

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Факультет математики, информатики и физики

# Дипломная работа

на тему:

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАДИЕНТА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В  
ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

**Исполнитель:**

студентка 5 курса стационара  
факультета Математики  
Информатики и Физики  
*Старостина Ольга Павловна*

**Научный руководитель:**

канд. физ.-мат. наук, доцент  
*Петрова Галина Григорьевна*

**Рецензент:**

канд. физ.-мат. наук, доцент  
*Демехина Людмила Алексеевна*

Ростов-на-Дону  
2010

## Оглавление

Введение.....	3
<b>Глава 1. Атмосферное электрическое поле и методы измерения его характеристик.....</b>	<b>5</b>
1.1. Атмосферное электрическое поле и глобальная электрическая цепь.....	5
1.2. Методы измерения напряжённости электрического поля и градиента потенциала.....	10
1.3. Методы измерения объёмного заряда лёгких ионов.....	17
1.4. Общие особенности поведения атмосферно-электрического поля.....	19
<b>Глава 2. Экспериментальные исследования характеристик электрического поля в приземном слое атмосферы.....</b>	<b>24</b>
2.1. Экспериментальные профили градиента потенциала электрического поля в приземном слое атмосферы .....	24
2.2. Объёмный заряд лёгких и тяжёлых ионов.....	29
2.3 Влияние возмущающих факторов на характер вариаций градиента потенциала.....	31
2.4 Роль радона-222 в формировании пространственно - временных вариаций градиента потенциала.....	33
Заключение.....	39
Список литературы.....	40

## **Введение**

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию характеристик электрического поля в приземном слое атмосферы.

Электрическое поле атмосферы очень изменчиво. При этом важно разделять глобальные (т.е. планетарного масштаба), региональные и локальные электрические поля. Последние, в свою очередь, напрямую связаны как с изменениями ионно-аэрозольного состава, так и с физическими условиями среды.

Важной частью изучения закономерностей поведения формирования электродного слоя атмосферы является исследование вертикального распределения основных атмосферно-электрических характеристик, в частности объёмного заряда, а следовательно и напряженности поля. Вертикальное распределение градиента потенциала определяется совокупным действием многих факторов: это электродный эффект, изменение интенсивности ионообразования по высоте, влияние аэрозоля, метеорологические условия атмосферы.

Цель работы состоит в экспериментальном исследовании поведения градиента электрического потенциала и его вертикального распределения в приземном слое атмосферы с учетом его физического состояния.

### **Задачи исследования:**

– Рассмотрение основных теорий возникновения электрического поля атмосферы и целью выявления основных направлений современных исследований пространственно-временных вариаций градиента электрического потенциала приземного слоя атмосферы;

– Исследование вертикального распределения градиента электрического потенциала;

– Исследование влияния возмущающих факторов на характер вариаций характеристик электрического поля.

В предлагаемом исследовании использовались экспериментальные данные экспедиций, проводимых лабораторией геофизических исследований кафедры

общей и экспериментальной физики педагогического института Южного федерального университета (ПИ ЮФУ). Для анализа привлекался экспериментальный материал, полученный в экспедиционных исследованиях в сельскохозяйственном степном районе Ростовской области (х. Платов и х. Талловеров Кашарского района) в летние месяцы.

Комплекс измерений для различных пунктов наблюдения сохранялся неизменным и включал одновременные градиентные измерения атмосферно-электрических параметров (удельной электрической проводимости атмосферы, градиента потенциала электрического поля, концентрации радона-222) и метеорологических (температуры почвы и воздуха, скорости ветра). Измерения потенциала атмосферы проводились методом радиоактивного коллектора на 4-х высотах (0,5м, 1м, 2м, 3м), что позволило определить градиент потенциала для разных уровней. Значения электрического потенциала регистрировали поочерёдно с каждого коллектора многократно в течение 30 минут, а затем усреднялись, и в результате использовались среднечасовые значения потенциала для каждого уровня. Напряжённость электрического поля атмосферы непосредственно вблизи земной поверхности регистрировалась с помощью флюксметра системы ГГО.

При обработке результатов эксперимента применялись статистические методы. Обработка данных велась с помощью Microsoft Excel.

## **1. Атмосферное электрическое поле и методы измерения его характеристик**

### **1.1. Атмосферное электрическое поле и глобальная электрическая цепь**

Развитие атмосферного электричества тесно связано с именами крупнейших физиков, таких как М.В. Ломоносов, Г.В. Рихман, Ш. Кулон, Франклин, Далибар, А. Вольта и многие другие.

Уже в 18 веке появился первый, хотя и очень скудный экспериментальный материал в области атмосферного электричества и метеорологии. Далибар, Франклин и Рихман независимо друг от друга проводили эксперименты по изучению электрических разрядов в воздухе. На основе экспериментов Лемонье было установлено, что электрические явления происходят и в безоблачной атмосфере. О том, что воздух проявляет электрические свойства постоянно, писал М.В.Ломоносов. Опытным путем Де Соссюр, а затем и Бекарий установили суточные и сезонные изменения интенсивности атмосферно-электрических эффектов.

Ломоносов в своей теории отмечал важную роль восходящих и нисходящих потоков в процессе образования атмосферного электричества. Однако, существовали теории, не получившие позже экспериментального подтверждения. Так, например, Пельтье выдвинул идею об извечной отрицательной электризации земли. Он, как и А. Вольта предлагал объяснять разность потенциалов между землей и атмосферой наличием круговорота воды в природе, полагая, что разделение заряда происходит при испарении воды [2]. Эта идея в несколько измененном виде высказывается и сейчас.

Значительные успехи в исследовании атмосферного электричества были достигнуты в 19 веке, когда появились новые приборы и методы измерений. Наибольший вклад в науку об атмосферном электричестве был сделан Кельвином. Он впервые свел в единое целое разрозненные наблюдения электрических явлений, существенно развил теорию электростатики и применил ее для объяснения атмосферно-электрических процессов, усовершенствовал

некоторые методы экспериментальных исследований. По Кельвину электрическое поле в атмосфере есть следствие распределения заряда в атмосфере над земной поверхностью, а не на бесконечности. Многие идеи Кельвина оказалось невозможно реализовать на современном ему этапе развития науки, они были осуществлены значительно позднее.

Естественное электрическое поле Земли, которое наблюдается в атмосфере (над земной и водной поверхностями), обусловлено сложным комплексом геофизических явлений. Существование электрического поля в атмосфере Земли связано в основном с процессами ионизации воздуха и пространственным разделением возникающих при этом положительных и отрицательных электрических зарядов. Ионизация атмосферы происходит под действием космических лучей ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца; излучения радиоактивных веществ, имеющих в почве и воздухе; электрических разрядов в атмосфере и т.д. Для приземного слоя атмосферы основными ионизаторами являются космические лучи и излучения радиоактивных элементов.

Электрическое поле, как известно, характеризуется напряженностью электрического поля в той или иной точке. Напряженность является векторной величиной и в любой точке направлена по касательной к силовой линии поля, проходящей через эту точку. Численно напряженность электрического поля равна градиенту электрического потенциала, т.е. изменению потенциала на единицу длины силовой линии. Градиент потенциала также является векторной величиной, причем по направлению противоположной напряженности:  $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\phi$  (1). В атмосферном электричестве часто используют именно градиент потенциала, который выражается в В/м.

Если земная поверхность плоская без выступающих предметов, то в этом месте электрическое поле можно считать однородным, т.е. напряженность поля одинакова в данный момент времени по величине и направлению; силовые линии представляют собой параллельные прямые, направленные вертикально от поверхности земли. При этом сама земная поверхность является эквипотенциальной поверхностью с потенциалом равным нулю.

По вопросу происхождения атмосферно-электрического поля можно представить следующие основные теории атмосферного электричества, предложенные в 20-е годы прошлого века английским учёным Ч. Вильсоном и советским учёным Я.И. Френкелем. Согласно теории Вильсона, земная поверхность и ионосфера (Верхние слои атмосферы начиная от 50 до 80 км), характеризующаяся значительным содержанием атмосферных ионов и свободных электронов, играют роль обкладок шарового конденсатора, заряжаемого грозowymi разрядами. Возникающая между обкладками разность потенциалов приводит к появлению электрического поля атмосферы. Разность потенциалов между поверхностью земли и ионосферой достигает 400 кВ.

По теории Френкеля, электрическое поле атмосферы объясняется электрическими процессами, происходящими в тропосфере, - поляризацией облаков и их взаимодействием с Землёй. Влияние ионосферы при этом не учитывалось. В 50-е годы было введено понятие «местных» или «локальных» генераторов электрического поля атмосферы, под которыми понимали активные процессы образования объёмного заряда в нижней атмосфере.

Можно сказать, наблюдаемое электрическое поле вблизи земной поверхности является результатом суперпозиции глобального поля атмосферы и полей объёмных зарядов, образующихся в атмосфере в результате различных процессов.

Еще в 20-х годах прошлого века Симпсон, Маучли и Свердруп обнаружили так называемую суточную унитарную вариацию поля, т.е. синхронные изменения величины напряженности поля в целом по Земле.

Унитарная вариация атмосферного электрического поля долгое время считалась доказательством существования глобального генератора атмосферно-электрического поля. Вильсон высказал предположение, что унитарная вариация напряженности атмосферно-электрического поля вызвана грозами, которые способствуют зарядению Земли

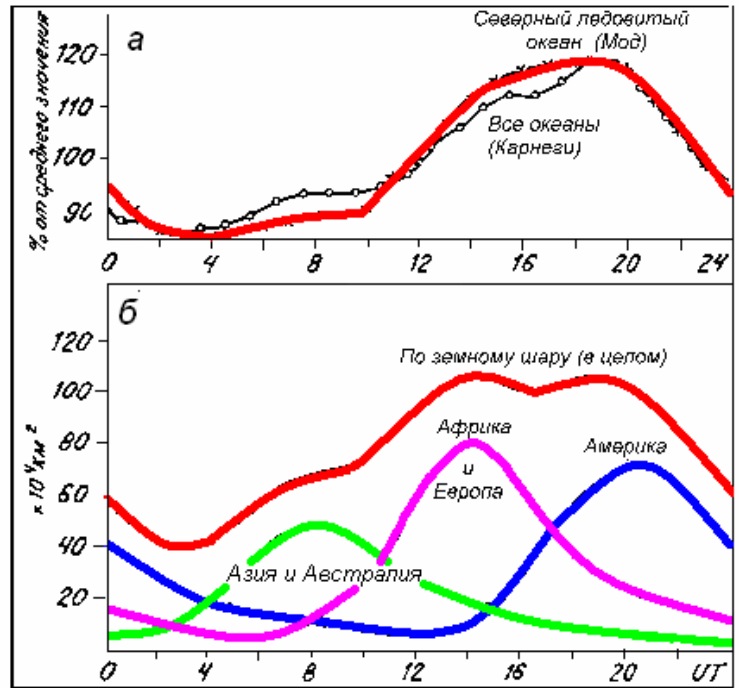


Рис.1. Унитарная вариация напряженности поля – а; распределение гроз по поверхности Земли – б

и высоких слоев атмосферы зарядами разных знаков. Эти идеи были развиты Уипплом и Скрейзом, которые установили, что суточный ход поля подобен суточному ходу площади поверхности материков Земли, занятой грозами (рис.1 [14]). Следует заметить, что подобное заявление не вполне правомерно поскольку количество гроз максимально летом, а величина напряженности атмосферно-электрического поля летом – уменьшается, кроме того грозы, как известно, чаще происходят ближе к экватору, в то время как наибольшие значения напряженности наблюдаются на средних широтах; а к полюсам и к экватору ее величина убывает.

На континентах унитарная вариация не наблюдается. Возможными причинами невыраженности унитарной вариации могут быть: электродный эффект (в условиях ненарушенного электрического поля положительные ионы движутся к земле, а отрицательные – от земли), наличие горизонтальных неоднородностей земной поверхности, неравномерное распределение объемного заряда по высоте и т.п.

В связи с необходимостью сортировки значений градиента потенциала электрического поля по глобальной и локальной составляющей можно выделить некоторый набор критериев, определяющих ненарушенные, не возмущённые в



электрическом отношении условия в атмосфере. Эти критерии названы условиями «хорошей погоды» и включают ряд требований, в числе которых: отсутствие осадков, туманов, метелей, гроз; отсутствие сильной мглы, дымки и позёмки; скорость ветра менее 3 м/с; отсутствие нижней и не выше 3 баллов верхней облачности.

Электричество «хорошей погоды» неразрывно связано с грозным электричеством и составляет часть глобальной электрической цепи - ГЭЦ (рис.2 [14]). ГЭЦ представляет собой интегральную замкнутую систему, состоящую из твёрдых и газоплазменных оболочек, образованных проводящими слоями нижней ионосферы и земной коры, с грозными генераторами в качестве основных источников ЭДС и областями свободной атмосферы в качестве зон возвратных токов, т.е. в упрощенной модели ГЭЦ земная поверхность и нижняя граница ионосферы являются обкладками сферического конденсатора, который разряжается в областях хорошей погоды и заряжается в областях грозной активности [2].

Главным фактором, определяющим величину локального атмосферного

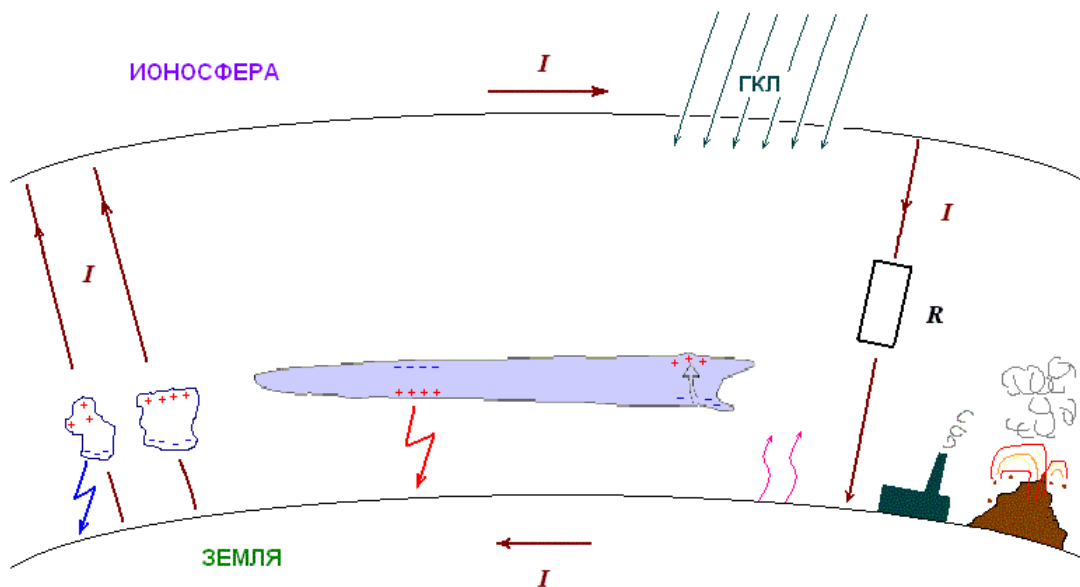


Рис.2. Схематическое изображение глобальной атмосферной электрической цепи

электрического поля, является сопротивление приземного слоя атмосферы, которое зависит от приземного ионизирующего воздействия космических лучей и радона. Эти процессы накладываются на унитарную вариацию и формируют локальные особенности.

Современные исследования глобальной электрической цепи ориентированы на изучение и выявление совокупности генераторов атмосферного электричества, а также определение степени влияния различных физических процессов в магнитосфере, ионосфере, в приземном слое атмосферы и земной коре на атмосферные электрические характеристики.

## **1.2. Методы измерения напряжённости электрического поля и градиента потенциала**

Регулярные измерения атмосферно-электрических характеристик являются основой как экспериментального, так и теоретического изучения процессов в электродном слое атмосферы. Для измерения напряжённости и градиента потенциала электрического поля существует ряд методов и разработаны многочисленные приборы. Все методы можно разделить на две обширных группы [8]. К первой группе относятся методы, основанные на использовании соотношения  $E = -\frac{d\varphi}{dh}$  (2) (косвенный метод), ко второй группе методы, которые используют связь  $E = -\frac{\sigma}{\epsilon_0}$  (3) (прямой метод).

*Косвенный метод измерения (Коллекторный метод).*

1. **Метод подвижного проводника.** Для определения градиента потенциала в однородном поле: выбирают 2 точки, находящиеся на различных высотах (А и В). Если измерить значение потенциала в этих точках ( $V_a$  и  $V_b$ ), тогда изменение потенциала при переходе из А в В ( $V_a - V_b$ ). Получим среднее значение градиента потенциала для интервала высот  $h_a - h_b$  из соотношения  $(V_a - V_b)/(h_a - h_b)$ . Для этого мы должны уметь определять разность потенциалов, либо каждый из этих потенциалов в отдельности по отношению к земной поверхности, потенциал

которой мы условно принимаем за нулевой. Сущность заключается в том, что некоторый проводник, соединённый с электрометром, помещается в точку на высоте  $h_A$ , заземляется, после чего быстро переносится на высоту  $h_B$ , тогда электрометр даст разность потенциалов  $V_a - V_b$  между двумя эквипотенциальными поверхностями, проходящими на высотах  $h_a$  и  $h_b$ . Этот метод может применяться для наблюдений над океанами, особенно во время волнения.

2. Соссюр первый использовал *метод шара* (статический принцип) для измерения полей, Затем этот метод несколько модифицировал Пальмери. Измерялись потенциалы шаров на двух уровнях, после чего определялась средняя напряжённость поля в слое между этими высотами.

3. Несколько иначе использовал *метод Пельтье*. На данной высоте  $h$  помещается изолированный проводник, обычно в форме шара, соединённый с электрометром. На таком проводнике по индукции происходит разделение зарядов, если его на мгновение заземлить, а затем на мгновение заэкранировать его от действия поля, окружив, например, заземлённым кожухом или внеся в лабораторию, то заряд, который окажется на нем, будет равен  $Q = CV_A$ , где  $C$  – ёмкость шара, измерив  $Q$  и зная  $C$ , найдём  $V_A$ . Этот метод нередко применяется для измерения поля во время гроз. Он очень трудоёмкий, не позволяет производить длительной регистрации поля и требует поддержания хорошей изоляции.

Этот же метод использовался и позже в несколько усовершенствованном виде. На рычаге укреплялось металлическое кольцо, соединённое с электрометром. При горизонтальном положении рычага кольцо было заземлено, при его повороте в вертикальное положение заземление прерывалось и по электрометру производился отчёт приобретённого заряда. Широкого применения эти методы не нашли, так как возможно искажающее действие приземных объёмных зарядов. Также ошибку может внести зарядение зондирующего тела, особенно во время осадков, тумана и т.д.

4. **Коллекторный метод.** Это наиболее простой в применении и наиболее распространенный метод. Коллектор представляет собой проводник, снабженный приспособлением, который может воспринимать потенциал некоторой точки атмосферы. Коллекторы бывают пламенные, водяные, радиоактивные. Каждый коллектор в отношении его действия может быть охарактеризован следующими величинами: емкостью (ёмкость самого коллектора, всех соединённых проводов и измерительного прибора); кажущимся сопротивлением; временем релаксации; степенью его изоляции.

Пламенные коллекторы представляют собой горящую свечу (фитиль) внутри металлической оправы. Образующиеся продукты горения уносят наведённые заряды. При горении в значительном числе образуются ионы, которые вокруг коллектора повышают проводимость атмосферы. Пламенные коллекторы имеют существенные недостатки.

Водяные коллекторы представляет собой изолированный металлический сосуд, из которого через трубку, оканчивающимся узким отверстием, непрерывно вытекает вода, а капельки играют роль пробного шарика. Чем больше количество капелек вытекает из такого коллектора и чем меньше они размерами, тем энергичнее действует такой коллектор. Такой шприц-коллектор предложил Д.А.Смирнов.

Радиоактивный коллектор представляет собой металлический диск, одна сторона которого покрыта радиоактивным веществом, излучающим  $\alpha$ -лучи с активностью порядка  $10-20$  мкКюри и защищённый сверху от внешних воздействий атмосферы металлическим кожухом. Сверху имеется клемма для соединения с измерительным прибором (электрометром или электростатическим вольтметром). Электрометр - прибор, предназначенный для измерения разностей электрических потенциалов, небольших электрических зарядов, очень малых токов (вплоть до  $10^{-15}$  А) и других электрических величин.

Принцип действия следующий: коллектор помещается в исследуемое поле, при этом радиоактивное вещество ионизирует прилегающий воздух, образуется

сильно проводящее облако ионов. Из-за высокой проводимости ионного облачка разность потенциалов между коллектором и областью, прилегающей к поверхности, будет меняться пока коллектор не примет потенциал этой области. Коллектор принимает потенциал точки, положение которой зависит от размеров ионного облачка. Следует отметить, что потенциал коллектора всегда будет немного отличаться от потенциала исследуемой точки на небольшую величину.

Для установки коллекторов можно применять следующую схему, предложенную Нориндером [8]. Две стойки высотой 3 м укрепляются на расстоянии 10 м. Между ними на подвесных изоляторах натягиваются на расстоянии 100 см друг от друга параллельно проволоки диаметром 0.5-0.8 мм, к середине которых крепятся коллекторы. Соединительные провода от коллекторов к электрометру необходимо взять длиной не менее 5-6 м, расстояние от коллекторов до наблюдателя не должно быть меньше 15 м.

Следует отметить, что данный метод пригоден лишь в условиях однородного электрического поля, поэтому необходимо выбирать место с ровной гладкой поверхностью, вдали от зданий, деревьев и пр. Этот метод невозможно использовать при осадках, пылевых бурях, метелях, так как возникает большая погрешность.

Как известно, значение градиента электрического потенциала можно рассчитать, зная значения потенциала для двух точек (А и В) и расстояние между

точками:  $grad \varphi_{AB} = \frac{\varphi_A - \varphi_B}{l_{AB}}$  (4) (рис. 3).

На основании данных градиента потенциала атмосферного электрического поля возможно определение плотности объемного заряда в атмосфере. Связь между локальным объемным зарядом и потенциалом при условии эквипотенциальности горизонтальных уровней устанавливается уравнением

Пуассона:  $\frac{d^2 \varphi}{dh^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$  (5). В случае измерения потенциала на 3-х уровнях на

Рис. 3. К определению градиента электрического потенциала и плотности объемного заряда атмосферы

равнинных площадках с помощью коллекторов решение уравнения Пуассона может быть представлено в виде  $-\rho = \varepsilon_0 (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \Delta l$ , где

$\varphi_{\text{в}}$  - градиент потенциала на верхнем уровне;

$\varphi_{\text{н}}$  - градиент потенциала на нижнем уровне;

$\Delta l$  - расстояние между крайними коллекторами.

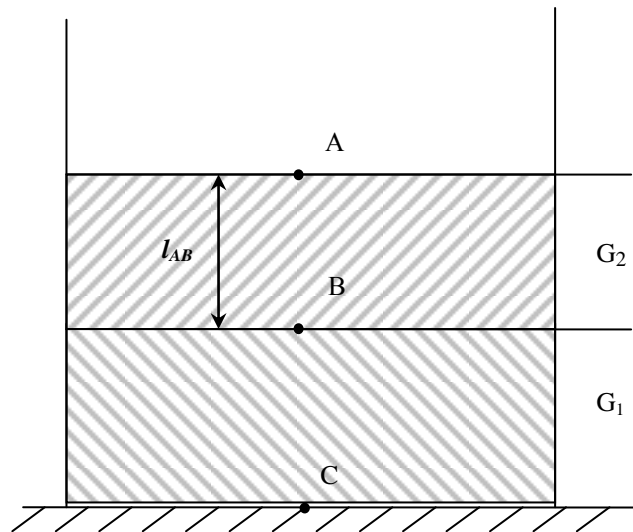


Рис. 3. К определению градиента электрического потенциала и плотности объемного заряда атмосферы

В исследовательской работе измерения потенциала атмосферы проводились методом радиоактивного коллектора на 4-х высотах по схеме Нориндера, что позволяет определять градиент потенциала для разных уровней. Значения потенциалов выполнялись поочередно с каждого коллектора многократно в течение 30 минут, а затем усреднялись, и в результате использовались среднечасовые значения потенциала для каждого уровня.

### Алгоритм проведения измерения

Измерения градиента потенциала производится 1 раз в час (00.44 – 01.16). Перед началом измерения необходимо проверить качество изоляции: посмотреть состояние изоляторов на предмет наличия паутины, росы.

1. Измерить расстояния до коллекторов (металлический проводник на котором висят изоляторы может прогибаться, растягиваться) с помощью метра.

2. Измерение потенциалов каждого коллектора:

– на приемную часть измерительного

прибора накинуть проводник,

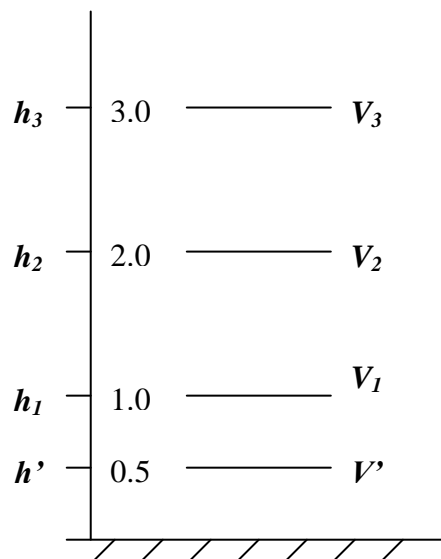
присоединенный к коллектору 1

– выждать 1 мин 30 с

– записать показания прибора

– записать показания прибора также еще  
через 10 с и через 20 с

– повторить действия для других  
коллекторов



3. Измерения произвести 4 раза.

Таблица 1.2.1. Расчетные формулы:

Градиент потенциала в нижнем 0,5 метровом слое	$G' = \frac{V'}{h'}$	
Градиент потенциала в слое от 0,5м до 1м	$G'' = \frac{V_1 - V'}{h_1 - h'}$	
Градиент потенциала в нижнем 1 метровом слое	$G_1 = \frac{V_1}{h_1}$	
Градиент потенциала в слое от 1м до 2м	$G_2 = \frac{V_2 - V_1}{h_2 - h_1}$	
Градиент потенциала в слое от 2м до 3м	$G_3 = \frac{V_3 - V_2}{h_3 - h_2}$	
Градиент потенциала в нижнем 2 метровом слое	$G_4 = \frac{V_2}{h_2}$	
Градиент потенциала в слое от 1м до 3м	$G_5 = \frac{V_3 - V_1}{h_3 - h_1}$	
Плотность объемного заряда в слое от 1 до 3м	$\rho_e = -\varepsilon_0 \frac{G_3 - G_2}{h_3 - h_1}$	$\rho_n = -\varepsilon_0 \frac{G_2 - G_1}{h_2}$

Прямой

метод измерения.

Для измерения напряженности электрического поля атмосферы на уровне земли применяется генераторный метод с использованием ротационного электростатического флюксметра [11]. Способ основан на периодическом

преобразовании постоянного потока электростатической индукции измеряемого поля в переменный у поверхности воспринимающего элемента (измерительной пластины) с помощью модулятора (экранной пластины). Поэтому во всех конструкциях существует элемент, за счет периодического перемещения которого меняется величина электрического поля на электроде, воспринимающим поле. Изменение величины потока обуславливает изменение величины связанного с ним заряда на воспринимающем элементе и появление переменного тока в цепи, соединяющей элемент с землёй.

Работу электростатического генератора удобно описать, пользуясь следующей схемой. Плоская металлическая пластина (измерительная пластина) площадью соединена с землей через сопротивление  $R$ . Измерительная пластина может быть экспонирована в поле  $E$ , нормальном к пластине (а) или же быть закрытой от него с помощью вращающегося заземленного экрана (б). При этом по сопротивлению будет течь ток.

Если вращение экрана осуществлять непрерывно, то по сопротивлению будет все время течь переменный ток.

Потенциал измерительной пластины в какой либо момент времени складывается из двух частей: потенциала, который приобретает металлическая пластина, внесенная в электрическое поле и из потенциала, который создает заряд, появившийся за счет тока, текущего по сопротивлению на пластину.

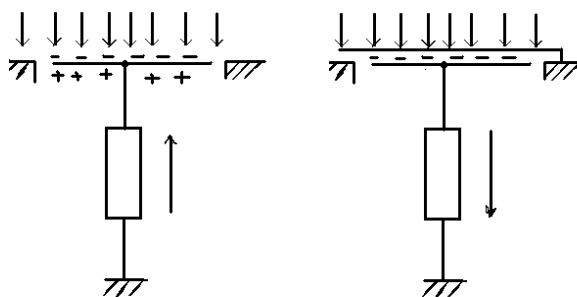


Рис.4. К описанию работы электростатического генератора

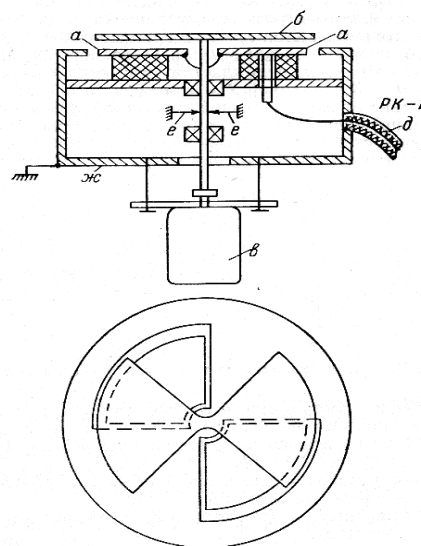


Рис.5. Устройство электростатического флюксметра



Датчик напряженности электрического поля «Поле-2» является измерительным преобразователем и в комплекте с регистрирующими приборами предназначен для измерения напряженности электрического поля атмосферы. Конструктивно датчик состоит из первичного и вторичного преобразователя, соединенных кабелями питания и передачи сигнала. Дополнительно необходим блок контроля для градуировки и калибровки. Первичный преобразователь выполнен в виде цилиндра, на крышке расположен разъем для подачи градуировочного напряжения. Электростатический генератор первичного преобразователя состоит из измерительной и модулирующих пластин, измерительная пластина представляет собой двухсекционную пластину, укрепленную на фторопластовых изоляторах. На рисунке 5 представлена схема устройства электростатического флюксметра системы ГГО «Поле-2», на рисунке буквами обозначены: а) металлическая измерительная пластина; б) экранирующая металлическая пластина; в) угольные щетки; г) сопротивление, соединяющее измерительную пластину с землей; д) экранирующий кабель; е) экранирующий корпус. Вторичный преобразователь предназначен для усиления детектирования и формирования напряжения[18].

### **1.3. Методы измерения объёмного заряда лёгких ионов**

Для измерения полярных удельных электрических проводимостей воздуха обычно используется метод аспирационного конденсатора. Прибор Гердиена для измерения электропроводности относится к тем, в которых используется аспирационный конденсатор с заземленной внешней обкладкой. По оси наружного цилиндра расположен внутренний цилиндрический электрод, который закрепляется на входном изоляторе электрометра или электростатического вольтметра. Аспирационный цилиндрический конденсатор, используемый в эксперименте, имеет следующие параметры: длина внутреннего электрода - 200 мм, его радиус - 3,5 мм, радиус наружного электрода - 36 мм. Режим работы конденсатора рассчитан исходя из критической подвижности ионов  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Скорость аспирации воздуха в конденсаторе контролируется и регулируется

таким образом, чтобы заметно превышать критическое значение [20]. Создаваемое между обкладками цилиндрического конденсатора электрическое поле отклоняет ионы к внутреннему электроду; попадая на поверхность электрода, ионы отдают свой заряд, изменяя потенциал электрода от начального значения  $\varphi_0$  до потенциала  $\varphi_t$  по окончании времени аспирации.

По данным измерений потенциала удельная электрическая проводимость определяется расчетным путем согласно выражению:  $\lambda = \frac{\varepsilon_0 (C + C')}{t C} \ln \frac{\varphi_0}{\varphi_t}$  (6), где  $C$  и  $C'$  - емкости аспирационного конденсатора и измерительного прибора соответственно,  $t$  - время аспирации,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума.

При измерении вертикальных профилей полярных удельных электропроводностей прибор последовательно помещается на уровнях 0,05; 0,3; 0,6; 1; 2; и 3 метра. Продолжительность измерения полярных электропроводностей на каждом уровне составляет около 10 мин., таким образом, на измерение одного профиля необходим 1 час.

Помимо измерения положительной и отрицательной электропроводностей, серия измерений включает в себя определение поправки, связанной с утечкой заряда по изоляции, ионизирующим воздействием материалов измерительного конденсатора и т.п.

Для непрерывного одновременного измерения полярных удельных электропроводностей применяется датчик полярных электрических проводимостей воздуха «Электропроводность-2». В приборе реализуется метод, основанный на измерении тока ионов, осаждающихся из потока воздуха на одну из обкладок конденсатора, между которыми создано электрическое поле. Величина тока ионов пропорциональна значению электропроводности воздуха и приложенному напряжению [20]. Прибор позволяет получить непрерывную запись значений электропроводностей, стандартный предел диапазона измерений  $25 \text{ фСм м}^{-1}$ . Поскольку величина электропроводности, получаемая в

экспедиционных условиях, значительно превышают предельное значение, диапазон измерений прибора был увеличен в 2 раза.

#### **1.4 Общие особенности поведения атмосферно-электрического поля**

Как было отмечено ранее, электрическое поле в каждой точке наблюдения создается глобальной составляющей, связанной с разностью потенциалов между ионосферой и земной поверхностью и локальной, связанной с появлением объемных зарядов, т.е. наблюдаемое электрическое поле вблизи земной поверхности является результатом суперпозиции глобального поля атмосферы и полей объёмных зарядов, образующихся в атмосфере в результате различных процессов.

Если выбрать случаи, когда локальные компоненты будут минимальны, то вариации электрического поля будут обусловлены, главным образом, глобальными процессами.

В обычный день над пустынной равниной или над морем электрический потенциал по мере подъёма возрастает с каждым метром на  $100\text{ В}$ , т.е. в воздухе имеется вертикальное электрическое поле  $E=100\text{ В/м}$ . Электрическое поле медленно ослабевает с высотой, на высоте 50 км оно уже еле заметно.

По результатам измерений электрического поля в свободной атмосфере, полученных разными авторами, можно указать следующую типизацию профилей градиента потенциала для условий «хорошей погоды» [3]:

1. Градиент потенциала атмосферы монотонно убывает с высотой по экспоненциальному закону.
2. Возрастание значений градиента потенциала от поверхности Земли до высоты 500-1500 м, на которой достигается её максимум, затем уменьшение по экспоненциальному закону.
3. Постоянство значений градиента потенциала до уровня 1-2 км, выше которого он убывает с увеличением проводимости. Профили этого типа встречаются реже и отмечаются относительно малые значения у поверхности земли.

4. Градиент электрического потенциала убывает в нижнем слое толщиной 2-3 км, а затем остается постоянным.

Типизация профилей напряженности электрического поля соответствует различному распределению зарядов.

Существенное влияние на распределение по высоте ядер конденсации и напряженности электрического поля оказывают суточные колебания метеорологического состояния нижнего слоя атмосферы, в частности наличие конвективной неустойчивости, инверсий. Максимум в вертикальных профилях напряженности электрического поля и концентрации ядер конденсации наблюдается в ночные и утренние часы и связан с границей слоя инверсии температуры. В дневные часы с развитием турбулентности происходит трансформация профилей, изменение скорости убывания градиента потенциала электрического поля и концентрации ядер конденсации с высотой.

Все элементы атмосферного электричества испытывают временные вариации различных масштабов. Наиболее характерными из них являются суточные вариации градиента потенциала электрического поля. В зависимости от места наблюдения и сезона выделяют 3 типа суточного изменения напряженности электрического поля [3]:

1. Колебательные вариации континентального типа с одним максимумом (после полудня) и одним минимумом (около 4 часов по местному времени).

2. Колебательные вариации континентального типа с двойным максимумом (около 9 и 21 час по местному времени) и двойным минимумом (около 4 и 14 часов по местному времени).

3. Универсальная суточная вариация. Минимум достигается около 4 часов, а максимум около 16-18 часов по Гринвичу, наблюдается в открытом море и полярных областях.

Кроме того, в характере временных изменений градиента потенциала можно выделить 27-суточные и 11-летние вариации, связанные с периодом солнечного вращения и периодом солнечной активности.

Изучение атмосферного электричества показало взаимосвязь его с другими, в частности, атмосферными процессами. Известны не всегда явные и далеко не всегда ясные взаимосвязи электрического поля с такими геофизическими параметрами как сейсмичность, вулканизм, явления в ионосфере и магнитосфере и пр. Атмосферно – электрические характеристики могут служить связующим звеном между изменениями солнечной активности и климатическими характеристиками тропосферы. Характер солнечно – земных связей в атмосферных процессах довольно сложен, вследствие неоднозначного влияния солнечной активности на метеорологические параметры и общую циркуляцию атмосферы [5].

### *1. Влияние геологических процессов*

Исследования вариаций атмосферно-электрического поля и магнитных полей указывают на связь бухтообразных возмущений аэроэлектрического и геомагнитного полей; при этом коэффициенты взаимной корреляции лежат в интервале  $k=0,63-0,81$  [12].

Рассматривалось и влияние микросейсмических и гидрогеологических процессов на элементы приземного атмосферного электричества [23]. Как отмечают авторы низкие значения напряженности электрического поля у железной дороги обусловлены высоким уровнем техногенных сейсмических шумов.

Характеристики электрического поля могут служить индикаторами сейсмической активности: резкое снижение уровня поля вплоть до изменения знака поля за 10-20 часов предвещает землетрясение [5]; а также грозовой деятельности: поле меняется на обратное и может достигать больших значений, как было отмечено на Камчатке [15].

*2. Влияние метеорологических факторов* : (скорости ветра, относительной влажности, тип облачности) на значения градиента потенциала на уровне земли неоднократно рассматривалось многими как отечественными, так и зарубежными авторами [6, 12, 18, 19, 22]. Существует много примеров связи напряженности со скоростью ветра. В частности обнаружено, что чем больше скорость ветра, тем

меньше значения напряжённости атмосферно-электрического поля; отрицательные значения объясняются переносом отрицательно заряженной пыли в атмосферу [6].

Рассматривалась также связь напряжённости поля с изменением температуры (воды или воздуха), связь напряжённости поля с характеристиками влажности [20]. Можно проследить хорошо выраженную зависимость между значительными изменениями напряжённости электрического поля и атмосферного давления [10].

### *3. Влияние аэрозоля*

Напряженность электрического поля реагирует на различное аэрозольное загрязнение, ее значения уменьшаются и могут принимать большие отрицательные значения: как показывают исследования во время дымового смога в Томске [16] и во время пылевой бури в Апатитах [17]. Можно говорить, что изменения напряжённости поля и концентрации аэрозоля происходят в противофазе [4]. При этом большие значения коэффициентов корреляции наблюдаются для холодного сезона (вследствие слабого конвективного и диффузионного влияния). В некоторых работах рассматривалось влияние отдельных газов (их концентрации) на напряженность поля [23]. Неоднократно высказывалась идея использования данных о величине градиента потенциала в качестве индикатора аэрозольного загрязнения. А для изучения глобальных вариаций градиента потенциала предлагалось организовать наблюдения вдали от источников загрязнения атмосферы.

Посредством воздействия градиента потенциала электрического поля в тропосфере на распределение ядер конденсации сказывается существенное влияние на радиационный баланс атмосферы; при этом указывается, что существенному воздействию подвергаются заряженные аэрозоли с размером меньше 0,5 мкм, которые наиболее активно влияют на процессы конденсации водяного пара в атмосфере [9].

Регулярные данные градиента электрического потенциала используются для контроля состояния атмосферы, на основе анализа результатов регулярных

наблюдений осуществляется мониторинг электрического состояния приземного слоя, исследуется антропогенное влияние на электрические характеристики. Большое внимание уделяется изучению характерных значений и изменчивости атмосферно – электрических характеристик, в частности градиента потенциала, в течении длительных временных интервалов [22, 25, 27].

## **2. Экспериментальные исследования характеристик электрического поля в приземном слое атмосферы**

### **2.1. Экспериментальные профили градиента потенциала электрического поля в приземном слое атмосферы**

Как уже отмечалось, электрическое поле в каждой точке наблюдения создается как глобальной составляющей, связанной с разностью потенциалов между ионосферой и земной поверхностью, так и локальной, связанной с появлением объемных зарядов. Объемные заряды в атмосфере образуются в результате разнообразных процессов, например, в результате неодинакового перемещения под действием электрического поля ионов различных знаков; они могут возникать при различного рода процессах электризации, когда атмосфера наделяется заряженными частицами преимущественно одного какого-либо знака, которые от места своего образования затем разносятся на значительные расстояния (пыль, дым).

Объемные заряды трансформируются по времени. В слоях с положительным объемным зарядом градиент потенциала будет уменьшаться с высотой, а в слоях с отрицательным – увеличиваться.

Изучение большого числа профилей градиента потенциала или профилей напряженности в течение суток выявляет их основные типы. При этом типизация профилей напряженности электрического поля соответствует различному распределению зарядов.

Экспериментальные профили градиента потенциала электрического поля можно условно разделить на 8 типов, различающихся характером его изменения по высоте в слое от 0-3м. При исследовании вертикального распределения градиента потенциала использовались результаты одновременных измерений атмосферно-электрических и метеорологических параметров, полученных в экспедициях 2002-2004 гг. в х.Платов Кашарского района Ростовской области (более 400 среднечасовых значений). На рисунке 6 представлены средние



профили градиента электрического потенциала; планками показаны значения

стандартной погрешности, вычисляемой по формуле:  $S_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$  (7), где  $\sigma_x$  - стандартное отклонение выборки,  $n$  – объем выборки (число случаев).

Наиболее встречающиеся по данным измерений являются:

– Профиль (тип А), характеризующийся убыванием градиента потенциала в нижнем слое 0 - 0,5м (что соответствует положительному объёмному заряду), затем его увеличением в слое 0,5 – 1,5 м (т.е. наблюдается отрицательный объёмный заряд) и последующим убыванием.

– Профиль (тип В) характеризуется увеличением градиента потенциала в слое 0 - 1,5 метров, а затем уменьшением в слое 1,5 - 2,5 метров, (т.е. можно отметить отрицательный объёмный заряд в прилежащем к земной поверхности слое).

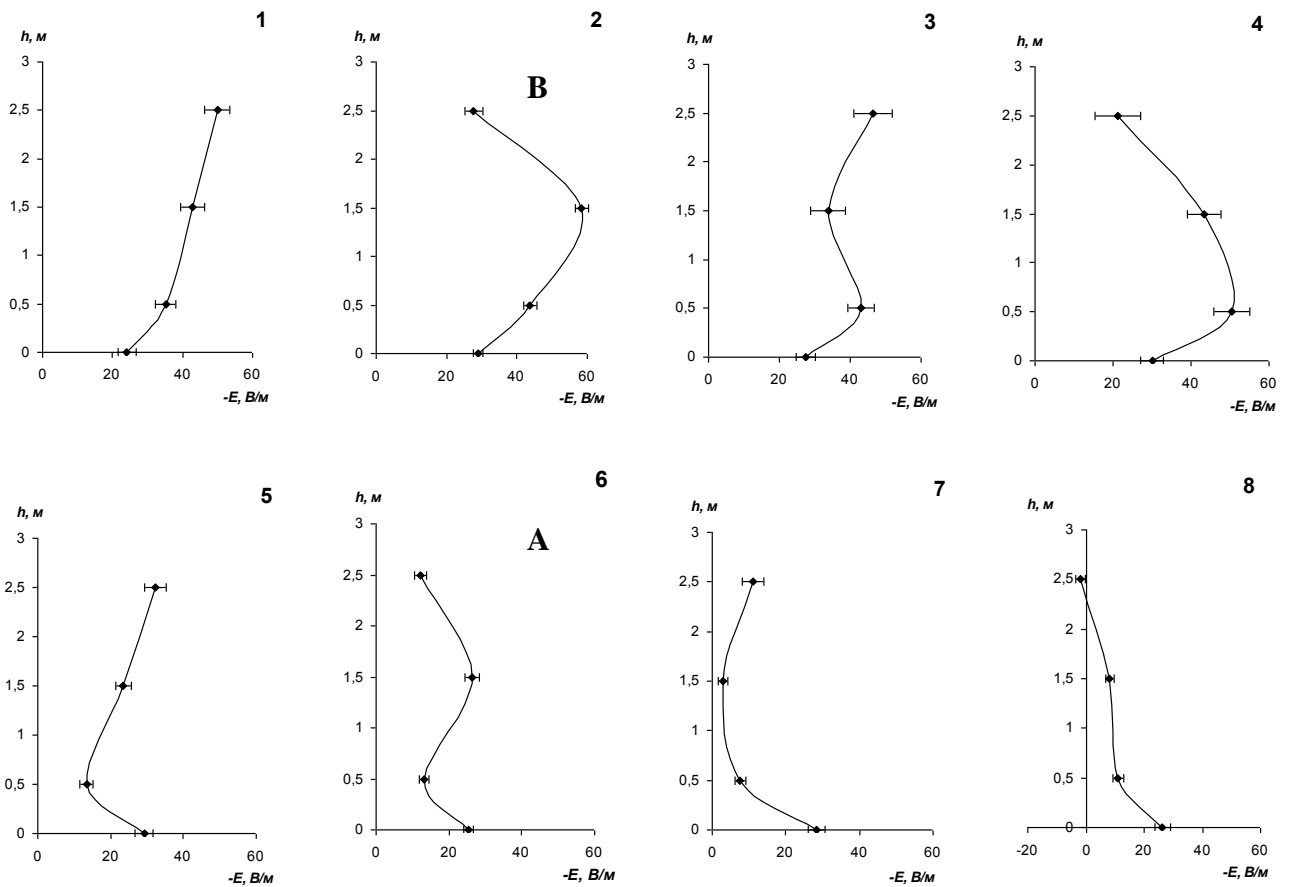


Рис.6. Экспериментальные профили градиента электрического потенциала приземного слоя атмосферы

Как показывают исследования, вертикальное распределение атмосферно-электрических характеристик приземного слоя в значительной степени зависит от метеорологических условий.

Метеорологический режим атмосферы определяется степенью устойчивости атмосферы. Параметром устойчивости, характеризующее стратификацию, является число Ричардсона, которое определяется по известной

формуле:  $Ri = \frac{g}{T} \cdot \frac{\frac{dT}{dh} + \gamma_a}{\left(\frac{dU}{dh}\right)^2}$  (8). Как видно число Ричардсона определяется градиентом

температуры и градиентом скорости ветра. Устойчивость приземной атмосферы наряду со скоростью ветра влияет на турбулентное перемешивание, от которого зависит распределение примесей в атмосфере и вертикальное распределение электрических параметров.

При отрицательном градиенте температуры создаются условия для развития вертикальных конвективных движений воздуха, что в свою очередь способствует усилению турбулентного обмена (перемешиванию атмосферы); при положительном градиенте температуры атмосфера слабо перемешивается, что приводит к расслоению атмосферы, интенсивность турбулентности ослабляется. Развитию турбулентности способствует и увеличение скорости ветра.

В таблице 1 приведены средние значения величин, определяющих условие, способствующее формированию каждого типа.

Можно отметить, что профиль с трехслойной структурой (тип А) реализуется преимущественно в ночных условиях, когда температура растет с высотой (приземная инверсия температуры воздуха) при слабом турбулентном обмене или в дневных условиях практически при отсутствии ветра. Кроме того, в этих условиях наблюдается заметное содержание радона в атмосферном воздухе вблизи земной поверхности, который способствует образованию локального объёмного заряда.

Таблица 2.1.1. Средние значения величин для разных условий

	Градиент температуры °/м	Скорость ветра, м/с	Коэффициент турбулентности, м <sup>2</sup> /с	Концентрация радона, Бк/м <sup>3</sup>	Число случаев	Тип
НОЧЬ	0,5	0,0	0,0001	89,0	36	А
	0,9	0,0	0,0001	97,0	19	А
	0,9	1,0	0,0221	76,4	19	А
	0,4	3,0	0,0679	30,2	15	В
ДЕНЬ	-0,2	0,1	0,0068	93,0	17	А
	-0,4	1,5	0,0805	27,5	24	В
	-0,5	2,5	0,0954	18,0	30	В
	-0,4	3,5	0,1173	19,1	52	В
	-0,6	>4,5	0,1612	22,3	19	В

В дневные часы с развитой турбулентностью и в ночные часы с ветром наблюдается другое распределение градиента потенциала электрического поля по высоте (тип В). Подобное изменение градиента потенциала с высотой свидетельствует о наличии в нижнем слое отрицательного объемного заряда.

Отрицательный объемный заряд, устойчиво фиксирующийся в эти часы, обусловлен, возможно, наэлектризованной пылью, поднимаемой с иссушенной земной поверхности ветровыми потоками. Следует отметить, что снижение поля вблизи земли при наблюдениях в Ростовской области отмечается при любых помутнениях атмосферы: запылении, задымлении, наличии дымки и т.п.

## 2.2 Объёмный заряд лёгких и тяжелых ионов

В образовании объемного заряда в приземном слое участвуют как легкие так и тяжёлые ионы. Объёмный заряд, определяемый через уравнение Пуассона, характеризует совокупность зарядов, как лёгких, так и тяжёлых ионов. Объёмный заряд легких ионов рассчитывался по разности положительной и отрицательной электропроводности, измеряемых прибором Гердиена:  $\rho = (\lambda_+ - \lambda_-) / u(9)$ . Средняя подвижность  $u$  принималась равной  $1,45 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вс}$ .

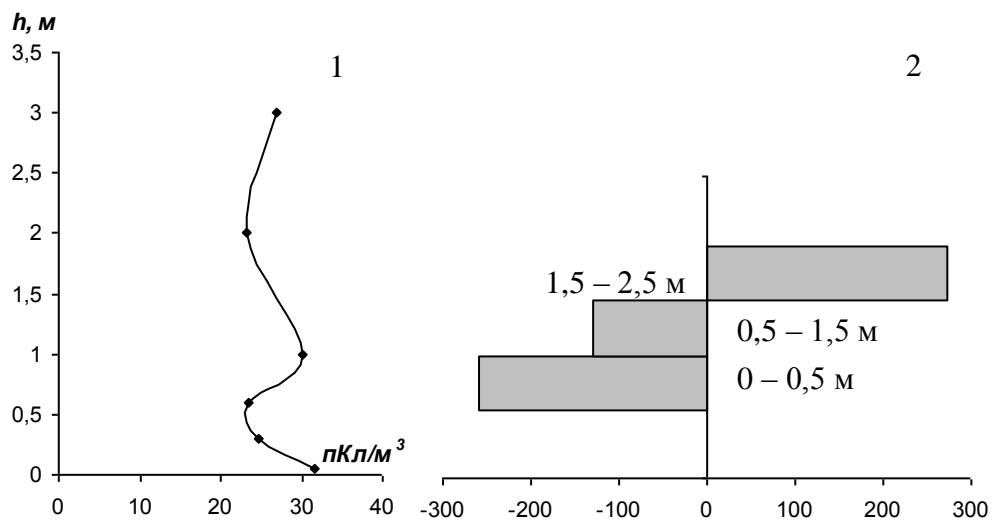


Рис.7. Плотность объемного заряда:  
1 – легких ионов, 2 – тяжелых ионов (заряженных аэрозолей)

При наличии в атмосфере аэрозолей лёгкие ионы адсорбируются на них и в таком виде могут длительно присутствовать в электродном слое, определяя его электрическую структуру. Кроме того, плотность полного объемного заряда, представленного ионами всех подвижностей (в том числе и заряженными, вследствие электризации аэрозолями), в среднем на порядок больше, чем плотность объемного заряда легких ионов. На рисунке 7 представлены вертикальные распределения значений плотности объемного заряда лёгких ионов (1), электропроводности и плотности полного объемного заряда (2), рассчитанного по данным градиента потенциала на основании выражения (6).

Закономерности вертикального распределения плотности объемного заряда легких ионов  $\rho_i$  можно рассматривать в соответствии с тем, что в электродном слое на любой высоте:  $\rho_i = \pm \rho_{\text{э}} \pm \rho_{\Delta z}$  (10), где  $\rho_{\text{э}}$  - плотность объемного заряда,

образовавшегося под действием электродного эффекта, а  $\rho_{\Delta l}$  - плотность объемного заряда, возникающего при наличии градиента электропроводности (т.е. определяется совокупностью воздействия электродного эффекта и высотного изменения интенсивности ионообразования). При слабом обмене в слое, расположенном выше  $0,3 \div 0,6$  м, при наличии эксхалации радона наблюдается заметный отрицательный градиент электропроводности и, соответственно, генерируется отрицательный объемный заряд, частично или полностью компенсирующий положительный объемный заряд электродного эффекта.

Рассматриваются суточные изменения объёмного заряда для различных слоёв. Можно отметить, что в самом нижнем слое плотность объёмного заряда положительна так же, как и в верхнем большом слое.

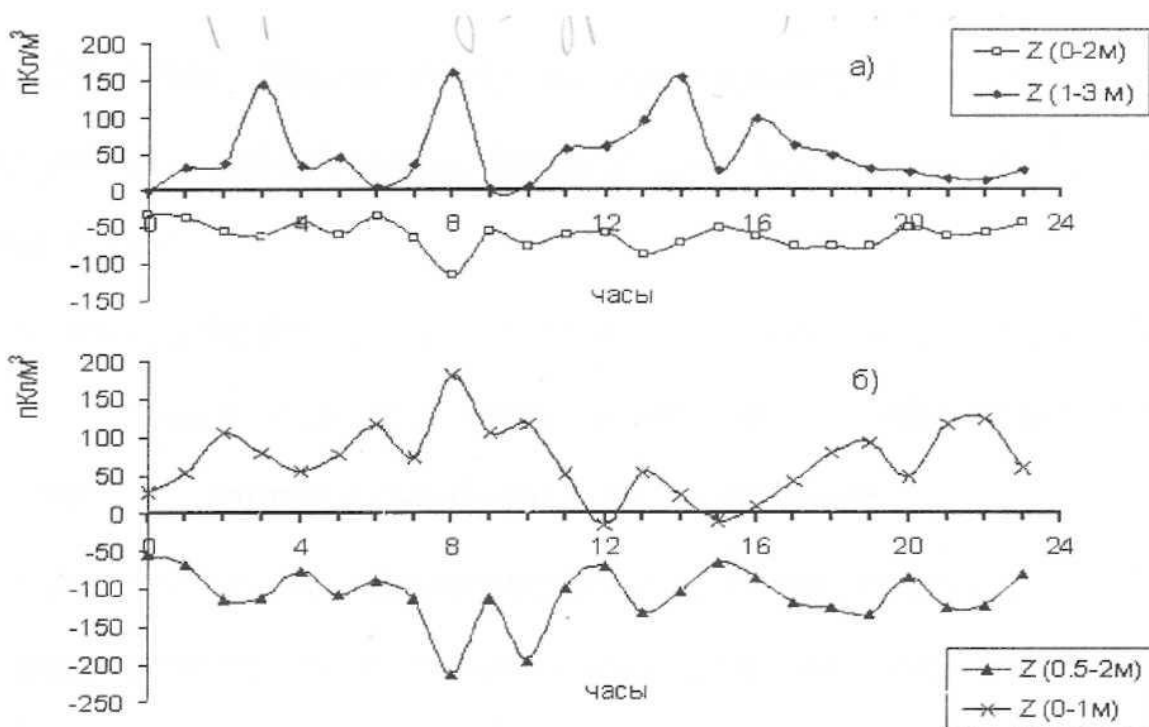


Рис.8.Суточные вариации плотности объёмного заряда ионов всех групп (Платов, Кашарского района, 2004 г.)

То есть весь трёхметровый прилегающий к земле слой содержит положительный объёмный заряд. Однако в слое 0-2 метра и, особенно в слое 0,5-2 метра объёмный заряд отрицательный. Противоречие можно объяснить

следующим образом. Объёмный заряд лёгких ионов для всех уровней в целом положительный, что и естественно, т.к. коэффициент униполярности в нижних слоях воздуха, как правило, больше 1. Следовательно, отрицатель объёмный заряд в слоях 0,5-2 метра, 0-2 метра обусловлен тяжёлыми ионами.

Обращает на себя внимание и тот факт, что в сравниваемых слоях 0-1; 0,5-2 и 0-2; 1-3 с увеличением или уменьшением заряда на одном уровне соответствует увеличение или уменьшение противоположных по знаку заряда на другом уровне. Более точную оценку объёмного заряда тяжёлых ионов в первом приближении можно провести если в общем заряде учитывать объёмный заряд лёгких ионов. Если отрицательная плотность объёмного заряда лёгких ионов отмечается в редких случаях, то случаи тяжёлых ионов в слоях с положительным объёмным зарядом очень часто фиксируется отрицательный объёмный заряд значительный по величине. С другой стороны, поскольку от процессов появления электрического заряда, а имеет место разделения зарядов, то симметрия числовых значений противоположных по знаку зарядов подтверждает практические перераспределения зарядов из слоя в слой.

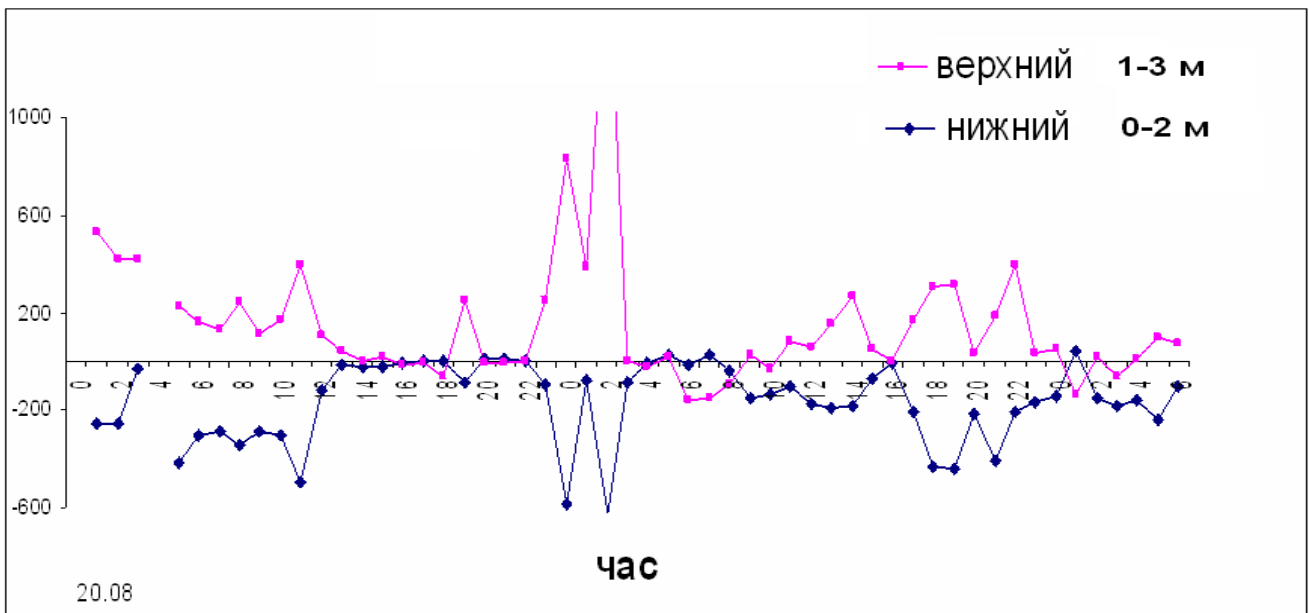


Рис.9.Изменение плотности объемного заряда в течение двух суток.

### 2.3. Влияние возмущающих факторов на характер вариаций градиента потенциала электрического поля приземного с

Глобальная вариация выявляется в унитарных малодоступных локальным воздействиям, в связи с чем оценка этих воздействий становится актуальной при рассмотрении всей совокупности дополнительных генераторов сложной электрической системы.

По наблюдениям многих исследователей именно эти возмущающие факторы значительно влияют на значения градиента потенциала, являясь генераторами объёмных зарядов.

В процессе многочисленных измерений было замечено, что появление в атмосфере жидких и твёрдых частиц приводит к тому, что значения градиента потенциала электрического поля не только изменяются по абсолютной величине, но и часто переходят в область отрицательных значений.

По результатам экспедиционных наблюдений с.Таловерово Кашарского района 2008 года были построены профили градиента потенциала электрического поля при наличии различных помутняющих факторов (пыль, дымка, роса). На рисунке 10 представлены данные результаты.

Можно заметить, что ночью средние значения градиента потенциала в целом по слою от 0 до 3 м ниже, чем дневные.

Любое помутнение атмосферы влияет на изменение градиента потенциала: при образовании росы и дымки значения градиента потенциала ниже. В ночных условиях, когда температура растёт с высотой (приземная инверсия температуры

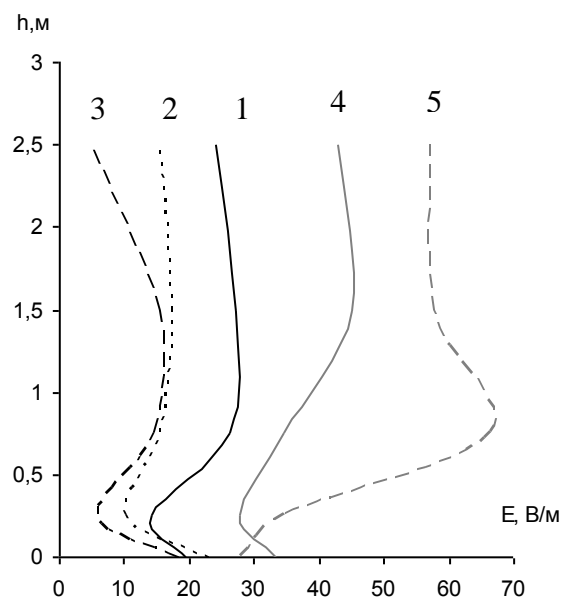


Рис.10. Вертикальные профили градиента потенциала:

- 1- «чистые» (ночь)
- 2- дымка (ночь)
- 3- роса (ночь)
- 4- «чистые» (день)
- 5- пыль (день)

воздуха) и при слабом турбулентном обмене можно проследить образование положительного объемного заряда, обусловленного электродным эффектом; чего не наблюдается днем, что может быть объяснено, наэлектризованной пылью, поднимаемой с земной поверхности ветровыми потоками. В дневное время сильный ветер и пыль способствуют значительному увеличению градиента потенциала в слое до 1 м.

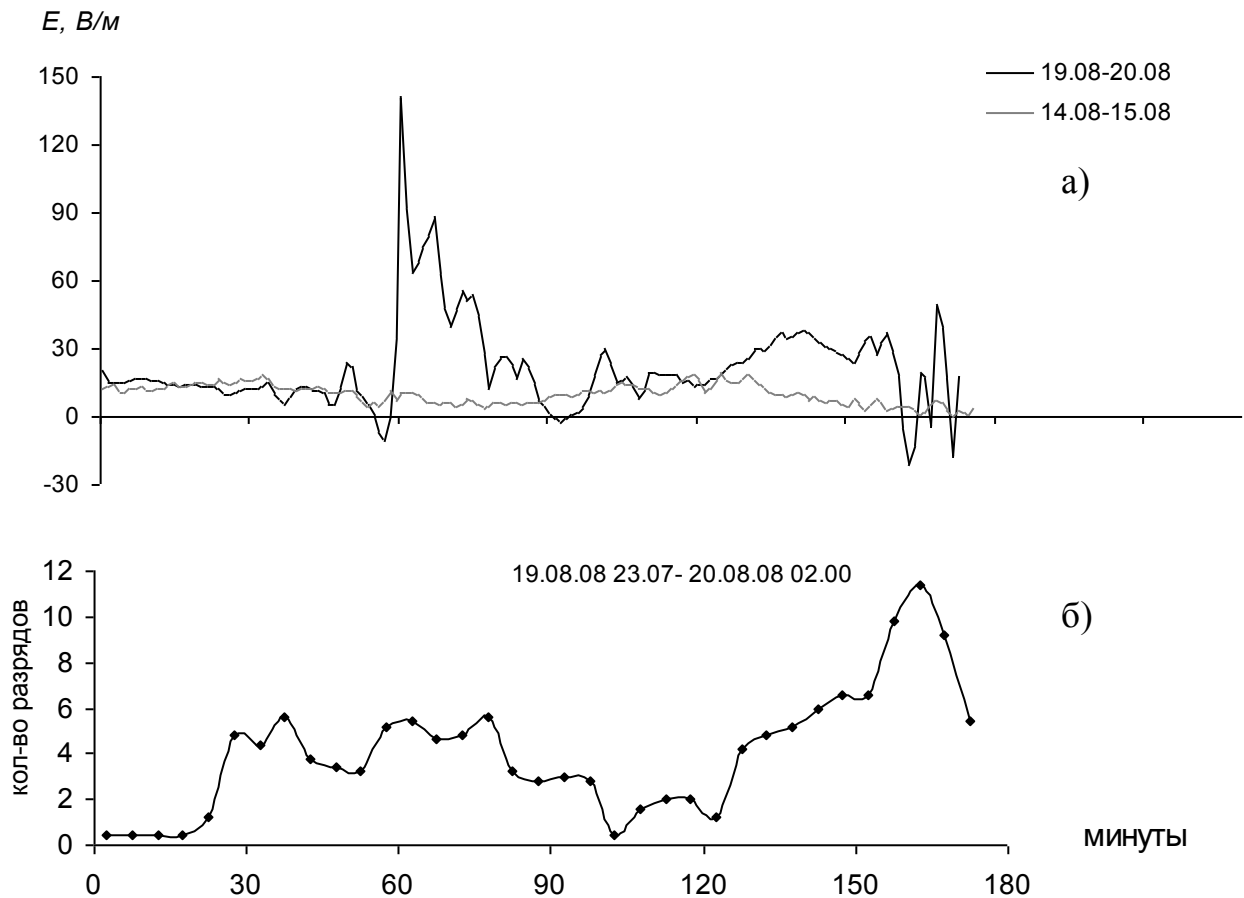


Рис.11.

- а) Ряды динамики напряженности атмосферно-электрического поля на уровне земли:  
19-20 нарушенные условия (гроза), 14-15 часов – ненарушенные условия  
б) Ряды динамики интенсивности разрядов

В процессе многочисленных наблюдений было замечено, что при наличии близкой грозы значения напряженности электрического поля испытывают резкие колебания амплитуды и могут изменять направление поля на противоположное. На рисунке 9а представлены минутные вариации напряжённости поля на уровне земли по данным флюксметра при наличии близкой грозы (с 23 ч до 2 ч) и в те же



часы для спокойных условий. Можно отметить резкие изменения значений напряжённости и переход через ноль. График приведен для случая близкой грозы в ночь с 19 на 20 августа; следует сказать, что гроза являлась продолжительной и интенсивной.

На рисунке 9б представлены вариации во времени интенсивности разрядной деятельности грозы оцениваемой числом разрядов за минуту, осреднённым для пятиминутных интервалов. Значения разрядов фиксировались с помощью грозорегистратора типа ПРГ-100, регистрирующий разряды в радиусе 100 км.

#### **2.4 Роль радона-222 в формировании пространственно - временных вариаций градиента потенциала**

По современным теоретическим представлениям атмосферного электричества основным ионизатором приземного слоя воздуха является почвенный радон-222, который, попадая из почвы в атмосферу, распространяется с потоками воздуха по ее объему. Содержание радона в атмосфере зависит от многих факторов, в частности, от скорости поступления его из почвы, а также скорости рассеивания в атмосфере, которые в свою очередь зависят от многих других метеорологических и географических факторов. Так, интенсивность выделения радиоактивных веществ может определяться состоянием поверхности почвы (температурой, влажностью, характером покрова), а скорость рассеивания их в атмосфере определяется перемешиванием атмосферы (атмосферной турбулентностью).

Объемная радиоактивность (концентрация) радона-222 в атмосфере в период геофизических экспедиций ПИ ЮФУ измерялась радонOMETром «AlphaGUARD» на различных высотах в слое до 2-х метров. РадонOMETр работает по методу ионизационной камеры. Специальный фильтр прибора обеспечивает попадание внутрь камеры радиоактивного изотопа  $^{222}_{86}\text{Rn}$ , задерживая прочие изотопы, влагу и пыль.

На основании экспериментальных данных возможно исследование роли радона-222 в формировании пространственно-временных вариаций градиента потенциала электрического поля атмосферы. Интересным представляется определение корреляционных отношений между данными характеристиками и выявление вида данной связи. Следует отметить, что влияние радона на электрическое поле приземного слоя атмосферы опосредовано через процессы ионизации, изменение электропроводности по высоте. Как известно, на вертикальное распределение градиента потенциала существенное влияние оказывает содержание объёмных зарядов, слои которых могут образовываться вследствие вертикального изменения электропроводности.

В ходе исследований обнаружено, что численные значения градиента потенциала (напряженности) атмосферно-электрического поля коррелируют с концентрацией радона-222. Эмпирические коэффициенты корреляции

рассчитывались по формуле: 
$$\eta_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2} \quad (11),$$
 где  $x_i$  – значение

концентрации радона-222,  $y_i$  – значения градиента потенциала.

Для оценки достоверности эмпирического коэффициента корреляции градиента потенциала электрического поля по концентрации радона подсчитывались статистическая ошибка по формуле:  $S = \frac{1-\eta^2}{\sqrt{n}}$  (12) и фактические

значения критерия Стьюдента  $t_{\phi} = \eta \sqrt{\frac{n-2}{1-\eta^2}}$  (13).

В таблице 2 приведены результаты расчета эмпирических коэффициентов корреляции ( $\eta$ ) градиента потенциала электрического поля по концентрации радона-222 по данным измерений, а также представлена оценка достоверности (статистическая ошибка и Т-критерий). Коэффициенты корреляции, полученные для различных пунктов наблюдений на нескольких высотах в слое до 2-х метров, имеют значения в среднем -0,5, что говорит об умеренной отрицательной связи исследуемых характеристик.

Как видно из таблицы, фактические значения критерия Стьюдента превышают табличные значения на высоком уровне значимости для соответствующего числа степеней свободы. Это свидетельствует о статистической достоверности полученных коэффициентов.

*Таблица 2.4.1. Расчёты коэффициентов корреляции градиента потенциала электрического поля по концентрации радона-222:  $\eta$  - эмпирические коэффициенты корреляции,  $S$  – статистическая ошибка,  $t_{\phi}$  – фактическое значение критерия Стьюдента,  $t_{St}$  – табличное его значение,  $n$  – число часовых серий измерений.*

Высота (м)	$\eta$		$S$		$t_{\phi}$		$t_{St}$ ( $P=0,1\%$ )
	Михай- ловка $n=265$	Платов $n=230$	Михай- ловка $n=265$	Платов $n=230$	Михай- ловка $n=265$	Платов $n=230$	
0,0	-0,46	-0,44	0,05	0,05	9,66	8,27	3,29
0,5	-0,54	-0,52	0,04	0,05	12,40	10,77	3,29
1,0	-0,54	-0,60	0,04	0,04	12,58	13,98	3,29
2,0	-0,51	-0,56	0,05	0,04	11,17	12,54	3,29

Для установления вида этой зависимости был применён регрессионный анализ данных. На основании данных эксперимента были построены эмпирические ряды регрессии градиента потенциала по радону в различных метеорологических условиях (для устойчивой и неустойчивой стратификации атмосферы). Такой подход продиктован тем, что на распределение электрических характеристик в приземном электродном слое большое влияние оказывает метеорологический режим атмосферы, в частности, температурная стратификация, обуславливающая перемешивание атмосферы и, как следствие, распределение объёмных зарядов. Можно отметить, что ряды регрессии хорошо аппроксимируются степенной зависимостью, при этом достоверность аппроксимации ( $R^2$ ) близка к 1.

На рисунке 12 представлены эмпирические ряды регрессии градиента потенциала по концентрации радона-222 для различных условий термической стратификации приземного слоя атмосферы (устойчивой, неустойчивой). На графиках по горизонтальной оси отложены значения концентрации радона-222 в Бк/м<sup>3</sup>, а по вертикальной оси значения градиента потенциала в В/м; планками показаны значения статистической ошибки. На графиках также представлены аппроксимирующие кривые.

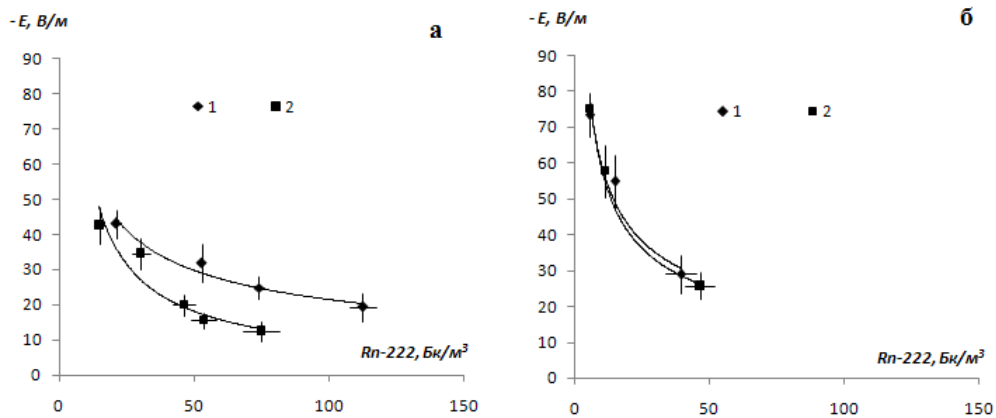


Рис. 12. Эмпирические ряды регрессии и линии регрессии значений градиента потенциала по концентрации радона-222 (1- на уровне земной поверхности; 2 – на высоте 1 м)

а) устойчивая стратификация (116 серий парных измерений),

б) неустойчивая стратификация (34 серий парных измерений)

На основании регрессионных кривых получены уравнения, аппроксимирующие данную зависимость.

Таблица 2.4.2. Уравнения регрессии значений градиента потенциала по концентрации радона-222

Стратификация	0 м	1 м	$\Delta T$	$U$	$k$
устойчивая	$\text{grad}\varphi = 188,1 \text{ Rn}^{-0,47}$	$\text{grad}\varphi = 423,4 \text{ Rn}^{-0,80}$	1,1	0,3	0,004
неустойчивая	$\text{grad}\varphi = 180,8 \text{ Rn}^{-0,48}$	$\text{grad}\varphi = 192,1 \text{ Rn}^{-0,51}$	-0,3	1,3	0,025

В таблице 3 представлены: уравнения, полученные для аппроксимации зависимости значений градиента потенциала от концентрации радона-222 на уровне земной поверхности и высоте 1 метр для различных метеорологических условий. Условия устойчивой стратификации наблюдаются ночью, и характеризуется положительным градиентом температуры, низкими скоростями ветра. Неустойчивая стратификация характерна для дневных значений при отрицательном градиенте температуры и наличии ветра.

Таким образом, можно представить обобщённый вид уравнения, аппроксимирующего данную зависимость:  $grad\varphi = ARn^{-b}$  (14). Коэффициент  $A$ , очевидно, определяется метеорологическим режимом приземного слоя атмосферы. В нашем случае для устойчивой стратификации (когда наблюдается расслоение атмосферы) непосредственно у земной поверхности значения ниже, чем на высоте 1 м. Для неустойчивой стратификации (когда создаются условия для перемешивания атмосферы) значения коэффициента  $A$  не так сильно разнятся. Показатель степени  $b$ , по-видимому, определяется процессами ионизации и влиянием объёмных зарядов, связанных с аэрозолями.

Обусловленность поведения градиента потенциала процессами ионизации (зависимость от концентрации радона) можно проследить и в вертикальном распределении данных характеристик, представленных на рисунке 13.

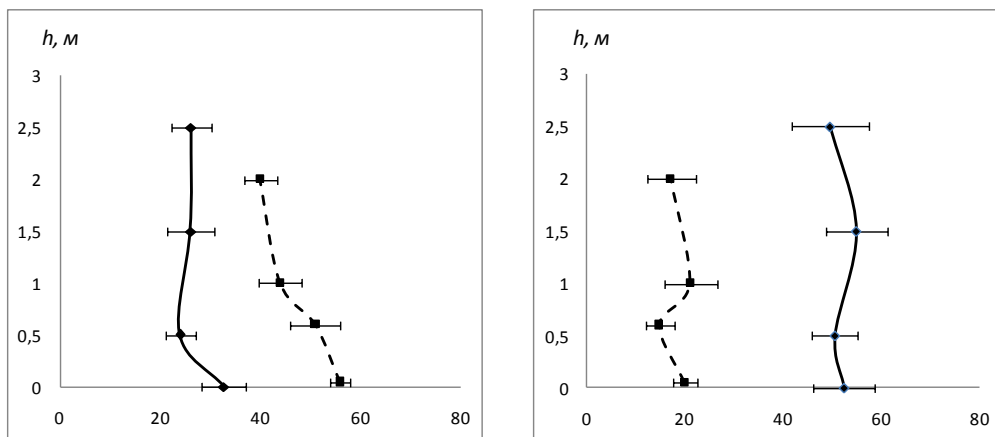


Рис. 13. Вертикальное распределение градиента потенциала – В/м (сплошная линия) и концентрации радона-222 – Бк/м<sup>3</sup> (пунктирная линия): а) устойчивая стратификация (116 серий парных измерений); б) неустойчивая стратификация (34 серии измерений)

Согласованность исследуемых характеристик (градиента потенциала и концентрации радона) просматривается в рядах динамики (рисунок 14). Как видно, временные вариации градиента потенциала атмосферно-электрического поля и концентрации радона по отношению к их средним значениям происходят в противофазе.

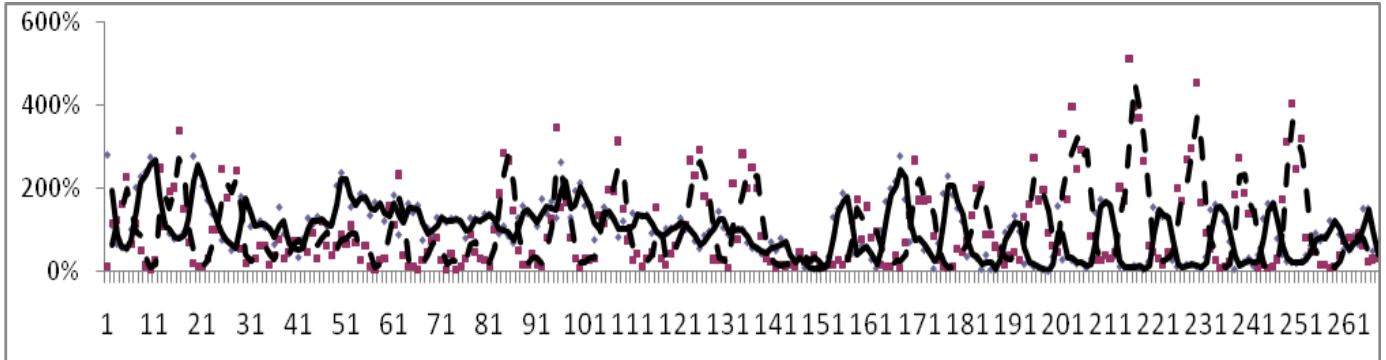


Рис. 14. Ряды динамики градиента потенциала (сплошная линия) и концентрации радона-222 (пунктирная линия) в процентном отношении величин к их средним значениям

В заключение отметим, что на связь градиента потенциала (напряжённости) электрического поля атмосферы с радоном-222 указывают и другие авторы. Шулейкин В.Н. указывает, что в условиях слабого турбулентного перемешивания атмосферное электрическое поле, особенно в зоне проявления электродного эффекта, несёт в себе информацию о геологических особенностях среды (почвы). Фирстов П.П. показывает связь величины напряжённости атмосферно-электрического поля с эксхалацией почвенного радона в атмосферу, обращая внимание на то, что связь осложнена глобальной составляющей электрического поля атмосферы и метеорологическими процессами. Таким образом, радон-222 играет важную роль в создании пространственно-временных характеристик электрического поля атмосферы.

### Заключение

В ходе исследований, изложенных в данной работе, были проанализированы результаты атмосферно – электрических измерений в приземном слое, проводившиеся в комплексе с измерениями метеоэлементов и концентрации радона – 222 в воздухе в пунктах наблюдений Ростовской области в летние месяцы. Привлечение к исследованию экспериментальных данных пунктов Ростовской области весьма важно для отслеживания физического состояния атмосферного воздуха в регионе и в последующем для построения моделей электрических процессов в атмосфере.

На основании исследований можно сделать следующие выводы:

1. Результаты исследований взаимосвязи градиента потенциала атмосферно-электрического поля и концентрации радона в приземном слое атмосферы позволяют рассматривать возможности практического использования результатов атмосферно-электрических измерений при решении задач прикладной геофизики, обнаруживании источников выхода радона, их временной активности.
2. Существенное влияние на электрическое состояние атмосферы (в частности, приземного слоя, в котором развиваются и эволюционируют живые организмы) оказывает, судя по наблюдениям, присутствие аэрозоля. Атмосферно – электрические характеристики реагируют на повышение содержания аэрозолей как естественного, так и антропогенного происхождения, фиксирующееся визуально наблюдателями при появлении в воздухе дыма, тумана, пыли и т.п.
3. Дальнейшее развитие экспедиционных исследований может идти в направлении расширения измеряемых параметров (например, концентрации аэрозолей субмикронного диапазона, плотности объемного заряда, спектра ионов и т.д.) для более точного описания электрических свойств приземного слоя атмосферы.

### Список литературы

1. Анисимов С.В., Геофизические аспекты исследования глобальной электрической цепи - В сб.: VI Российская конференция по атмосферному электричеству, Нижний Новгород, 2007, с.7-10.
2. Анисимов С.В., Концепция глобальной электрической цепи: состояние проблемы.- V Российская конференция по атмосферному электричеству, Владимир, 2003, с.21-26.
3. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели).Л.: Гидрометеиздат, 1991. с.447-459.
4. Бирюков Ю.В., Кречетов А.А., Загайнов В.А., Оболкин В.А., Шаманский Ю.В., Совместные наблюдения вариаций электрического поля атмосферы и концентрации аэрозоля на Байкале - В сб.: VI Российская конференция по атмосферному электричеству, Нижний Новгород, 2007, с.71-72.
5. Грунская Л.В., Ефимов В.А., Исакевич В.В., Козлов А.Н., Гаврилов И.Н., Тарасов А.Н., Поляков А.А., Скоморохин С.А., Герасимов М.С., Крестьянинов И.И., Снаровкина А.Ф., Елисеева С.В., Система многоканального синхронного мониторинга электромагнитных полей КНЧ диапазона приземного слоя. – В сб. - V Российская конференция по атмосферному электричеству, Владимир, 2003, с.119 – 120.
6. Двали Е.Р., Калаиджева Л.Л., Зависимость электрических характеристик атмосферы от некоторых атмосферных явлений. В сб. Труды ГГО, вып. 401, Л., 1980, с.118-122.
7. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Шаманский Ю.В., Влияние гелиогеофизических факторов на электрические характеристики атмосферы. – В сб. - V Российская конференция по атмосферному электричеству, Владимир, 2003, с.43-45.
8. Имянитов И.М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М.: ГТТИ, 1957. 483 с.
9. Коваленко В.А., Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Механизм влияния атмосферного электричества на характеристики тропосферы земли. – В сб.:



- VI Российская конференция по атмосферному электричеству, Нижний Новгород, 2007, с.26-27.
10. Коваленко В.А., Шаманский Ю.В., Молодых С.И., Сезонные вариации параметров атмосферного электричества и приземного давления - В сб.: VI Российская конференция по атмосферному электричеству, Нижний Новгород, 2007, с.225-226.
  11. Колоколов В.П., Шварц Я.М. Методы наблюдений элементов атмосферного электричества. Обзор. Обнинск, ВНИИГМИ – МЦД, 1976. 64 с.
  12. Кречетов А.А., Филиппов А.Х., Татарников В.К., Электрическое поле в условиях промышленного загрязнения атмосферы. – В сб.: Атмосферное электричество. Труды II Всесоюзного симпозиума, Л., 1984, с.41-43.
  13. Кузнецов В. В., Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели.
  14. Мареев Е.А., Трахтенгерц В.И., Загадки атмосферного электричества. – В сб. – Природа №3, 2007.
  15. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э., Электрические и электромагнитные процессы в приземной атмосфере перед землетрясениями на Камчатке. – В сб.: VI Российская конференция по атмосферному электричеству, Нижний Новгород, 2007, с. 285-286.
  16. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Ипполитов И.И., Влияние дымов лесных пожаров на электрооптические связи в нижней атмосфере - В сб.: VI Российская конференция по атмосферному электричеству, Нижний Новгород, 2007, с.96а-96б.
  17. Ролдугин В.К., Белоглазов М.И., Галахов А.А., Першаков Л.А., Шишаев В.А., О наблюдениях атмосферного электричества на Кольском полуострове. – В сб.: V Российская конференция по атмосферному электричеству, Владимир, 2003, с. 130-132.
  18. Семенов К.А., Влияние локальных условий на элементы атмосферного электричества. – В сб.: Труды ГГО, вып.323, с. 109-118.

19. Семенов К.А., Связь элементов атмосферного электричества с загрязнением воздуха. – В сб.: Атмосферное электричество. Труды I Всесоюзного симпозиума, Л., 1976, с. 75-79.
20. Соколенко Л.Г., Шварц Я.М. Датчик электрической проводимости воздуха // Труды ГГО. Л.: Гидрометеиздат. 1990. Вып. 527. С. 33-36.
21. Шаманский Ю.В., Глобальные и локальные вариации электрического поля. – В сб.: V Российская конференция по атмосферному электричеству, Владимир, 2003, с.46-49.
22. Шварц Я.М., Соколенко Л.Г., Результаты многолетних измерений градиента потенциала электрического поля атмосферы и удельных полярных электрических проводимостей воздуха в приземном слое атмосферы на территории России. – В сб.: V Российская конференция по атмосферному электричеству, Владимир, 2003, с.133-136.
23. Шулейкин В.Н., Атмосферное электричество и сейсмические, гидрогеологические и газовые поля земли - В сб.: VI Российская конференция по атмосферному электричеству, Нижний Новгород, 2007, с.35-38.
24. Claudia Serrano and Heitor Reis Lisbon., Fair Weather Atmospheric Electric Field and Influences of the Local Meteorology. // Proc.13th Int. Conf. Atm. Electricity. Beijing, China, 2007, P. 50-53.
25. Israelsson S. Long-term measurements of the vertical electrical potential gradient in the atmospheric surface layers. // Proc.13th Int. Conf. Atm. Electricity. Beijing, China, 2007.
26. L.Delgado Martin, E.Garcia Diez, F. de Pablo Davila and L. Rivas Soriano., Relationship between the atmospheric electric field (A.E.F.) and air pollution in the lower levels of the atmosphere. // Proc.12th Int. Conf. Atm. Electricity. Versailles, France, 2003, P. 83-87.
27. Tammet H. A Joint Dataset of Fair-Weather Atmospheric Electricity. // Proc.13th Int. Conf. Atm. Electricity. Beijing, China, 2007.