., проф. Аджиеву А.Х., доц. Петрову А.И. и к. ф.-м. н., доц. Петровой Г.Г., д. ф.-м. н. В.Н. Морозову, к.т.н. Я.М. Шварцу и Л.Г. Соколенко за ценную консультативную помощь при подготовке диссертации к защите.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, насчитывающего 133 наименования. Работа содержит 129 листов, включая 26 рисунков и 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, перечислены цели и задачи диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены данные о публикациях и об апробации работы.

В главе первой дается краткий обзор состояния исследований Глобальной атмосферно-электрической цепи (ГЭЦ), которая охватывает нижнюю атмосферу, ионосферу и магнитосферу и представляет собой систему токов в контуре, образованном проводящими слоями ионосферы и земной коры, с грозowymi генераторами, действующими, главным образом, в экваториальной зоне земного шара и невозмущенными областями в качестве зон возвратных токов. В первом разделе главы 1 обсуждаются проблемы современной концепции ГЭЦ: необходимость поддержания баланса токов в контуре ГЭЦ, оценка «эффективности» грозowych генераторов для поддержания наблюдаемой структуры электрического поля в атмосфере, изучение вклада других генераторов в процессы образования ГЭЦ и т.д. Теоретические исследования, направленные на решение этих проблем, предлагают различные модели ГЭЦ, описывающих протекание электрических процессов в атмосфере.

Раздел 1.2 посвящен обзору теоретических исследований электродинамической структуры приземного слоя атмосферы, которая определяется действием электродного эффекта, турбулентной диффузии, интенсивностью источников ионизации, влиянием аэрозольных частиц.

Общая система уравнений, описывающая электрические процессы в приземном слое атмосферы, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial n_{1,2}^i}{\partial t} + \operatorname{div}(n_{1,2}^i \vec{v}) + \operatorname{div}(n_{1,2}^i b_{1,2}^i \vec{E}) - \operatorname{div} D_{1,2}^i \operatorname{grad} n_{1,2}^i = q_{1,2}^i(\vec{r}) - \alpha_{1,2}^i n_{1,2}^i n_2^i - k_{1,2}^i$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho, \quad \vec{E} = -\nabla\varphi \quad (1)$$

где $n_{1,2}^i$ - объемная концентрация ионов i -ой группы, $b_{1,2}^i$ - их подвижность, 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 - напряженность электрического поля, ρ - плотность электрического заряда, φ - потенциал электрического поля.

В работах и монографиях, посвященных электродному эффекту в атмосфере, показано, что использование различных типов моделей эффективно для описания электрических процессов в приземном слое атмосферы, а выбор конкретной модели должен быть обоснован соответствующими физическими и метеорологическими условиями.

В разделе 1.3 обсуждается современное состояние экспериментальных исследований электродного слоя атмосферы. Можно выделить несколько направлений, различающихся целью, комплексом и масштабом наблюдений. Значительное количество работ посвящено изучению характерных значений и изменчивости атмосферно-электрических характеристик в различных физико-географических условиях течение длительных временных интервалов. В них представлены многолетние тренды значений, годовые и суточные ходы различных физических параметров, характеризующих состояние атмосферного воздуха вблизи земной поверхности. На основе анализа результатов регулярных наблюдений осуществляется мониторинг электрического состояния приземного слоя, исследуется антропогенное влияние на электрические характеристики.

Основными атмосферно-электрическими величинами, за которыми проводятся регулярные наблюдения, являются вертикальная составляющая градиента потенциала электрического поля атмосферы и удельные положительная и отрицательная электрическая проводимость воздуха. По этим данным можно косвенно оценить плотность тока проводимости в атмосфере. Непосредственные измерения плотности полного тока на землю методом пластины и плотности тока проводимости в атмосфере на горизонтальную проволочную антенну производятся, в основном, эпизодически.

Результаты ряда исследований, проведенных во второй половине прошлого века, показали, что ток проводимости в приземном слое не остается постоянным по высоте. Это указывает на наличие в этом слое заметного тока механического переноса (использовался менее точный термин «конвективный ток»), который существует в атмосфере из-за переноса объемного заряда конвективными потоками и вследствие турбулентной диффузии. Плотность тока механического переноса в атмосфере можно рассчитать как:

$$j_{mn} = -D_T \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho v, \quad (2)$$

где j_{mn} – плотность тока механического переноса, D_T – коэффициент турбулентной диффузии, $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ – вертикальная составляющая градиента плотности объемного заряда, ρ – плотность объемного заряда v – скорость вертикальных потоков.

Ток механического переноса из атмосферы на землю аналитически не определяется, метод его измерения с помощью пластины, помещенной под заземленную сетку, был разработан и апробирован на кафедре физики Кировского государственного педагогического института группой исследователей под руководством А.М. Изергина. Среднее значение плотности тока механического переноса, полученное этим методом, оказались положительным и сравнимым с плотностью тока проводимости. Плотность полного тока в атмосфере может быть представлена как сумма плотности тока проводимости и плотности тока механического переноса:

$$j = \lambda \cdot E + j_{mn}, \quad (3)$$

где j – плотность полного вертикального электрического тока в атмосфере, λ – суммарная электропроводность воздуха, E – напряженность электрического поля.

Для оценки выполнения омических условий в атмосфере используется критерий Долезалека:

$$\Omega = \frac{j}{\lambda \cdot E}. \quad (4)$$

Одновременные измерения напряженности электрического поля, полярных электрических проводимостей воздуха вблизи земной поверхности и плотности полного вертикального электрического тока из атмосферы на землю позволяют рассчитать Ω , оценить вклад различных механизмов переноса заряда в полный ток, принимаемый земной поверхностью. По данным измерений Красногорской Н.В., Tuomi T.J., Куповых Г.В. среднее значение критерия Долезалека оказалось меньше 1, что указывает на механический перенос отрицательного заряда на земную поверхность.

Большой интерес представляют исследования, которые содержат анализ физических механизмов формирования электродинамической структуры приземного слоя, где с учетом многофакторности процессов, определены и количественно оценены существенные причинно-следственные связи между отдельными физическими параметрами. Работы ряда авторов посвящены анализу короткопериодных пульсаций атмосферно-электрических величин и поиску структурных пространственно-временных соответствий и взаимосвязи полей электрических и метеорологических величин.

Во второй главе проводятся исследования метеорологических характеристик приземного слоя применительно к атмосферно-электрическим наблюдениям.

В первом разделе второй главы описывается измерительный комплекс для проведения наблюдений за метеорологическими характеристиками. Ежечасные градиентные измерения температуры воздуха и скорости ветра в нижнем 2-метровом слое атмосферы позволили определять коэффициент турбулентности.

Коэффициент турбулентности рассчитывался по методу Орленко на основании данных о температуре воздуха и скорости ветра на высотах 0,5 и 2 метра. Значение коэффициента турбулентности для $z=1$ м

$$D_T = \frac{\chi^2}{\varphi^2} \frac{\Delta U}{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} z \quad (5)$$

зависит от $\Delta U = U_{2.0} - U_{0.5}$ и φ , где $U_{2.0}$ - скорость ветра на высоте $z_2 = 2$ м, $U_{0.5}$ - скорость ветра на высоте $z_1 = 0,5$ м, χ - постоянная Кармана. Значение функции φ зависит от числа Ричардсона.

$$Ri = \beta \frac{(\partial T / \partial z + \gamma_a)}{(\partial U / \partial z)^2} \quad (6)$$

где β - параметр плавучести, γ_a - сухоадиабатический градиент температуры, $\partial T / \partial z$ и $\partial U / \partial z$ - градиенты температуры воздуха и скорости ветра соответственно.

Если $Ri = 0$, то $\varphi = 1$

Если $Ri < 0$, то $\varphi = (1 - 16 \cdot Ri)^{-\frac{1}{4}}$

Если $Ri > 0$, то $\varphi = -\frac{1 - 7 \cdot Ri - \sqrt{(1 - 7 \cdot Ri)^2 + 16 \cdot Ri^2}}{8 \cdot Ri^2}$

Накопленные к настоящему моменту результаты наблюдений свидетельствуют о значительной изменчивости характеристик атмосферного электричества вблизи поверхности земли. Поля метеорологических параметров, в значительной степени определяют физическое состояние слоя, прилежащего к земной поверхности, и тем самым, влияют на процессы формирования и переноса объемного заряда. Чтобы сгруппировать для анализа однородные совокупности данных измерений, необходимо рассмотреть термодинамические условия.

В разделе 2.2 проводится сравнительный анализ термодинамического состояния атмосферы в различных пунктах наблюдений.

Близость неоднородной по своим физическим свойствам земной поверхности, наличие облачности, содержание в атмосфере твердых и жидких примесей и другие факторы обуславливают большое разнообразие профилей температуры воздуха, скорости ветра и турбулентного обмена в приземном слое. При этом имеет место взаимосвязь и взаимообусловленность полей различных метеорологических параметров

атмосферы. Распределение скорости ветра и температуры в прилежащем к земной поверхности слое определяют турбулентный обмен, который в свою очередь влияет на тепловой режим атмосферы и земной поверхности, перенос и распределение различных физических свойств атмосферного воздуха.

Метеорологические характеристики имеют четко выраженный суточный ход, который может сильно отличаться в разных пунктах наблюдений, и даже в одном и том же месте ото дня ко дню не только среднесуточными значениями, но и размахом колебаний значений величин.

Для анализа вариаций метеопараметров во времени в качестве исходных выбраны массивы значений температуры воздуха, скорости ветра и коэффициента турбулентности в различных пунктах измерений. Для указанных величин построены эмпирические вариационные ряды и рассчитана теоретическая кривая, соответствующая нормальному распределению каждого параметра. Для нормального распределения вероятность значений величины в некотором интервале определялась по формуле:

$$P(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} dx, \quad (7)$$

где σ - стандартное отклонение, характеризующее степень рассеяния значений x случайной величины X вокруг математического ожидания μ ; dx - малая величина, определяющая ширину интервала.

Для пунктов Ростовской области в экспериментальном распределении температуры выделяются несколько максимумов, что свидетельствует о неоднородности выборки, в которой воедино сведены данные нескольких нормальных массивов, характеризующихся своим набором параметров. Экспериментальное распределение, построенное для дневных значений температуры, оказалось близко к нормальному. В то же время, вид эмпирической кривой, полученной для ночных измерений температуры, указывает на то, что физические условия ночью весьма неоднородны. Выделяются две отдельные подсовкупности значения температуры, одна состоит из значений, которые наблюдаются тихими ночами (скорость ветра в слое до 5 м равна нулю), во вторую входят значения, полученные ветренными ночами (скорость ветра на 0,5 м более 0,5 м/с). Каждое из этих распределений имеют достаточно сложную структуру. Это объясняется множеством факторов, оказывающих существенное влияние на значение температуры ночью, например, наличие облачности, образование тумана, выпадение росы и т.д.

Значения температуры воздуха на Байкале и днем, и ночью имеют экспериментальное распределение близкое к нормальному, и по сравнению с Ростовскими пунктами измерений можно отметить меньшую разницу между

их модальными классами и средними значениями, поэтому они объединяются в более однородный общий массив.

Таблица 1.

	$D_T < 0,05$	$0,05 \leq D_T < 0,10$	$D_T \geq 0,10$
Байкал (N=505)	31%	42%	27%
Михайловка (N=947)	69%	26%	5%
Первомайское (N=603)	47%	30%	23%
Платов (N=244)	44%	21%	35%

Примечание: N - число часовых серий измерений

Рассматривая структуру массива коэффициента турбулентности можно заметить, что в Ростовской области большая часть всех измерений приходится на часы с низкими значениями этой величины ($D_T < 0,05 \text{ м}^2/\text{с}$), причем в с. Первомайское и х. Платов это примерно половина массива данных, а в с. Михайловка – почти 70% (таблица 2). На условия с интенсивным перемешиванием ($D_T > 0,10 \text{ м}^2/\text{с}$) в с. Первомайское приходится 23% всех часов наблюдений, а в с. Михайловка только 5%.

На Байкале благодаря относительной симметрии в распределении примерно одинаковое количество измерений (около 30%) оказывается в крайних интервалах.

Необходимость проведенного анализа продиктована тем, что рассмотрение эмпирических статистических распределений метеорологических величин с учетом физических условий в период проведения измерений помогает сгруппировать экспериментальные данные наиболее удачным образом для того, чтобы лучше разобраться в сложных физических процессах, протекающих в приземном слое атмосферы.

В **третьей главе** представлены результаты исследования вариаций атмосферно-электрических характеристик приземного слоя, определяющие процессы переноса заряда вблизи земной поверхности и из атмосферы на землю. Особенностью измерительного комплекса является его замкнутость относительно величин, входящих в закон Ома (удельной электропроводности воздуха, напряженности электрического поля, плотности тока), то есть все эти величины измерялись независимыми методами. Это позволяет выделить условия, когда наблюдаются нелинейные эффекты, а также установить наличие процессов переноса заряда силами неэлектрического происхождения.

Измерения плотности полного вертикального тока i и плотности тока механического переноса i_{mn} из атмосферы на землю проводились методом пластины. Над пластиной для измерения i_{mn} на высоте 20 сантиметров устанавливается медная заземленная сетка, которая, не изменяя заметно турбулентный обмен, отсекает электрическое поле атмосферы, вследствие чего, атмосферный ток проводимости под такой экран не проникает, в то время как ток переноса осуществляется свободно (рис. 1).

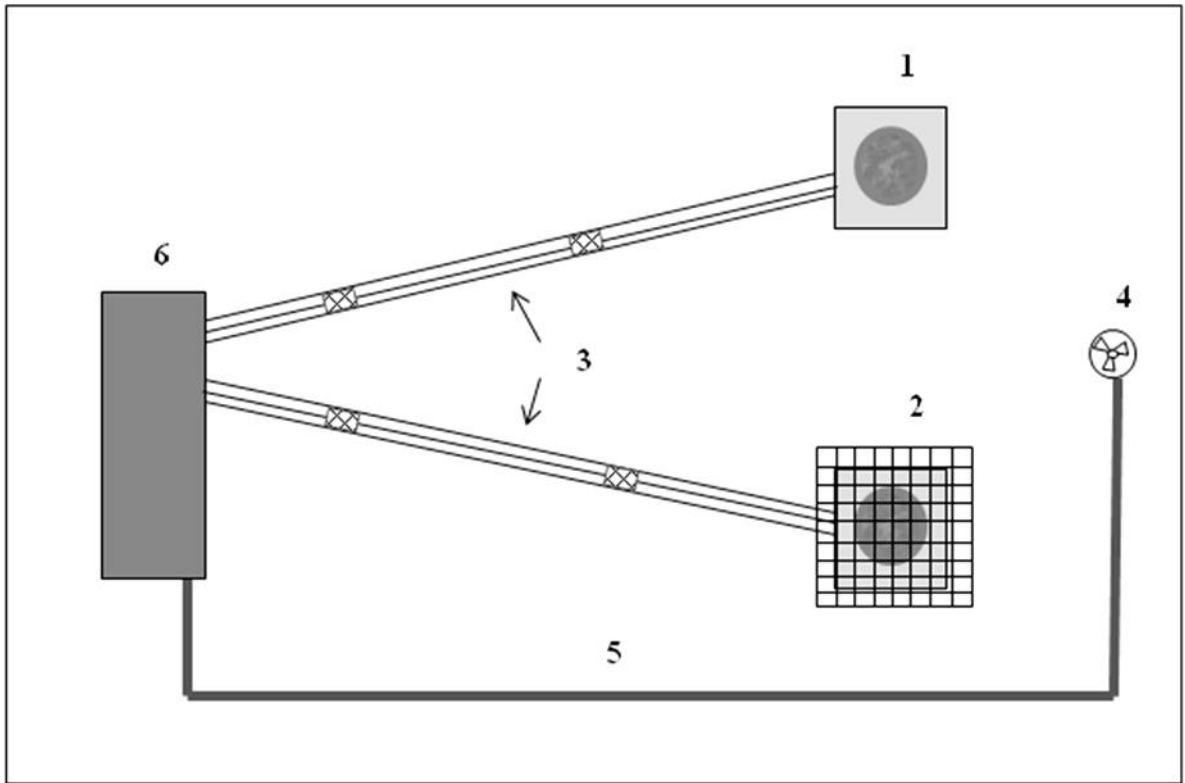


Рис. 1. Схема размещения датчиков установки для измерения вертикальных электрических токов (в масштабе 1:80):

1 – пластина для измерения плотности полного тока, 2 – пластина для измерения плотности тока механического переноса, 3 – экранированный соединительный провод, 4 – флюксметр, 5 – соединительный кабель флюксметра, 6 – навес для измерительных и регистрирующих приборов.

Плотность тока проводимости на земную поверхность определялась, исходя из соотношения $i_{\lambda} = i - i_{mn}$.

Измерения полярных проводимостей воздуха (λ_{\pm}) проводились методом аспирационного конденсатора с наружным диаметром 70 миллиметров, который располагался непосредственно над земной поверхностью. Измерения напряженности (E) электрического поля атмосферы на уровне земли проводились с помощью электростатического флюксметра. Методом радиоактивного коллектора измерялись потенциалы φ электрического поля на высотах 1, 2 и 3 метра.

Общей закономерностью суточного хода плотности тока проводимости на землю и в атмосфере в слое до 2,0 м для пунктов Ростовской области является наличие ночного максимума и дневного минимума. Эти вариации синхронны с изменениями электропроводности в течение суток в этом слое. Ночной максимум обусловлен более устойчивым состоянием атмосферы, при котором уменьшается турбулентное перемешивание более богатого легкими ионами приземного слоя воздуха со слоями, расположенными выше. Днем

увеличение интенсивности турбулентного обмена приводит к обеднению ионами нижнего слоя воздуха.

Значения электропроводности в слое 2,0-3,0 м мало меняются в течение суток, поэтому на изменения плотности тока проводимости со временем в этом слое вариации напряженности электрического поля влияют в большей степени, чем вариации электропроводности. Размах вариации тока проводимости в слое 1,0-3,0 м значительно меньше, чем в прилежащем к земле метровом слое воздуха.

На Байкале, только вблизи земной поверхности (на высоте 0,05 м) суточные вариации плотности тока проводимости хорошо согласуются с вариациями электропроводности, а выше этого уровня - с напряженностью электрического поля. Следует отметить, что размах вариаций тока проводимости с высотой увеличивается.

Изменения плотности тока механического переноса в течение суток в значительной степени определяются термодинамическим состоянием в каждом пункте наблюдений. На Байкале ток механического переноса имел два максимума 3-4 ч и 11-16 ч по местному времени и два минимума (в часы смены направления ветра: 8-9 ч и 19-20 ч). В пунктах Первомайское и Платов Ростовской области ток механического переноса принимал максимальные значения в 21 ч, а минимальные 7-9 ч по местному времени.

В разделе 3.2 представлены результаты физико-статистического анализа компонент вертикального электрического тока (тока проводимости и тока механического переноса) в прилежащем к земле трехметровом слое атмосферы и из атмосферы на земную поверхность. Для каждого периода измерений приведена описательная статистика массивов экспериментальных данных. Для пунктов Ростовской области ток механического переноса на землю в среднем имеет отрицательное значение, а в районе озера Байкал i_{mn} положителен (таблица 2).

Таблица 2

	Ростовская область						Байкал	
	Ростов-на-Дону		Первомайское		Михайловка		Б. Коты	
	i_{λ}	i_{mn}	i_{λ}	i_{mn}	i_{λ}	i_{mn}	i_{λ}	i_{mn}
Среднее, пА/м ²	0,93	-0,30	1,23	-0,38	2,45	-0,42	0,99	0,52
Стандартное отклонение	0,52	0,40	0,71	0,50	1,48	0,80	0,48	0,25
коэффициент вариации, %	56%	133%	58%	132%	60%	190%	48%	48%
Число часовых серий	175		136		854		158	

Из соотношения i_{mn} и i_{λ} видно, что полный ток в среднем сообщает земле положительный заряд. В то же время, в отдельные часы измерений он может приносить на землю отрицательный заряд: если i_{mn} , отрицателен и по абсолютной величине превосходит положительный ток проводимости.

Данные о часовых сериях измерений с нормальным направлением электрического поля и среднечасовыми значениями напряженности не более 500 В/м представлены в таблице 3.

Таблица 3.

	Байкал		Михайловка		Первомайское	
	число часовых серий	%	число часовых серий	%	число часовых серий	%
1. $E > 0$	160	100%	862	100%	125	100%
2. «хорошая погода»	93	58%	675	78%	27	22%
3. $-0,05 < Ri < 0,05$	98	61%	224	26%	71	57%
4. $0,90 < \Omega < 1,10$	7	4%	339	39%	18	14%
5. $0,95 < \Omega < 1,05$	3	2%	193	22%	17	14%
6. $-0,10 < i_{mn} < 0,10$ пА/м ²	2	1%	187	22%	36	29%

Из них отобраны те, которые по метеорологическим параметрам можно отнести к «условиям хорошей погоды» (вторая строка таблицы). Кроме того, выбраны часы, когда атмосферу можно считать нейтрально стратифицированной ($-0,05 < Ri < 0,05$), а также серии измерений, когда критерий Долезалека был близок к 1 ($0,90 < \Omega < 1,10$ и $0,95 < \Omega < 1,05$).

Для оценки действия локального генератора выбран условный интервал значений i_{mn} ($-0,10 \text{ пА/м}^2 < i_{mn} < 0,10 \text{ пА/м}^2$), когда можно считать ток механического переноса малым: в среднем для всех пунктов наблюдений в этих случаях i_{mn} не превышает 10 % от тока проводимости. По данным эксперимента в Ростовской области такие значения i_{mn} наблюдались почти в 30% всех часовых серий измерений, а на Байкале значения i_{mn} попадали в этот интервал крайне редко.

Из данных таблицы видно, что в большинстве случаев даже при отсутствии нарушающих метеоусловия факторов, действием локального генератора пренебрегать нельзя.

Для компонент вертикального электрического тока из атмосферы на землю построены эмпирические вариационные ряды и рассчитаны теоретические кривые, соответствующие нормальному распределению каждого параметра (рис. 2, рис. 3).

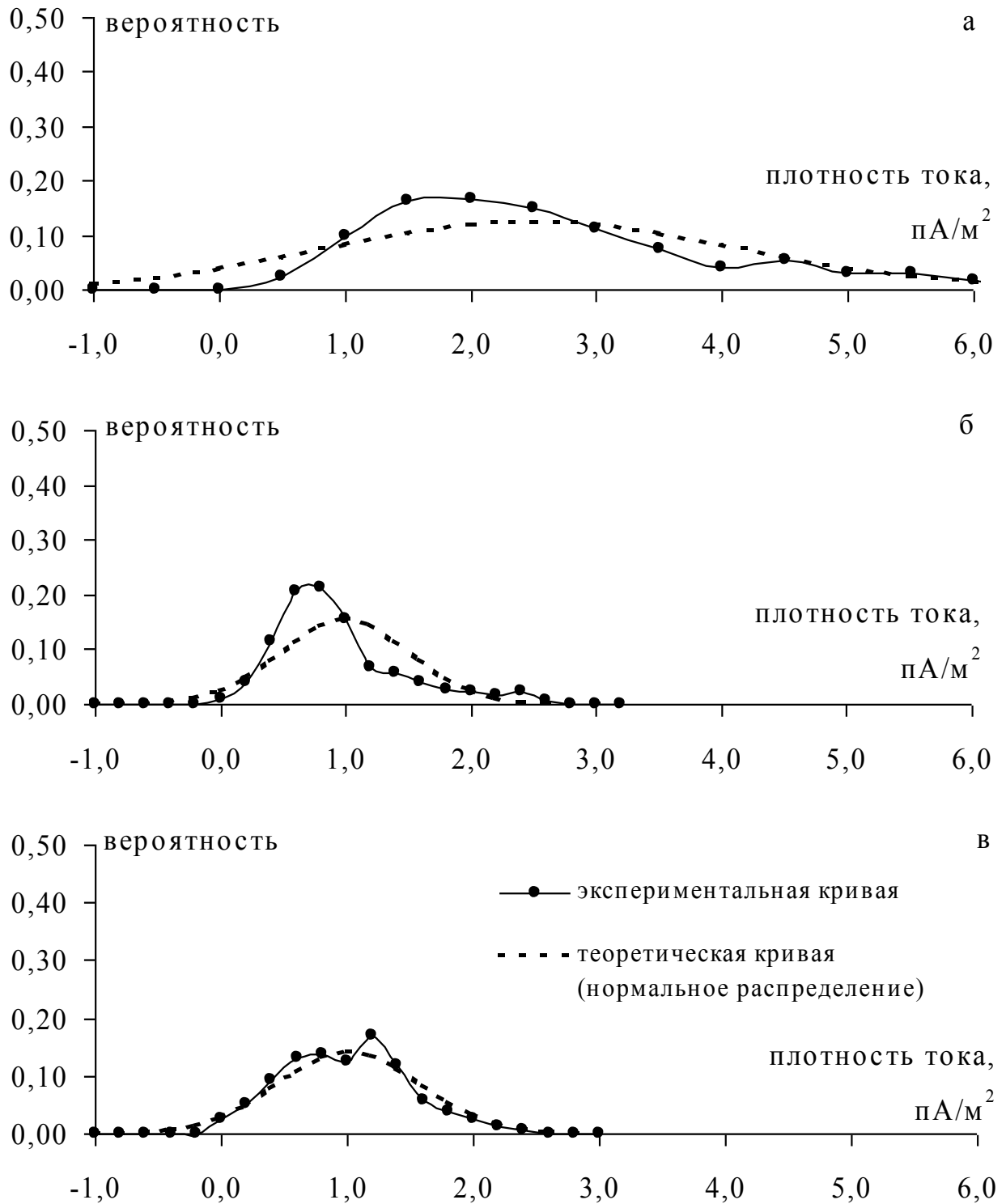


Рис. 2. Плотность тока проводимости: эмпирические и вычисленные по нормальному закону кривые распределения

а) Михайловка, Ростовская область, 1995-1998 (864 часовые серии),

б) окраина г. Ростова-на-Дону, 1987 (175 часовых серий)

в) Байкал, 1991 (169 часовых серий)

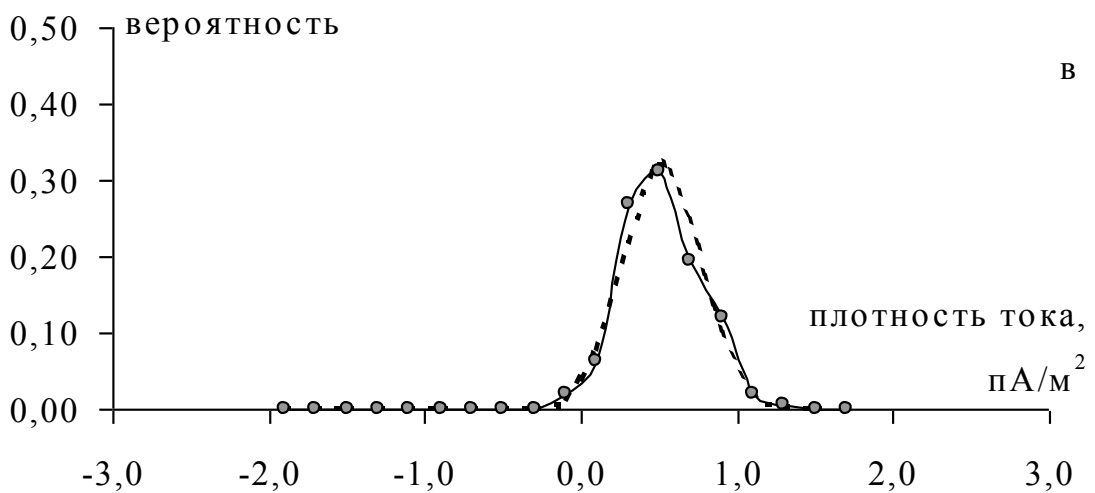
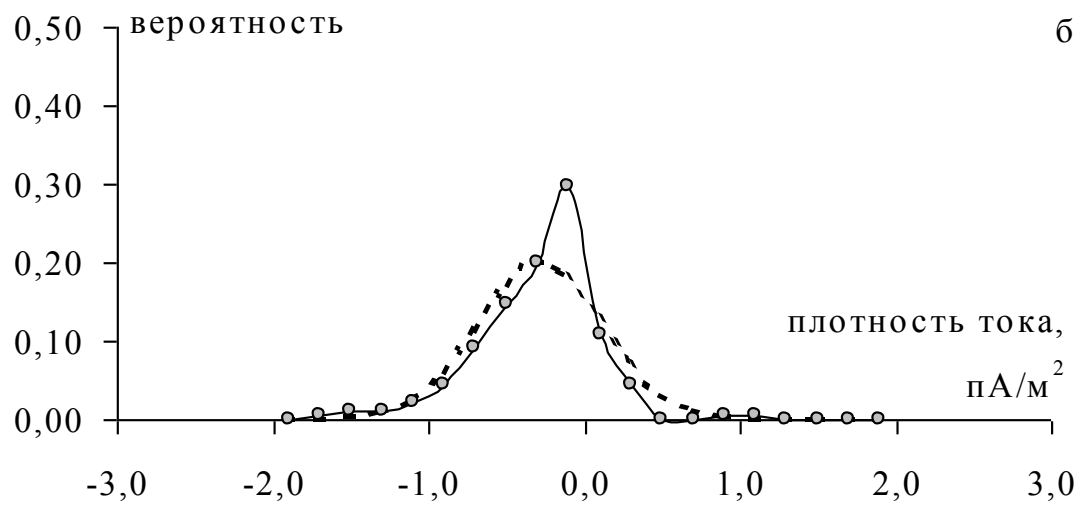
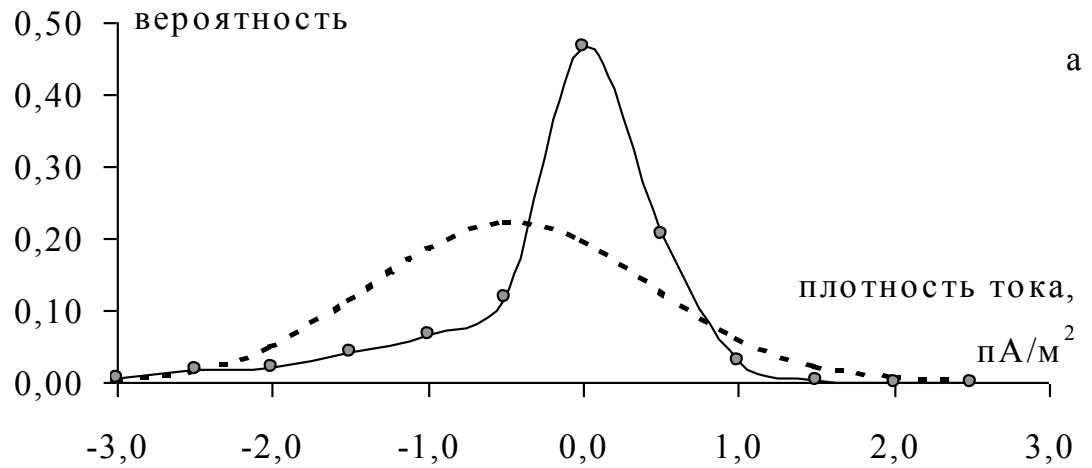


Рис.3. Плотность тока механического переноса: эмпирические и вычисленные по нормальному закону кривые распределения
 а) Михайловка, Ростовская область, 1995-1998 (864 часовые серии),
 б) окраина г. Ростова-на-Дону, 1987 (175 часовых серий)
 в) Байкал, 1991 (169 часовых серий)

Для всех пунктов Ростовской области экспериментальные распределения плотности тока механического переноса i_{mn} обнаруживают левостороннюю (отрицательную) асимметрию и положительный эксцесс по сравнению с нормальным распределением. Экспериментальные распределения плотности тока проводимости i_{λ} , соответственно, – правостороннюю (положительную) асимметрию и положительный эксцесс по сравнению с нормальным распределением. Отклонение от нормального распределения экспериментальной кривой плотности тока проводимости, очевидно, объясняется значительными изменениями электропроводности воздуха под влиянием высокой радиоактивности с одной стороны, аэрозольного загрязнения – с другой. Неоднородность выборки плотности тока механического переноса для пунктов Ростовской области связана с тем, что в данном районе условия перемешивания в атмосфере сильно изменяются от дня к ночи. Вследствие того, что перенос заряда из атмосферы на землю, осуществляемый посредством тока механического переноса, имеет различный механизм в случае турбулентной атмосферы (турбулентная диффузия) и при отсутствии турбулентного перемешивания (молекулярная диффузия), при анализе экспериментального материала каждый из этих случаев рассматривался отдельно.

Что касается байкальских данных, следует отметить, что эмпирические распределения плотности тока проводимости на границе атмосфера-земля i_{λ} и плотности тока механического переноса из атмосферы на землю i_{mn} , построенные по данным Байкальской экспедиции 1991 года, близки к нормальному. Однородность массива плотности тока проводимости можно объяснить отсутствием влияния аэрозоля на электропроводность воздуха в чистой атмосфере байкальской измерительной площадки, а наличие близких грунтовых вод объясняет слабое поступление радиоактивных эманаций с почвенным газом в атмосферу.

По-видимому, массив данных плотности тока механического переноса так же является однородным, поскольку интенсивность перемешивания нижнего слоя атмосферы на берегу озера Байкал мало изменяется в течение суток, в связи с бризовой циркуляцией.

В четвертой главе исследуется влияние процессов переноса электрического заряда в приземном слое атмосферы на формирование электродинамической структуры этого слоя.

По результатам измерений построены вертикальные профили плотности тока проводимости, плотности полного тока и плотности тока механического переноса. Оказалось, что ток проводимости претерпевает самые значительные изменения вблизи поверхности земли до высоты 0,3 м. Дивергенция вертикального тока проводимости, изменяя величину и распределение объемного заряда в этом слое, влияет на диффузионную составляющую тока механического переноса из атмосферы на землю.

При исследовании профилей тока проводимости вблизи поверхности земли было обнаружено, что имеется связь между объемным зарядом, образующимся вблизи земной поверхности в результате дивергенции тока проводимости, и плотностью тока механического переноса из атмосферы на землю. Дивергенцию тока проводимости в нижнем 5-сантиметровом слое атмосферы можно оценить величиной Δi_λ – разности плотности тока проводимости λE в атмосфере на уровне 0,05 м и плотности тока проводимости i_λ на земную поверхность.

Получены уравнения линий регрессии плотности тока механического переноса i_{mn} из атмосферы на землю по Δi_λ . Связь между этими величинами описывается линейными уравнениями $i_{mn} = a \cdot \Delta i_\lambda + b$, параметры уравнений a и b для различных метеоусловий приведены в таблице 4 и 5.

Таблица 4.

	день		ночь		тихие часы	
	a	b	a	b	a	b
Байкал	0,05	0,46	0,01	0,48	0,60	0,12

Установлено, что для Байкальских наблюдений зависимость i_{mn} от Δi_λ днем и ночью практически отсутствует. Как уже отмечалось, в районе озера Байкал в связи с бризовой циркуляцией ветрено и днем, и ночью, а градиенты температур малы. Эти условия характерны для безразличной стратификации атмосферы. В утренние и вечерние часы, в период смены направления ветра, наблюдалась устойчивая стратификация. В это время обнаруживается линейная зависимость i_{mn} от Δi_λ близкая к прямой пропорциональности.

При рассмотрении эмпирических рядов регрессии для пунктов Ростовской области между i_{mn} и Δi_λ обнаруживается линейная связь. Оказалось, что в с. Михайловка линии регрессии, полученные и для дневных, и для ночных условий, близки к прямой пропорциональности.

Таблица 5.

	день		ночь		тихая ночь		ветреная ночь		ветреная холодная ночь	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Михайловка	0,52	0,17	0,12	-0,06	0,10	-0,06	0,45	0,26	-0,005	-0,08
Первомайское	0,17	-0,32	0,58	-0,64	0,70	-0,61	0,23	-0,20	-0,002	0,08

Это позволяет предположить, что процесс формирования объемного заряда в результате дивергенции тока проводимости для этого пункта наблюдений является определяющим в создании тока механического

переноса на землю, поскольку при нулевой дивергенции плотности тока проводимости i_{mn} близка к нулю, т.е. ток механического переноса отсутствует. В с. Первомайском зависимость i_{mn} от Δi_λ линейная. Здесь при значениях разности $\lambda E - i_\lambda$ близких к нулю, наблюдается заметный ток механического переноса, что указывает на наличие других процессов, влияющих на механический перенос зарядов из атмосферы на земную поверхность. Возможно это процессы, связанные с перемещением тяжелых ионов под действием механических сил, например, седиментации. Учитывая, что коэффициент турбулентности на уровне земной поверхности равен нулю, механический перенос ионов из прилежащего к земле слоя атмосферы на поверхность происходит в результате процесса молекулярной диффузии. Поскольку коэффициент диффузии для тяжелых ионов на три порядка меньше коэффициента молекулярной диффузии для легких ионов, процесс диффузии тяжелых ионов, по-видимому, вносит незначительный вклад в механический перенос заряда из атмосферы в рассматриваемых условиях, а диффузия легких ионов играет определяющую роль в механическом переносе на границе атмосфера-земля.

Детальное рассмотрение электрических процессов для различных типов ночных условий в пунктах Ростовской области позволило выделить условия, когда механический перенос зарядов из атмосферы на землю незначителен, и не зависит от интенсивности процессов формирования объемного заряда в результате дивергенции тока проводимости. Это происходит ветренными холодными ночами, когда не наблюдается заметных градиентов температуры.

Для выяснения условий, наиболее способствующих попаданию зарядов на земную поверхность под действием механических сил, наряду с измерениями плотности тока проводимости и плотности тока механического переноса отслеживались изменения скорости вертикальных потоков в прилежащем к земле слое атмосферы. Выяснилось, что по интенсивности переноса зарядов из атмосферы на землю посредством механического переноса можно выделить три типа условий:

- интенсивная турбулентность и восходящие потоки воздуха (скорость вертикальных потоков от 0,2 до 1,00 м/с), соответствует слабому переносу зарядов (рис.4а);
- слабая турбулентность и слабые вертикальные потоки (скорость вертикальных потоков от -0,2 до 0,2 м/с) при неустойчивой стратификации атмосферы ($\Delta T < 0$) соответствует более интенсивному переносу зарядов, чем в первом случае (рис.4б);
- слабая турбулентность, слабые вертикальные потоки воздуха (скорость вертикальных потоков от -0,2 до 0,2 м/с) состояние температурной инверсии ($\Delta T > 0$) соответствует наиболее интенсивному переносу зарядов (рис.4в).

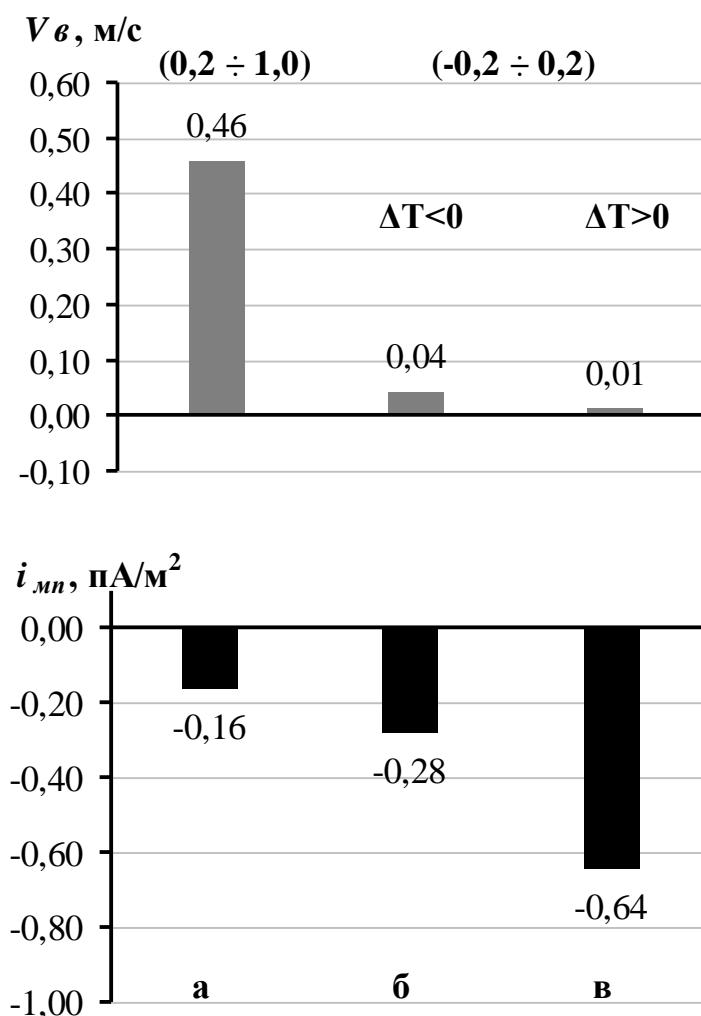


Рис. 4. Плотность тока механического переноса при различных скоростях вертикального движения воздуха (х. Платов 2003-2004 гг.)

В разделе 4.3 проводится сравнительный анализ накопленных экспериментальных данных о процессах переноса заряда в атмосфере и результатами теоретических расчетов параметров электродного слоя.

Экспериментальные данные о профилях тока проводимости вблизи земной поверхности в пунктах Ростовской области и на Байкале качественно согласуются с рассчитанным профилем плотности тока проводимости по численной модели турбулентного электродного эффекта, приведенного в монографии Куповых Г.В., Морозова В.Н. и Шварца Я.М. (рис. 5). Данные о плотности тока для сравнения приведены в относительных единицах.

При расчетах нетурбулентного случая полагается, что плотность тока проводимости с высотой не изменяется, однако, по данным эксперимента обнаруживается значительное изменение плотности тока проводимости с высотой в отсутствии турбулентного перемешивания, особенно в нижнем метровом слое, что указывает на существование механического переноса зарядов.

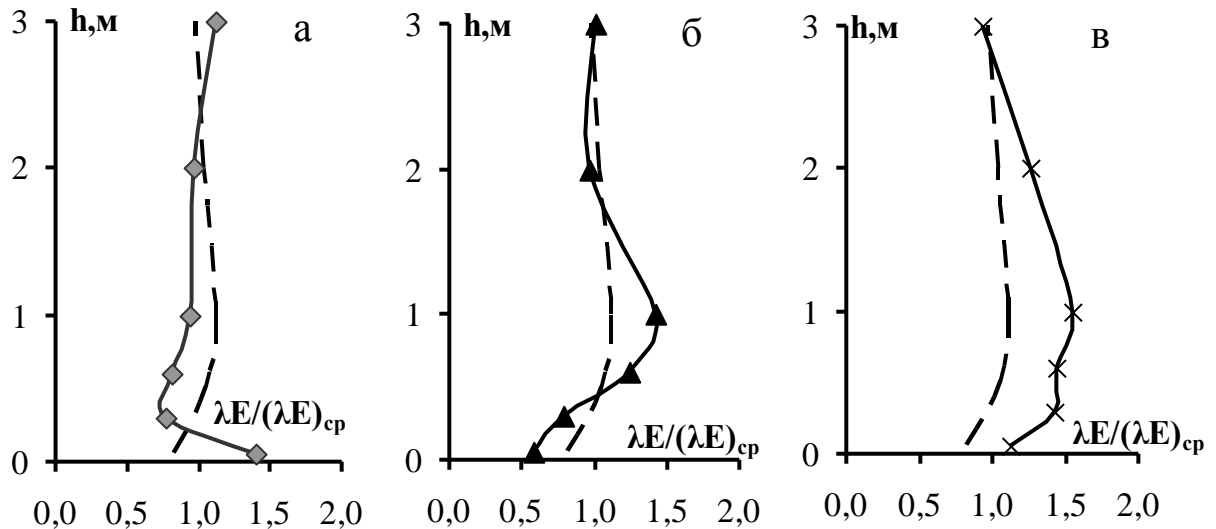


Рис. 5. Теоретические профили плотности тока проводимости (пунктирная линия) в атмосфере по результатам численного эксперимента для турбулентного электродного эффекта и экспериментальные данные о плотности тока проводимости в слое до 3 м в различных пунктах наблюдений:

а) Байкал 1991 г., б) Михайловка 1995-1998 гг., в) Платов 2003 г.

Таким образом, обнаруживается несоответствие экспериментальных данных о процессах переноса заряда в атмосфере для нетурбулентного случая с результатами теоретических расчетов для классического электродного эффекта. Как уже отмечалось, если турбулентный обмен отсутствует, то перераспределение заряда будет происходить в результате молекулярной диффузии. Учитывая значительные градиенты объемного заряда, наблюдающиеся в этих условиях, плотность тока механического переноса может быть заметной.

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

1. Данные наблюдений показывают, что в ненарушенных условиях полный вертикальный ток в атмосфере и из атмосферы на землю включает не только ток проводимости, но и ток механического переноса зарядов, который, связан с диффузионными и конвективными процессами в атмосфере.

2. Для всех пунктов Ростовской области экспериментальные распределения плотности тока проводимости i_λ , и плотности тока механического переноса i_{mn} обнаруживают асимметрию и эксцесс по сравнению с нормальным распределением. Эмпирические распределения i_λ и i_{mn} , построенные по данным наблюдений на Байкале, близки к нормальному. Это связано с условиями формирования электродинамического режима атмосферы в каждом пункте наблюдений.

3. Вблизи земной поверхности имеет место сложное вертикальное распределение электрических характеристик атмосферы (одномерная задача), что связано с близостью границы раздела двух сред, являющейся источником ионизирующих излучений и эманаций радиоактивных газов, а так же с наличием в атмосфере объемных зарядов различного происхождения. В таких условиях ток проводимости изменяется по высоте в прилегающем к земле слое воздуха, что приводит к изменению плотности объемного заряда пропорционально дивергенции тока проводимости в этом слое. При устойчивой и неустойчивой стратификации обнаруживается линейная зависимость плотности тока механического переноса от дивергенции тока проводимости вблизи земной поверхности. В часы, когда наблюдается безразличная стратификация в сочетании с низкой температурой воздуха и большой скоростью ветра, эта связь отсутствует.

4. Экспериментальные данные о профилях тока проводимости вблизи земной поверхности качественно согласуются с рассчитанным профилем по численной модели турбулентного электродного эффекта. Обнаруживается несоответствие экспериментальных данных о процессах переноса заряда в атмосфере для нетурбулентного случая с результатами теоретических расчетов для классического электродного эффекта.

5. В электродном слое проявляются нелинейные эффекты, связанные с зависимостью электропроводности от напряженности электрического поля, это проявляется в утрате пропорциональности плотности тока проводимости от напряженности, причем нелинейность проявляется заметнее при низких значениях электропроводности.

6. Перенос заряда из атмосферы на землю, осуществляемый посредством тока механического переноса, имеет различный механизм в случае турбулентной атмосферы (турбулентная диффузия) и при отсутствии турбулентного перемешивания (молекулярная диффузия), при анализе экспериментального материала каждый из этих случаев рассматривался отдельно.

7. Интенсивность механического переноса заряда из атмосферы на землю зависит от стратификации атмосферы вблизи земной поверхности:

- Неустойчивая стратификация, наблюдается в дневное время, характеризуется интенсивной турбулентностью и наличием восходящих потоков воздуха, обнаруживаются слабые процессы переноса заряда;
- Безразличная стратификация, когда отмечается слабая турбулентность и слабые вертикальные потоки, характеризуется более интенсивными процессами переноса заряда, чем в первом случае;
- Устойчивая стратификация, характерна для тихих ночей, вертикальные пульсации воздуха отсутствуют или слабы, обеспечивается наиболее интенсивный перенос заряда из атмосферы на землю.

8. В качестве критерия оценки условий «хорошей погоды» для определения периодов отсутствия возмущений, вызванных действием

локального генератора предложен условный интервал значений плотности тока механического переноса i_{mn} ($-0,10 \text{ пА/м}^2 < i_{mn} < 0,10 \text{ пА/м}^2$), когда можно считать ток механического переноса абсолютно малым: в среднем для всех пунктов наблюдений в этих случаях i_{mn} не превышает 10 % от тока проводимости.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Панчишкина И.Н., Петров А.И., Петрова Г.Г., Куповых Г.В., Петров Н.А., Кривошеев А.П. Вертикальные электрические токи в атмосфере и их роль в формировании электродинамической структуры приземного слоя Известия высших учебных заведений, Сев.- Кав. рег., Естест. Науки №5, 2008, с. 42-48.
2. 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.
3. Петров А. И., Петрова Г. Г., Панчишкина И. Н., Петров Н. А., Кривошеев А. П. Влияние процессов переноса в приземном слое на обмен зарядом между атмосферой и землей. // Сборник трудов VI Российской конференции по атмосферному электричеству, Н.Новгород, ИПФ РАН, 2007, с.85-87.
4. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н. Влияние индустриального загрязнения воздушного бассейна на электропроводность атмосферы в Ростове-на-Дону. // Труды ГГО, Вып.527, 1990, с.41-43.
5. 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.
6. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н. Измерения компонент вертикального атмосферно-электрического тока в г. Ростове-на-Дону // Труды ГГО, Вып.514, 1988, с.17-22.
7. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В. Физико-статистический анализ атмосферно-электрических характеристик приземного слоя. Труды НИЦ ДЗА (Филиал ГГО), вып. 7, 2006, с. 182-190.
8. 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.
9. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Соловьев М.Ю. Экспериментальные профили атмосферно-электрических характеристик в электродном слое. // Сборник трудов VI Российской конференции по атмосферному электричеству, Н.Новгород, ИПФ РАН, 2007, с.87-89.

10. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н. Экспериментальные исследования тока механического переноса. Труды НИЦ ДЗА (Филиал ГГО), вып. 7, 2006, с. 176-181.
11. 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, № 5, 2004, с.175-179.
12. Panchishkina I.N., Petrova G.G., Petrov A.I., Kudrinskaja T.V. Space charge generation in the atmosphere and the density of mechanical transfer current to the ground. // Proc.13th Int. Conf. Atm. Electricity. Beijing, China, 2007, p. 166-169.
13. 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, p. 547-550.
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. 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, p. 548-551.
16. 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, p.188-191,
17. 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.
18. Petrov A.I., Petrova G.G., Panchishkina, I.N. Profiles of polar conductivities and of radon-222 concentration in the atmosphere by stable and labile stratification of surface layer. // Proc.13th Int. Conf. Atm. Electricity. Beijing, China, 2007, p. 131-134.