

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ФГОУ ВПО «Южный Федеральный университет»  
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет физики  
Кафедра теоретической физики

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**«Влияние адсорбции ионов на электропроводность  
приземного слоя атмосферы»**

*Степень* – магистр физико-математического образования

*Направление* – 050200 Физико-математическое образование

*Программа магистерской подготовки* – Теория и методика обучения  
физике

**Исполнитель:**

студентка 6 курса стационара  
факультета физики  
Сухотаева Валентина Юрьевна

**Научный руководитель:**

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

**Рецензент:**

канд. физ.-мат. наук, доцент,  
Донец Игорь Владимирович

Ростов-на-Дону  
2008

## Оглавление

Введение .....	3
Глава 1 Представления физики о газовых ионах и процессах их диффузии и адсорбции .....	6
1. 1 Процессы ионообразования в газах.....	6
1. 2 Диффузия газовых ионов .....	8
1. 3 Адсорбция атмосферных ионов.....	12
1. 3. 1 Природа адсорбционных сил .....	12
1. 3. 2 Сущность процесса адсорбции атмосферных ионов .....	22
Глава 2. Ионизация приземной атмосферы и ее электрическая проводимость .....	24
2. 1 Ионизация атмосферы. Основные её ионизаторы .....	24
2. 2 Атмосферные ионы, их характеристики .....	28
2. 3 Электропроводность атмосферы .....	30
2. 4 Ионизационно-рекомбинационные процессы .....	32
2. 5 Атмосферные аэрозоли .....	33
2. 6 Связь атмосферно-электрических характеристик с загрязнением .	34
Глава 3. Результаты экспериментальных исследований электрической проводимости приземной атмосферы и ее пространственного распределения при наличии адсорбирующих поверхностей .....	37
3. 1 Приборы и методы измерений и обработки данных .....	37
3. 1. 1 Измерение удельной электропроводности.....	37
3. 1. 2 Измерения концентрации радона-222 .....	39
3. 1. 3 Измерение метеорологических характеристик.....	41
3. 1. 4 Описание пунктов наблюдений .....	42
3. 2 Исследование нижней части вертикального профиля электропроводности атмосферы в слое, прилегающем к адсорбирующей земной поверхности .....	42
3. 3. Результаты исследований электропроводности нижней атмосферы при наличии в ней адсорбирующих ионы аэрозолей .....	52
3. 3. 1 Экспериментальные исследования полярных электрических проводимостей в пунктах наблюдений с разным содержанием аэрозолей ....	52
3. 3. 2 Оценка интегрального аэрозольного загрязнения атмосферы на основании атмосферно-электрических данных.....	54
Заключение .....	57
Список литературы .....	59

## Введение

Исследование атмосферы важно, прежде всего, потому, что это среда, в которой непосредственно существует человек. Он должен уметь учитывать и использовать в повседневной жизни и деятельности физические процессы, происходящие в ней. Развитие науки и техники привело к проблеме рационального использования природных ресурсов, решение которой возможно при полном изучении всех свойств среды, выявлении закономерностей протекающих в ней процессов.

Изучение этих свойств и закономерностей имеет своё фундаментальное значение, познавательную значимость. В то же время, исследования атмосферного электричества важны в прикладном аспекте: как с экологической точки зрения, так и в плане решения инженерных задач, связанных с эксплуатацией современных технических устройств в условиях среды с данными физическими параметрами.

Характеристики атмосферного электричества можно считать индикаторами аэрозольного загрязнения, поскольку они наиболее чувствительны к появлению различных помутняющих атмосферу частиц. На изменение одной из этих характеристик - электропроводность атмосферы - также влияет содержание в атмосфере радиоактивных веществ. Поэтому электрическая проводимость атмосферы может быть использована в качестве индикатора радиоактивного загрязнения.

Атмосферно-электрические исследования используются для решения проблем прикладного характера, среди которых можно назвать проблемы снижения электризации самолетов и поражения их молниями, снижения потерь при электропередаче высоких напряжений и расчета ЛЭП, обеспечения надежности радиосвязи.

Особенностью изучения атмосферных процессов является их сложность, которая связана с неустойчивостью и изменчивостью среды, невозпроизводимостью наблюдаемых явлений.

Электрические процессы в атмосфере наиболее сложны вблизи границы раздела с земной поверхностью. Именно в прилегающем слое наблюдаются большие градиенты атмосферно-электрических характеристик. Вертикальные профили порой очень сложны и в значительной мере определяются интенсивностью перемешивания атмосферы, интенсивностью ионизации, загрязненностью и увлажненностью воздуха.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию электрической проводимости приземной атмосферы и ее пространственного распределения при наличии адсорбирующих поверхностей: различного рода аэрозолей и поверхности земли. Явление адсорбции представляет интерес при рассмотрении в физике процессов, происходящих на поверхностях раздела фаз.

Целью исследования является изучение влияния адсорбции ионов земной поверхностью на поведение удельной электропроводности в прилегающем слое атмосферы при разной интенсивности турбулентного перемешивания в различных пунктах наблюдений и влияния на распределение исследуемой величины адсорбционного поглощения ионов аэрозолями.

Для достижения указанных целей решались следующие задачи исследования:

1. накопление необходимых экспериментальных данных о физических характеристиках приземного слоя атмосферы;
2. рассмотрение статистики реализации типов профилей проводимости, отличающихся разной толщиной слоя поглощения ионов земной поверхностью;
3. выявление условий формирования вблизи земли слоя поглощения ионов при разном турбулентном обмене;
4. оценка потери ионов в нижней атмосфере вследствие адсорбции их земной поверхностью;

5. сравнение удельных электропроводностей в пунктах наблюдений с разными условиями антропогенного загрязнения атмосферы аэрозолями.
6. оценка интегрального аэрозольного загрязнения атмосферы на основании атмосферно-электрических данных

Решение поставленной выше проблемы возможно при анализе данных, полученных путем непосредственных измерений комплекса атмосферно-электрических и метеорологических характеристик. При исследовании рассматривались данные экспедиций, проводимых лабораторией геофизических исследований факультета физики ПИ ЮФУ.

## Глава 1 Представления физики о газовых ионах и процессах их диффузии и адсорбции

### 1.1 Процессы ионообразования в газах.

Газы в естественном состоянии не проводят электричества. Если поместить в сухом атмосферном воздухе хорошо изолированное заряженное тело, например, заряженный электромметр с хорошей изоляцией, то заряд электромметра долгое время практически остается неизменным. Но, подвергая газ различным внешним воздействиям, можно вызвать в нем электропроводящие свойства. Помещая вблизи заряженного электромметра пламя горелки, можно видеть, что заряд электромметра уменьшается. То есть, газ становится электропроводящим под действием высокой температуры. Если вместо пламени поместить подходящий источник света, например, ртутную лампу, дающую ультрафиолетовое излучение, то можно наблюдать утечку зарядов с электромметра. Такое же действие оказывают на газ рентгеновские лучи и излучение радиоактивных препаратов. Это показывает,

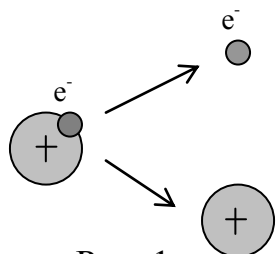


Рис. 1

что в газах под влиянием высокой температуры и различных излучений появляются заряженные частицы. Они возникают потому, что от атомов газа отщепляется один или несколько электронов, в результате чего возникают положительный ион и электроны (рис. 1).

Часть образовавшихся электронов может быть захвачена другими нейтральными атомами, и появятся еще отрицательные ионы. Отрыв электрона от атома (ионизация атома) требует затраты определенной энергии - *энергии ионизации*  $W$ . Она различна для разных веществ, потому что обусловлена особенностями строения атома [18].

Если энергия ионизации  $W$  сообщается ионизируемой молекуле другой частицей (электроном, атомом или ионом) при их столкновении, то ионизация называется *ударной*. Вероятность ударной ионизации зависит от рода ионизируемых и бомбардирующих частиц и от кинетической энергии последних.

В определенных условиях частицы могут ионизоваться и при столкновениях, в которых передается энергия, меньшая энергии ионизации  $W$ : сначала атомы (молекулы) в первичных соударениях переводятся в возбужденное состояние, после чего для их ионизации достаточно сообщить им энергию, равную разности  $W$  и энергии возбуждения. Таким образом, «накопление» необходимой для ионизации энергии осуществляется в нескольких последовательных столкновениях. Подобная ионизация называется *ступенчатой*. Она возможна, если столкновения происходят столь часто, что частица в промежутке между двумя соударениями не успевает потерять энергию, полученную в первом из них (в достаточно плотных газах, высокоинтенсивных потоках бомбардирующих частиц). Кроме того, механизм ступенчатой ионизации очень существенен в случаях, когда частицы ионизируемого вещества обладают метастабильными состояниями, т. е. способны относительно долгое время сохранять энергию возбуждения.

Ионизация может вызываться не только внешними бомбардирующими газ частицами. При достаточно высокой температуре, когда энергия теплового движения атомов (молекул) велика, они могут ионизовать друг друга за счет кинетической энергии сталкивающихся частиц газа – происходит *термическая ионизация*. Значительной интенсивности она достигает, начиная с температур  $10^3 - 10^4$  К.

Процессы, в которых ионизируемые частицы получают энергию ионизации от фотонов (квантов электромагнитного излучения), называется *фотоионизацией*. Для всех атомов и молекул газов и жидкостей энергия ионизации  $W$  такова, что этому условию удовлетворяют лишь фотоны ультрафиолетового и ещё более коротковолнового излучения. Однако фотоионизацию наблюдают и при  $h\nu < W$  за счет ступенчатой ионизации, например при облучении видимым светом большой интенсивности [29].

После прекращения действия ионизатора число ионов в газе с течением времени уменьшается. Исчезновение ионов является следствием того, что

ионы и электроны участвуют в тепловом движении. При столкновении положительного иона и электрона они могут образовать нейтральный атом. При столкновении положительного и отрицательного ионов отрицательный ион может отдать избыточный электрон положительному иону, и оба превратятся в нейтральные атомы. Этот процесс взаимной нейтрализации ионов называется *рекомбинацией* ионов. При рекомбинации освобождается определенная энергия, равная энергии ионизации [9].

## 1. 2 Диффузия газовых ионов

Образовавшиеся в газе ионы должны участвовать в тепловом движении. Это вытекает из того, что каждый из ионов за время своего существования будет испытывать весьма большое число столкновений с нейтральными молекулами, обладая в среднем той же кинетической энергией, что и нейтральная молекула или атом газа. Ионизируя какую-либо часть объёма газа, мы должны столкнуться с явлением диффузии ионов из ионизированного пространства во все стороны. Это явление так же, как и рекомбинация, приводит к уменьшению числа ионов в объёме газа, содержащем источник ионизации [18].

Диффузией, как известно, называется явление проникновения двух или нескольких соприкасающихся веществ друг в друга. Процесс диффузии возникает в газе (так же как и в любом другом веществе), если газ неоднороден по составу, т.е. если он состоит из двух или нескольких различных компонентов, концентрация которых меняется от точки к точке. Процесс диффузии заключается в том, что каждый из компонентов смеси переходит из тех частей объёма газа, где его концентрация больше, туда, где она меньше, т.е. в направлении падения концентрации.

Перемещение того или иного компонента под действием разности концентраций называется диффузионным потоком этого компонента. Измеряется он количеством диффундирующего компонента, проходящего в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной к направлению



диффузии. Возникающий при наличии разности концентраций диффузионный поток приводит к выравниванию концентраций, т.е. к уменьшению той разности концентраций, которая вызвала этот поток. Неоднородная газовая смесь, предоставленная самой себе, станет с течением времени, благодаря диффузии, однородной (газы перемешаются).

Опыт показывает, что диффузионный поток какого-либо компонента пропорционален градиенту концентрации этого компонента, взятому с обратным знаком.

Градиентом какой-нибудь скалярной величины  $G$ , зависящей от координат, называется вектор, характеризующий быстроту изменения этой величины в пространстве.

$$\overline{gradG} = \frac{\partial G}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial G}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial G}{\partial z} \vec{k} \quad (1.1)$$

Этот вектор направлен в сторону наиболее быстрого возрастания  $G$  и численно равен скорости этого возрастания в пространстве.

В дальнейшем будем рассматривать одномерный случай, когда величина меняется вдоль какого-нибудь одного направления, например, вдоль оси  $x$ . В этом случае численное значение градиента  $G$  равно скорости изменения величины  $G$  с изменением  $x$ , т. е. производной  $\frac{\partial G}{\partial x}$ . А поскольку

мы предположили, что величина  $G$  меняется только вдоль оси  $x$ , можно вместо частной производной  $\frac{\partial G}{\partial x}$  ввести в запись полную производную  $\frac{dG}{dx}$ .

Таким образом,

$$\overline{gradG} = \frac{\partial G}{\partial x}, \quad (1.2)$$

т. е. изменению величины  $G$  на единице длины.

Если концентрация  $n$  интересующего нас компонента газовой смеси меняется вдоль оси  $x$  (а по другим направлениям остаётся одинаковой), то градиентом концентрации  $n$  называется величина

$$\overline{gradn} = \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (1.3)$$

Основной закон диффузии (закон Фика), следовательно, гласит:

$$I = -D \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (1.4)$$

где  $I$  – диффузионный поток интересующего нас компонента в направлении оси  $x$ . Знак минус в правой части показывает, что диффузионный поток направлен в сторону убывания концентрации. Коэффициент  $D$  называется *коэффициентом диффузии*. Смысл его заключается в том, что он численно равен диффузионному потоку при градиенте концентрации, равном 1 [10].

Рассмотрим пример, иллюстрирующий изменение числа ионов вследствие их диффузии между пластинами конденсатора, предложенный

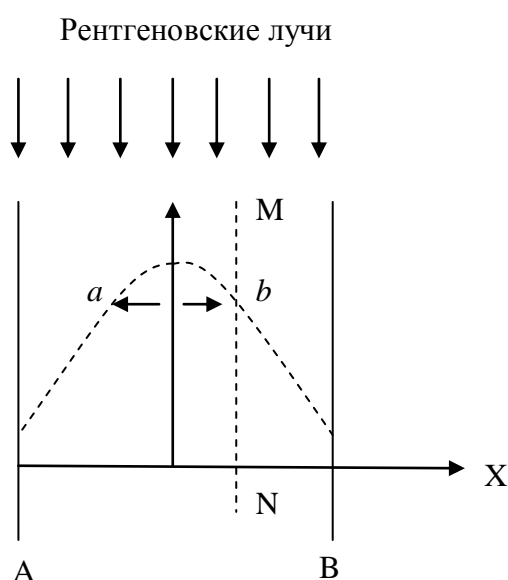


Рис. 2

Наследовым [17] (рис. 2). Газ, находящийся между пластинами  $A$  и  $B$  плоского конденсатора, ионизируется рентгеновскими лучами. Пластины соединены  $A$  и  $B$  накоротко. Электрическое поле будет при этом равно нулю. Рассмотрим какие процессы будут происходить в пространстве  $AB$ . С одной стороны, рентгеновские лучи в каждом  $\text{м}^3$  в одну секунду будут создавать  $n_0$  ионов, с

другой стороны, рекомбинация будет уничтожать в каждом  $\text{м}^3$   $an^2$  ионов в секунду, наконец, диффузия тоже будет способствовать уничтожению части ионов. Очевидно, что ионы, находящиеся вблизи электродов  $A$  и  $B$ , будут, ударяясь о них, отдавать им свои заряды. Места, прилегающие к электродам, обеднеют ионами. Возникнет, благодаря этому, разность концентрации ионов, вследствие чего из внутренней части ионы начнут переходить в приэлектродную часть. Через любую плоскость  $MN$  будет проходить в

преимущественном направлении поток ионов, зависящий от градиента концентрации  $\frac{\partial n}{\partial x}$ , где  $n$  – число ионов. В результате между  $A$  и  $B$  установится некоторое распределение ионов, зависящее от расстояния  $x$ . На приведенном чертеже построена кривая распределения ионов между пластинами плоского конденсатора (кривая  $ab$ ).

Вычислим изменение числа ионов в  $1 \text{ м}^3$  газа в единицу времени в результате диффузии, предполагая, что диффузия происходит только в одном направлении  $x$  (плоский конденсатор с пластинами больших размеров по сравнению с расстоянием между ними).

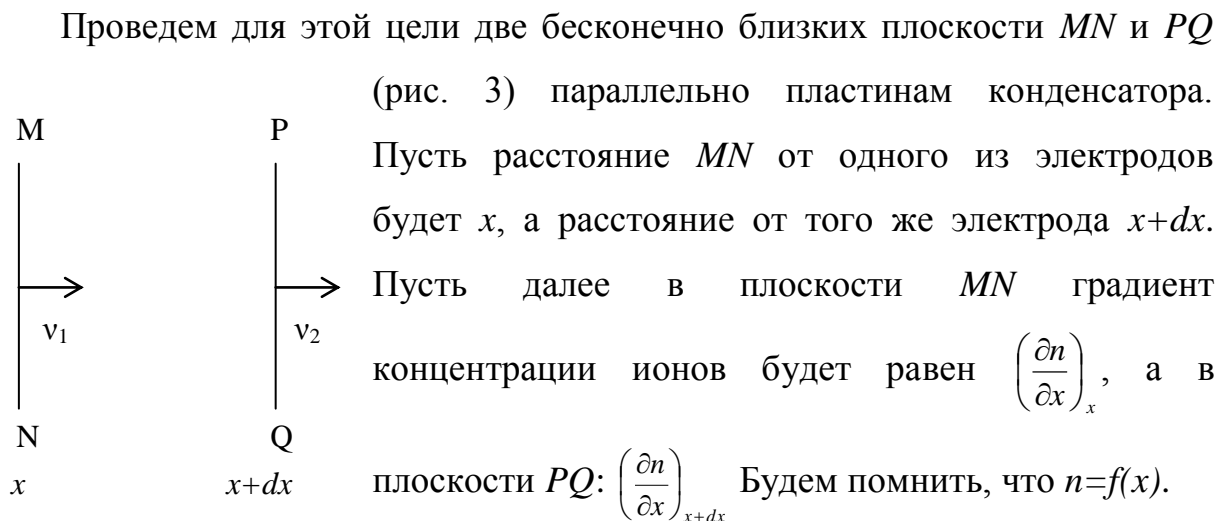


Рис. 3

Обозначим число ионов, диффундирующих через площадку в  $1 \text{ м}^2$  плоскости  $MN$  в одну секунду, через  $v_1$ , для плоскости  $PQ$  – через  $v_2$ . Числа  $v_1$  и  $v_2$  будут, как и в любом случае диффузии, пропорциональны градиентам концентрации в соответствующих местах, т.е.

$$v_1 = \left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)_x \quad \text{и} \quad v_2 = \left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)_{x+dx}, \quad (1.5)$$

Отсюда изменение числа ионов в одну секунду в объёме газа будет равно:

$$dv = D \left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)_x - D \left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)_{x+dx} = -D \left(\frac{d^2 n}{dx^2}\right) dx, \quad (1.6)$$

Изменение числа ионов вследствие диффузии в  $1 \text{ м}^3$  в одну секунду будет равно

$$v = -D \frac{d^2 n}{dx^2}, \quad (1.7)$$

Запишем уравнение для изменения числа ионов  $1 \text{ м}^3$  в одну секунду с учетом диффузии в следующей форме:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = n_0 - \alpha n^2 + D \frac{d^2 n}{dx^2} \quad (1.8)$$

Если число отрицательных ионов не равно числу положительных, то следует написать два уравнения для изменения числа отрицательных и положительных ионов в  $\text{м}^3$  в одну секунду в отдельности, т. е.:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_1}{\partial t} &= n_0 - \alpha n_1 n_2 + D_1 \frac{d^2 n_1}{dx^2}, \\ \frac{\partial n_2}{\partial t} &= n_0 - \alpha n_1 n_2 + D_2 \frac{d^2 n_2}{dx^2} \end{aligned} \quad (1.9)$$

При достижении стационарного состояния  $\frac{\partial n_1}{\partial t} = \frac{\partial n_2}{\partial t} = 0$  уравнения переписываются в следующей форме [18]:

$$\begin{aligned} n_0 - \alpha n_1 n_2 + D_1 \frac{d^2 n_1}{dx^2} &= 0 \\ n_0 - \alpha n_1 n_2 + D_2 \frac{d^2 n_2}{dx^2} &= 0, \end{aligned} \quad (1.10)$$

### 1. 3 Адсорбция атмосферных ионов

#### 1. 3. 1 Природа адсорбционных сил

Явление адсорбции представляет интерес при рассмотрении в физике процессов, происходящих на поверхностях раздела фаз. При адсорбции мы имеем в большинстве случаев взаимодействие между разными молекулами - между молекулами адсорбента (один род молекул) и молекулами адсорбата (другой род молекул).

Адсорбция широко распространена в природе и применяется в технике. Обычным примером адсорбции считается поглощение газов углём, например

в противοгазах. Адсорбция на активированном угле и на других твердых телах широко применяется в технике. Она применяется для улавливания ценных газообразных веществ, получающихся при химических производствах; в медицине – для извлечения вредных газов, получающихся внутри организма при разнообразных отравлениях, и т. п. Адсорбция играет важную роль в процессах теплообмена, разделения газовых и жидких смесей, в биохимических системах. Она является важнейшей стадией образования гетерогенных систем и главным фактором в стабилизации дисперсных систем. Адсорбция проявляется во всех процессах, где существенны поверхностные свойства веществ [31].

Адсорбционные силы являются частным случаем сил молекулярных в широком смысле этого слова.

### **Молекулярные взаимодействия**

Важность изучения проблемы молекулярных взаимодействий, в частности адсорбционных сил, обусловлена тем, что почти все физические и химические процессы природы связаны с молекулярными силами - с эффектом проявления взаимодействия между молекулами [5].

Физические и физико-химические свойства твёрдых, жидких и газообразных тел определяются величиной молекулярных сил. Кристаллы твёрдых тел распались бы, если бы не было сил взаимодействия между элементами их пространственной решётки. Свойства жидкостей - их вязкость, поверхностное натяжение, молекулярное давление - являются следствием объёмного и поверхностного молекулярных силовых полей.

### **Адсорбционные силы**

Наряду с объёмным (внутренним) молекулярным полем мы в явлениях природы наблюдаем и поверхностное молекулярное поле, возникающее на границах раздела различных фаз, например на гранях кристалла. Если на какой-либо поверхности, например на поверхности жидкости или на грани кристалла, происходит увеличение концентрации каких-либо молекул, то такое уплотнение вещества на поверхности называется *адсорбцией*;

происходит оно под действием поверхностных сил, называемых *адсорбционными силами*. Поглотитель называется *адсорбентом*, поглощаемое вещество - *адсорбатом*. Таким образом, при рассмотрении поверхностных явлений мы имеем дело с плёнкой, адсорбированной на поверхности жидкости или твёрдого тела (поверхностный слой). При исследовании таких *адсорбционных плёнок* расположенная под ними жидкость или твёрдое тело (подкладка) рассматривается как источник определённого поля адсорбционных сил, действующих на адсорбируемые молекулы [5].

### **Физическая адсорбция и хемсорбция.**

При экспериментальном изучении различных случаев адсорбции обнаруживается, что связь адсорбируемой молекулы с адсорбентом может быть более или менее прочной, изменяясь от слабых молекулярных потенциалов до высоких значений химических энергий (активированная адсорбция, поверхностные химические соединения).

В зависимости от характера взаимодействия молекул адсорбента и адсорбата различают физическую адсорбцию и хемсорбцию. Физическая адсорбция не сопровождается химическими изменениями молекул. Молекулы могут образовывать не только мономолекулярный слой, но и адсорбироваться многослойно, а также мигрировать по поверхности. Процессы хемсорбции сопровождаются образованием связи между молекулами адсорбента и адсорбата [29].

### **Кинетика процессов адсорбции и десорбции**

Адсорбированные молекулы через некоторое время (время адсорбции) покидают поверхность адсорбата – десорбируются. Количество молекул, адсорбирующихся (десорбирующихся) в единицу времени на единицу поверхности (с единицы поверхности), называется *скоростью адсорбции* (скоростью десорбции). При равенстве скорости адсорбции и десорбции имеет место адсорбционное равновесие. С ростом температуры время физической адсорбции и количество адсорбированных молекул уменьшается,

в то время как скорость хемсорбции обычно увеличивается. Скорость адсорбции повышается с увеличением концентрации и, следовательно, давления адсорбата в объёме.

Зависимость равновесной адсорбции от концентрации (давления) адсорбата при постоянной температуре называется *изотермами адсорбции*. Для описания многослойного покрытия поверхности адсорбента в системе газ – твердое тело существует несколько основных типов изотерм адсорбции [29]. Наиболее общая – изотерма Ленгмюра

$$\theta = \frac{kp}{1 + kp} \quad (1.11)$$

где  $p$  – давление,

$\theta$  – относительная степень заполнения поверхности адсорбированными молекулами,

$k$  – константа, зависящая от температуры и характера взаимодействия между частицами адсорбента и адсорбата.

Изотерма Ленгмюра может служить для описания, как физической адсорбции, так и хемсорбции, однако область её применения ограничена, как правило, низкими степенями заполнения, при которых молекулы адсорбата не взаимодействуют между собой. При более высоких значениях  $\theta$  молекулы адсорбата притягиваются не только молекулами адсорбента, но и друг к другу, поэтому по мере заполнения поверхности условия для адсорбции становятся всё более благоприятными и  $\theta$  резко возрастает с повышением  $p$ , но при степенях заполнения близких к единице, рост адсорбции резко замедляется. При дальнейшем увеличении давления происходит заполнение второго и третьего и т. д. слоёв молекулами адсорбата [29].

Ленгмюр даёт кинетическое обоснование процессу адсорбции, исходя из представлений о том, что адсорбция обуславливается существованием ненасыщенных валентностей на поверхности адсорбента. Эти направленные перпендикулярно к адсорбирующей поверхности валентности равномерно расположены на поверхности адсорбирующих участков. Молекулы

адсорбируемого газа, совершая тепловое движение, попадают в сферу притяжения этих участков и адсорбируются. Происходит их уплотнение, конденсация на поверхности адсорбента. Но одновременно некоторые из уже адсорбированных молекул вследствие того же теплового движения, обладая достаточной кинетической энергией, отрываются от поверхности, испаряясь с неё. В итоге устанавливается статистическое равновесие – за единицу времени количество испаряющихся молекул равно количеству конденсирующихся. Это равновесие наступает тогда, когда скорость конденсации, рассчитанная на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, становится равной скорости испарения [5].

### **Поверхностное молекулярное поле**

Как указывается в монографии [5], поверхностное молекулярное поле кристалла твёрдого тела тесно связано со специфическими свойствами этого кристалла (с напряжённостью поверхностного молекулярного поля, являющейся быстро убывающей функцией расстояния, с поверхностной энергией кристалла  $\frac{E_0^2}{8\pi}$ , где  $E_0$ —среднее значение напряжённости на поверхности). Поэтому, с точки зрения электрической теории адсорбции, адсорбция газа (притяжение газовых молекул) поверхностью кристалла обуславливается поверхностным молекулярным полем, определяемым решёткой кристалла.

Перейти от молекулярного поля внутри тела к молекулярному полю на его поверхности можно следующим образом.

Молекулярное поле внутри тела, величина этого поля, его характер определяются структурой тела, распределением электрических зарядов внутри него.

В случае кристаллов физика позволяет более или менее точно установить электрическую структуру, а значит, и объёмное молекулярное поле данного кристалла.



Очевидно, что те же представления должны быть распространены и на молекулярное поле на границе раздела разных соприкасающихся сред (т. е. на поверхностное молекулярное поле).

Если мы раскалываем кристалл и тем самым образуем свободную поверхность раскола (разлома), то внутреннее объёмное молекулярное поле, которое до разлома связывало между собою две половинки кристалла и обуславливало прочность кристалла, у поверхности разлома превращается в поверхностное молекулярное поле; однако природа поля при этом, разумеется, не меняется.

### **Влияние состояния поверхности твердого тела на адсорбцию**

Ильин [5] отмечает, что при изучении процессов адсорбции на поверхности твердого тела необходимо учитывать, что внешняя поверхность кристалликов адсорбента, если её рассматривать (используя оптический и электронный микроскопы) по отношению к адсорбируемым молекулам, на ней располагающимся, представляется в лучшем случае бугристой или террасистой. В большинстве же случаев эта поверхность, если не применены специальные приёмы, содержит щели и поры, более или менее глубоко идущие внутрь адсорбента. Наличие этих щелей и пор, особенно ультрапор (их поперечник соизмерим с поперечником молекул), значительно усложняет явление адсорбции. С одной стороны, силовые поля от противоположных стенок такой щели-ультрапоры частично перекрывают друг друга, а с другой стороны, большие по размерам молекулы по чисто геометрическим причинам не могут проникать в эти ультрапоры, так что для них такой ультрапористый адсорбент обладает меньшей удельной поверхностью, чем для малых по размерам адсорбируемых молекул. Интереснейшим объектом исследований, с точки зрения Ильина, который с успехом изучался многими исследователями и имеет большую практическую ценность, является адсорбция на пористых адсорбентах.

Разными случаями физической адсорбции являются [5]:

а) электростатическая адсорбция, например адсорбция дипольных молекул на ионной кристаллической решётке или её смачивание дипольной жидкостью;

б) дисперсионная адсорбция (например, адсорбция благородных газов), связанная с взаимодействиями атомов, обусловленными возмущающими эффектами квантовой механики природы.

Как отмечает Ильин [5], некоторые молекулы, в частности, молекулы благородных газов не имеют электростатических мультиполей, а обладают шаровой симметрией, и, таким образом, к ним электростатическая модель неприменима, то молекулярные силы в общем случае не могут быть сведены к чисто классическим электростатическим моделям. Очевидно, что молекулярные силы включают в себя электростатические (в классическом смысле) силы и так называемые дисперсионные силы, обязанные своим происхождением взаимным короткопериодическим возмущениям быстрых внутренних движений электронов в молекулах и приводящие к притяжениям между ними.

Потенциальная энергия при физической адсорбции в общем случае складывается из трёх компонент: *электростатической притягательной* компоненты, *дисперсионной притягательной* компоненты и компоненты *отталкивания*.

#### **«Метод электрических изображений»**

Дебай, а затем Лоренц и Ланде, а также Жаке использовали для выяснения природы адсорбционных сил так называемый «метод электрических изображений». Согласно их представлениям адсорбент рассматривается как металл, в котором индуцируется диполь, являющийся зеркальным изображением адсорбируемой молекулы-диполя.

По указанному методу энергия электрического заряда  $e$ , находящегося над поверхностью проводника (металл) на расстоянии  $z$  от неё, может

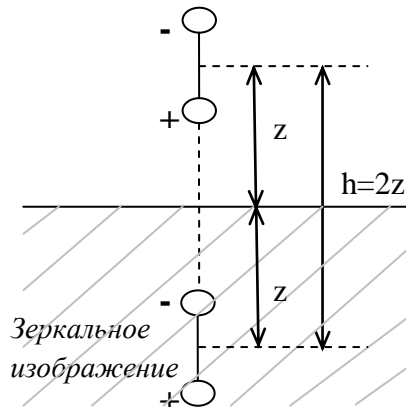


Рис. 4. Адсорбированная молекула-диполь над поверхностью адсорбента-металла и её зеркальное изображение [5].

вычисляться так, как если бы этой поверхности не было, а вместо неё на расстоянии  $h=2z$  от заряда  $e$  находился заряд той же величины, но противоположного знака. Таким же способом, очевидно, можно вычислить энергию адсорбированной молекулы — электрического

диполя, находящейся над поверхностью адсорбента — металлического зеркала, дающего зеркальное изображение зарядов на концах диполя (рис. 4). По этим представлениям диполь с электрическим моментом  $m$ , являющийся как бы «зеркальным изображением» адсорбированного диполя, создаёт в месте нахождения адсорбированного диполя электростатический потенциал

$$\varphi = -\frac{m}{h^2} \quad (1.12)$$

и напряженность поля

$$E_h = -\frac{\partial \varphi}{\partial h} = -\frac{2m}{h^3}, \quad (1.13)$$

тогда потенциальная энергия адсорбированной молекулы-диполя

$$U_m = mE_h = -\frac{2m^2}{h^3} = -\frac{m^2}{4z^3}. \quad (1.14)$$

Такова потенциальная электростатическая энергия адсорбированной молекулы-диполя с электрическим моментом  $m$ , расположенным перпендикулярно к адсорбирующей поверхности.

Вследствие теплового движения диполь выводится из положения, перпендикулярного к поверхности адсорбента, и вместо положений

адсорбированного диполя и его зеркального изображения на рис.4 мы будем иметь их положения на рис.5.

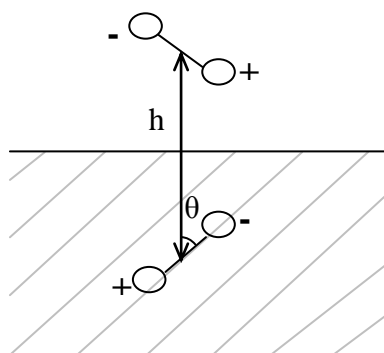


Рис. 5. Отклонение адсорбированной молекулы-диполя на угол  $\theta$  от перпендикулярного положения вследствие теплового движения [5].

Исходя из таких представлений, можно вычислить температурную зависимость для ориентационной энергии адсорбируемых диполей над металлическим адсорбентом. Однако температурный коэффициент невелик, так как адсорбционная потенциальная

энергия значительно превышает энергию теплового движения, и вследствие этого перпендикулярное расположение молекул-диполей к поверхности адсорбента обладает особенно большим значением вероятности.

### Метод Ильина

Электростатические теории адсорбции газов, основанные на «методе электрических изображений», исходят из предположения, что адсорбция не зависит от свойств адсорбента, а определяется только свойством адсорбируемых молекул, их расстояниями от адсорбирующей поверхности и от величины этой поверхности. Авторы ряда работ пытаются свести адсорбционные силы исключительно к поляризации атомов адсорбента полем адсорбированной молекулы (зеркальный эффект), производя подсчёт по методу электрических изображений, причём адсорбент рассматривается как проводник (металл). Это, очевидно, имеет место не во всех случаях адсорбции. Обширный класс неметаллических адсорбентов не укладывается в эту теорию, так как каждый неметаллический адсорбент обладает своей электрической поляризуемостью, а значит, и своим специфическим адсорбционным полем.

В работах Ильина, посвященных рассмотрению электрической теории адсорбции, адсорбируемые молекулы рассматриваются как электрические диполи. При этом учитывается, что только полярные молекулы обладают перманентными жёсткими электрическими диполями, т. е. ориентационной составляющей электрической поляризации. неполярные молекулы обладают деформационной составляющей электрической поляризации, не зависящей от температуры. Деформационная составляющая входит также, в большей или меньшей степени, в поляризацию полярных молекул, которая, таким образом, складывается из *ориентационной поляризации*, определяемой ориентацией перманентного диполя, и *деформационной поляризации*, обусловленной смещением зарядов в молекуле под действием поля, т.е. её деформацией.

Эффект деформационной поляризации обладает большей универсальностью, так как имеет место при адсорбции как полярных, так и неполярных молекул.

При построении своей электрической теории адсорбции Ильин исходит из представления о том, что, с одной стороны, поверхность адсорбента как твёрдого тела обладает поверхностным электрическим полем, а с другой, что адсорбируемые молекулы в первом приближении могут быть рассматриваемы как электрические диполи (жёсткие или мягкие), обладающие электрическими моментами, электрической поляризацией (деформационной и ориентационной).

Но наряду с  $E_0$  на величину адсорбции влияют и свойства адсорбируемой молекулы (диэлектрическая постоянная адсорбируемого газа), что является очевидным.

В самом деле, если молекула является электрическим диполем (с электрическим моментом  $m=de$ , где  $e$  - величина положительного и отрицательного зарядов, из которых схематически состоит этот диполь, а  $d$  - расстояние между ними), то она, попадая в электрическое поле адсорбента  $E_0$ , располагается по направлению силовых линий и притягивается (рис. б).

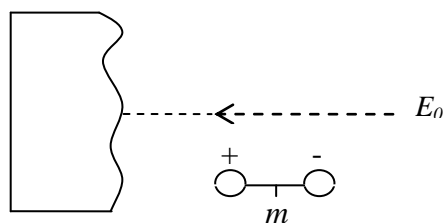


Рис.6. Ориентация адсорбированной молекулы-диполя в электрическом поле адсорбента  $E_0$  [5].

Сила, действующая на диполь,

$$f = E_0' e - E_0'' e, \quad (1.15)$$

где  $E_0'$  и  $E_0''$  - значения напряжённости поля в точках расположения положительного и отрицательного зарядов  $+e$  и  $-e$  молекулы-диполя;  $E_0' \neq E_0''$ , так как поле адсорбента

убывает с расстоянием  $r$  от поверхности. Если принять, что  $E = k \frac{e_1}{r^\nu}$ , где  $e_1$  - заряд иона решётки, то

$$E_0'' = k \frac{e_1}{(r+d)^\nu} \quad (1.16)$$

и

$$f = k \frac{e_1 e}{r^\nu} - k \frac{e_1 e}{(r+d)^\nu} \cong k \frac{e_1 \nu m}{r^{\nu+1}} \quad (1.17)$$

Если имеет место притяжение диполя ионом на поверхности кристаллической решётки, то  $\nu=2$  и

$$f = k \frac{2e_1 m}{r^3} \quad (1.18)$$

В заключение [5] отмечается, что предложенная модель молекулы как электрического диполя обладает наглядностью. Эта наглядность и заставляет в ряде вопросов пользоваться моделью молекулы-диполя и тогда, когда по существу дела эта модель является суживанием проблемы.

### 1. 3. 2 Сущность процесса адсорбции атмосферных ионов

При рассмотрении процесса адсорбции ионизированной молекулы следует учитывать, что она не является дипольной структурой. Следовательно, в формуле (1.15) компонента электростатического отталкивания равна нулю, и сила адсорбции для иона оказывается при прочих равных условиях большей, чем для нейтральной молекулы.

Остановимся подробнее на сущности процесса адсорбции атмосферных ионов. Как известно, адсорбция ионов имеет место в газе при наличии твердотельной стенки [18], а также на границе раздела между газообразной средой и жидкостью. Адсорбция ионов на поверхности тел, также как диффузия и рекомбинация, приводит к уменьшению

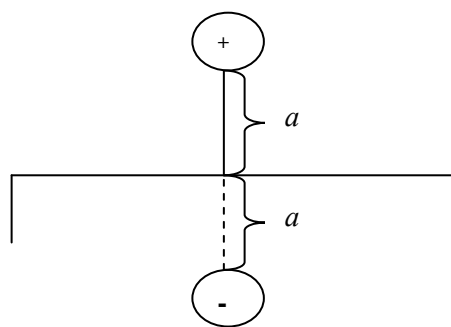


Рис. 7

числа ионов в прилегающем объеме атмосферы. Если ионы приближаются к поверхности какого-либо тела (адсорбента), то под действием молекулярных сил происходит притяжение ионов из приповерхностной области.

Действие поверхности будет таким, каким было бы действие заряда противоположного знака, по величине равного заряду иона, находящемуся на расстоянии  $a$  за поверхностью тела (рис. 7). Сила взаимодействия при этом по закону Кулона равна:

$$F = k \frac{e^2}{4a^2} \quad (1.19)$$

Под действием этой силы ион притягивается к поверхности тела. При этом ион будет двигаться со своей подвижностью. Если ион находится на расстоянии  $10^{-3}$  м от тела, то его скорость будет равна  $10^{-8}$  м/с, но уже при расстоянии  $10^{-6}$  м скорость равна  $10^{-2}$  м/с. Время, в течение которого ион с расстояний  $10^{-3}$  м и  $10^{-6}$  м притянется к стенке, будет равно соответственно 2 часа 25 мин и  $8,7 \cdot 10^{-6}$  с. Эти числа показывают, что адсорбируются очень легко и быстро лишь те ионы, которые находятся в непосредственной близости к поверхности тела. В таком случае становится очевидной роль диффузии в процессах адсорбционного пропадания ионов из приповерхностного слоя. Процесс диффузии в состоянии поставлять в приповерхностный объем новые ионы, которые будут вновь и вновь поглощаться адсорбентом.

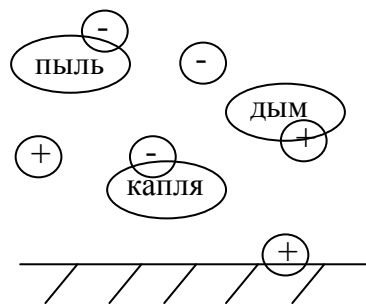


Рис. 8

В атмосфере ионы будут адсорбироваться везде, где воздух будет контактировать с поверхностью твердого тела или жидкости: во всем объеме - на частицах аэрозоля - и в приповерхностном объеме - на поверхности земли или воды (рис. 8).

## Глава 2. Ионизация приземной атмосферы и ее электрическая проводимость

### 2.1 Ионизация атмосферы. Основные её ионизаторы

Важную роль в исследовании физических процессов в атмосфере играют ее электрические свойства. Атмосфера является совокупностью различных газов, процентное содержание которых очень различно. Выше было показано, что газы в естественном состоянии практически не проводят электричества.

Образованию заряженных частиц в атмосфере способствуют различные процессы [4]. Некоторые из них имеют ограниченное значение. Например, вследствие разбрызгивания водяных капель происходит образование зарядов в воздухе. Но этот вид ионизации может иметь значение только вблизи водопадов, на морском берегу. При лесных пожарах и извержениях вулканов происходит термическая ионизация, но она также может быть значительна только в определенных условиях. Образование ионов может происходить и во время пылевых бурь, метелей, а также в процессе человеческой деятельности. Ионизация ударом, возникающая в молниях, имеет место лишь во время гроз. Ионизация может осуществляться посредством фотоэлектрического эффекта. Фотоэлектрический эффект играет важную роль в процессе ионизации в ионосфере, но в нижней атмосфере им можно пренебречь, так как солнечная радиация, содержащая длины волн, которые производят фотоэффект с молекул воздуха, поглощается в верхней части атмосферы.



Действие ионизатора (т.е. внешнего агента, вызывающего ионизацию) оценивается его интенсивностью, которая характеризуется числом пар ионов, образующихся в единице объема за единицу времени под действием данного ионизатора при нормальных условиях.

В таблице 1 приведены данные о естественных источниках ионизации атмосферы в разных ее слоях [4].

**Таблица 1:** Основные источники ионизации в разных слоях атмосферы

<b>Источник ионизации</b>	<b>Область ионизации</b>
Естественная радиоактивность	Приземный слой (до 3км)
Космические лучи	Вся атмосфера
Коротковолновое излучение Солнца	Верхняя атмосфера (выше 50км)
Солнечный ветер	Ионосфера
Молниевые разряды	Области грозовых облаков

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что для приземного слоя атмосферы основными ионизаторами являются излучения радиоактивных элементов и космические лучи.

Явление космических лучей связано с попаданием в атмосферу из космоса потока протонов очень высоких энергий. Эти первичные лучи, взаимодействуя в верхних слоях, образуют вторичные лучи: мягкие (потoki электронов и позитронов) и жесткие (мезоны и протоны) космические лучи. Космические лучи приходят из всех областей космического пространства и их действие проявляется по всему земному шару. Интенсивность ионизации атмосферы космическими лучами увеличивается с высотой до 12-15 км, где достигает максимума, и после начинает уменьшаться из-за изменения плотности атмосферы с высотой. Над морем и океаном основными ионизаторами являются лишь космические лучи.

Ионизаторами воздуха над сушей являются как космические лучи, так и излучения радиоактивных веществ, причем до высоты около 3 км последние преобладают. Радиоактивность атмосферы обусловлена содержанием радиоактивных элементов в земной коре и почве и выходом по почвенным капиллярам радиоактивных газов и продуктов их распада в атмосферу. Ионизация от радиоактивных веществ может быть вызвана  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучами (рис. 9) [12].

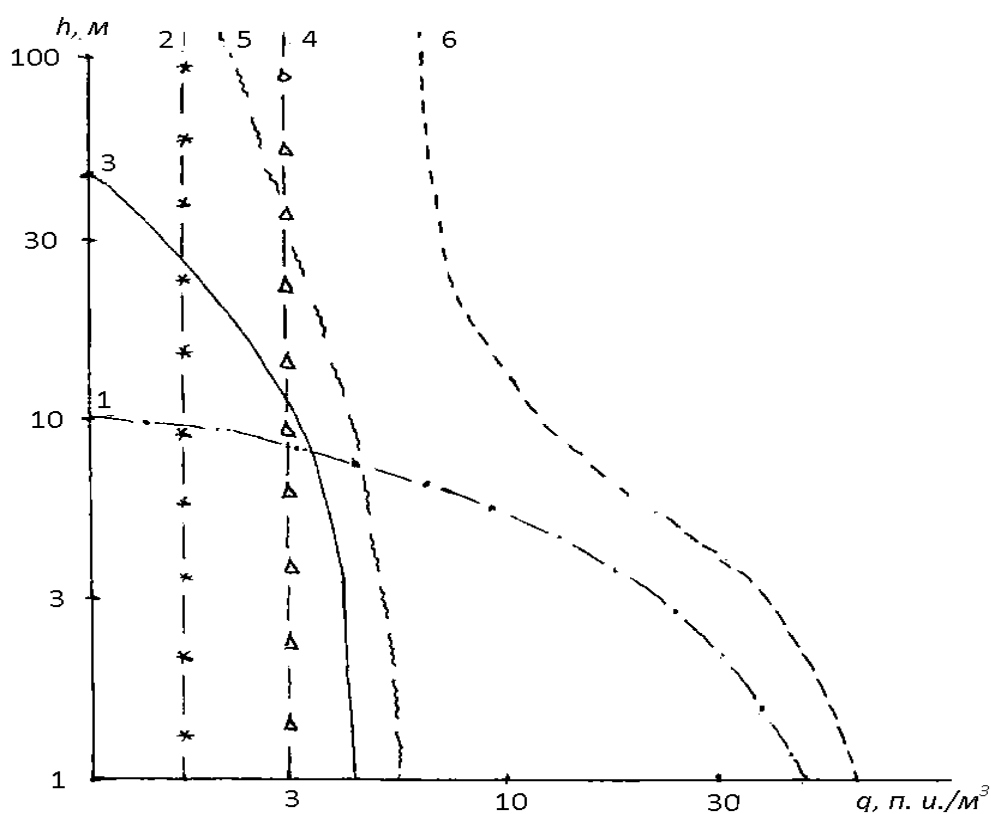


Рис. 9. Зависимость интенсивности ионообразования в приземной атмосфере от высоты. 1 -  $\alpha$ -излучение земли; 2 - космические лучи; 3 -  $\beta$ -излучение земли; 4 -  $\gamma$ -излучение земли; 5 -  $\alpha$ -излучение радиоактивных газов; 6 - общее излучение) [12].

Действие радиоактивных ионизаторов с высотой ослабевает, вследствие поглощения атмосферой радиоактивного излучения из почвы и уменьшения концентрации радиоактивных элементов, находящихся в воздухе. Содержание радиоактивных веществ в атмосфере зависит от многих факторов, в частности, от скорости поступления их 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 радиоактивным распадом, перемешиванием атмосферы (атмосферной турбулентностью) и вымыванием радиоактивных примесей осадками.

Ионизация приземного слоя атмосферы обусловлена преимущественно

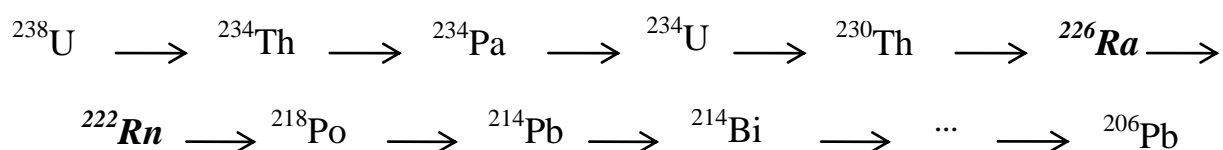


Рис. 10

выходом радиоактивных эманаций, то есть газообразных продуктов превращения изотопов радия (Rn, Tn, An). Наиболее весомым из всех источников радиации является невидимый, не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ (в 7,5 раз тяжелее воздуха) радон. В природе радон встречается преимущественно в двух основных формах: в виде радона-222 (Rn-222), члена радиоактивного ряда, образуемого продуктами распада урана-238 (рис. 10), и в виде радона-220 - торона (Rn-220), члена радиоактивного ряда тория-232. Причем по вкладу в ионизацию Rn-222 важнее (табл. 2).

**Таблица 2.** Изотопы радона

Изотоп	Наименование изотопа	Период полураспада
${}_{86}\text{Rn}^{219}$	Актинон	3,92 с
${}_{86}\text{Rn}^{220}$	Торон	54,5 с
${}_{86}\text{Rn}^{222}$	Радон	3,82 сут

При распадах радона и торона и их дочерних продуктов появляются  $\alpha$ -частицы (энергия несколько МэВ), электроны (энергии от 100 кэВ до МэВ) и  $\gamma$ -кванты (энергии несколько сотен кэВ).

Радиоактивные эманации накапливаются в почвенном газе и при благоприятных условиях диффундируют из почвы в атмосферу. Выделившись из почвы, эманации распространяются в атмосфере вследствие воздушных течений и турбулентного перемешивания воздушных слоев. Радон высвобождается из земной коры повсеместно, но его концентрация в наружном воздухе существенно различается для разных точек земного шара. Концентрация радиоактивных эманаций также зависит и от различных метеорологических условий, как-то изменения давления, влажности, изменения силы ветра.

## 2. 2 Атмосферные ионы, их характеристики

Ионный состав атмосферы в приземном слое довольно сложен. Атмосферные ионы различаются химической природой входящих в них молекул, массой, подвижностью. Под подвижностью следует понимать отношение поступательной скорости движения иона к напряженности поля. Подвижность ионов измеряется в  $\frac{м^2}{В \cdot с}$ . Подвижность ионов данного типа тем больше, чем больше длина их свободного пробега. А длина свободного пробега в широких пределах обратно пропорциональна давлению газа. Поэтому и подвижность ионов обратно пропорциональна давлению газа:  $kp = const$ . Результаты измерений также показывают, что при неизменности природы ионов, подвижность изменяется обратно пропорционально плотности газа.

В обычных условиях мономолекулярные ионы, образованные в результате ионизации, существуют очень короткое время, практически мгновенно к ним в результате действия поляризационных сил присоединяются нейтральные молекулы; образуется достаточно устойчивый комплекс из 10-15 молекул, несущий, как правило, один элементарный заряд. Это образование в атмосферном электричестве принято называть легким

(комплексным, малым) ионом (рис. 11), в последнее время предлагается называть их кластерными ионами [21].

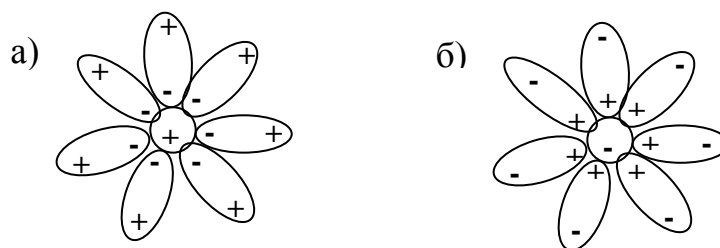


Рис. 11 .Легкий (комплексный) атмосферный ион: а) положительный, б) отрицательный.

Средняя подвижность отрицательных ионов, как правило, больше средней подвижности положительных, так как согласно теории Дж. Томпсона отрицательная частица может проходить часть пути от катода к аноду в виде свободного электрона. Можно выделить несколько групп ионов в зависимости от их подвижности и геометрических размеров.

В атмосфере постоянно находятся мельчайшие аэрозольные частицы с размерами больше молекулярного. Сталкиваясь с ними, легкие ионы отдают им свой заряд. Эти заряженные частицы получили название тяжелых или больших ионов, их также называют «ионами Ланжевена» по имени впервые их обнаружившего в атмосфере ученого П. Ланжевена. Кроме этих ионов в атмосфере существуют так называемые средние или промежуточные ионы. Это ионы, значения подвижности которых лежат между значениями подвижностей легких и тяжелых ионов. Природа промежуточного иона в настоящее время до конца не изучена [25].

Некоторые исследователи обнаружили, что атмосферные ионы можно разделить на группы, в каждую из которых входят ионы с определенным диапазоном подвижностей. При этом ионов с промежуточными значениями подвижностей не наблюдалось, то есть ионный спектр был дискретным. В то же время другие исследователи обнаружили непрерывный диапазон подвижностей [27]. По вопросу о том, дискретен ли спектр подвижности ионов или непрерывен, нет единого мнения.

В таблице 3 приведены средние значения подвижностей и радиусов ионов разных групп, согласно установившейся национальной классификации [28].

**Таблица 3:** Характеристики основных групп атмосферных ионов

Группа	Подвижность, $m^2/V \cdot c$	Радиус, $10^{-10} m$
Легкие ионы	$>10^{-4}$	6,6
Средние (промежуточные) ионы	$10^{-6}-10^{-7}$	6,6-80
Тяжелые ионы	$10^{-7}-10^{-8}$	250-500

Ионный спектр может значительно изменяться в зависимости от физического состояния воздуха и местных условий. Наблюдения показывают, что тип спектра ионов в атмосфере зависит от степени чистоты и влажности воздуха.

### 2.3 Электропроводность атмосферы

Электропроводность атмосферы является важнейшей атмосферно-электрической характеристикой, определяющей, наряду с остальными электрическими характеристиками атмосферы, таких как напряженность электрического поля, плотность объемного заряда, ее общее электрическое состояние. Изучение проводящих свойств атмосферы в различных точках земного шара, в разных метеорологических условиях необходимо для разрешения общетеоретических проблем атмосферно-электрической науки, так и необходимости решения вопросов прикладного характера. К ним относятся: проблемы снижения потерь при электропередаче высоких напряжений и расчета ЛЭП, уменьшение электризации самолетов, которая растет пропорционально третьей степени скорости самолета [7], облегчение поиска залежей радиоактивных руд, влияние изменений электрического состояния атмосферы на живой организм и т.д.

Проводимость атмосферы обусловлена наличием ионов, которые находясь в электрическом поле ( $E$  - напряженность), движутся вдоль силовых линий со скоростями  $b_+E$  и  $b_-E$ . Если число ионов в единице объема – концентрация – обозначить  $n$ , а заряд каждого иона  $e$ , то через каждую единицу площади поверхности, перпендикулярной к вектору напряженности поля в единицу времени будет переноситься в направлении силовых линий поля количество электричества  $eb_+n_+E$ , а в противоположную сторону  $eb_-n_-E$ . Суммарное количество электричества через единичную площадку в единицу времени или плотность тока:

$$i = i_+ + i_- = E[eb_+n_+ + eb_-n_-], \quad (2.1)$$

где произведение заряда иона на подвижность и его концентрацию есть проводимость среды. Проводимости, обусловленные положительными и отрицательными ионами, так называемые полярные проводимости, их сумма дает полную или суммарную проводимость  $\lambda_{\pm}$ :

$$\lambda_+ = eb_+n_+ \text{ и } \lambda_- = eb_-n_- \quad (2.2)$$

Как уже отмечалось, атмосферные ионы можно разделить на три группы, каждая из которых характеризуется определенными значениями подвижностей. Поэтому для проводимости атмосферы справедливо следующее:

$$\lambda = neb + n_{cp}eb_{cp} + NeB, \quad (2.3)$$

где  $n$ ,  $b$ - концентрация и подвижность легких ионов,  $n_{cp}$ ,  $b_{cp}$  – средних,  $N$  и  $B$  - тяжелых ионов.

Так как подвижность средних и тяжелых ионов много меньше подвижности легких, то доля их участия в проводимости воздуха очень мала, несмотря на их большие концентрации. Исходя из этого, можно пренебречь вторым и третьим членом в уравнении и для проводимости атмосферы записать:

$$\lambda = neb \quad (2.4)$$

Проводимость атмосферы обусловлена легкими ионами, и результаты наблюдений за электропроводностью показывают, что она ведет себя в значительной мере идентично концентрации легких ионов.

Средние величины электропроводности атмосферы вблизи земной поверхности изменяются в широких пределах: от 2 фСм/м до 50 фСм/м и выше [28]. Изменение электропроводности с высотой в приземном слое обусловлено тем, что она тесно связана с общим физическим состоянием атмосферы, изменением ионизации. Вследствие того, что ионизационное состояние атмосферы зависит от расположения точки наблюдения, электропроводность в значительной степени определяется местными особенностями.

На проводимости существенно сказывается появление в атмосфере различных примесей (мелкие пылинки, капельки и другие частицы). Легкие ионы, оседая на этих примесях, превращаются в тяжелые ионы, что приводит к уменьшению электропроводности.

#### 2. 4 Ионизационно-рекомбинационные процессы

Исчезновение ионов объясняется тем, что ионы и электроны участвуют в тепловом движении, и неизбежны столкновения. От того, насколько интенсивно идут процессы ионообразования и рекомбинации ионов, зависит ионизационное состояние газа, которое характеризуют величиной, называемой, как уже отмечалось, концентрацией ионов  $n$ , то есть количеством ионов в единице объема газа. Изменения во времени концентрации легких атмосферных ионов описывается известным ионизационно-рекомбинационным уравнением, которое для случая атмосферы, содержащей аэрозоли, записывается следующим образом:

$$\frac{dn_+}{dt} = q - \alpha_+ n_+ n_- - \beta_+ n_+ N_- - \gamma_+ n_+ N_0 \quad (2.5)$$

$$\frac{dn_-}{dt} = q - \alpha_- n_- n_+ - \beta_- n_- N_+ - \gamma_- n_- N_0 \quad (2.6)$$



где  $q$  - интенсивность ионообразования (число пар ионов, образующихся в единице объема за единицу времени),  $\alpha$  - коэффициент рекомбинации,  $\gamma$  и  $\beta$ -коэффициенты присоединения легких ионов к аэрозолям,  $n_+$  и  $n_-$  - полярные концентрации атмосферных ионов,  $N_+$  и  $N_-$  - концентрации заряженных аэрозолей,  $N_0$  - концентрация незаряженных аэрозолей.

## 2. 5 Атмосферные аэрозоли

Наличие в атмосфере взвешенных частиц позволяет рассматривать ее как коллоидную систему: растворителем является смесь газов – воздух, твердые и жидкие примеси являются аэрозолями. Размеры аэрозольных частиц варьируют в широких пределах: от 0,002 мкм до 1 мкм. Частицы, размер которых составляет 0,01-0,2 мкм, оказывают существенное влияние на значения величин атмосферного электричества.

Аэрозоли отличаются по химическому составу и источнику образования, являясь продуктом сложных физических и химических процессов. [1]

К аэрозолям природного происхождения относятся продукты испарения морских брызг, минеральная пыль, вулканическая пыль, частицы, образовавшиеся в результате конденсации летучих органических соединений. Следует выделить и аэрозоли антропогенного происхождения: промышленные выбросы (дым, сажа, дорожная пыль), продукты химических реакций газов.

Океанические аэрозоли – это, как правило, легкорастворимые и гигроскопичные вещества. Их концентрация зависит от химического состава воды, динамики атмосферных процессов. Частицы почвенного происхождения являются основным аэрозольным компонентом нижней атмосферы. Их концентрация зависит от таких факторов как: вид почвы, ее физическое состояние (влагосодержание, нарушение пахотного слоя), состояние атмосферы (перемешивание, конвективные потоки, ветер).

Так называемые вторичные аэрозоли образуются при трансформации атмосферного аэрозоля в газовой и жидкой фазах в результате адсорбции молекул газа на поверхности твердых частиц.

Частицы, находящиеся в атмосфере, большей частью могут служить ядрами конденсации. Таким образом, они оказывают влияние на общее физическое состояние атмосферы: способствуют появлению зародышевых капель воды, влияют на радиационный баланс, дальность видимости. Современное исследование модели аэрозоля позволяет рассматривать его как климатообразующий фактор [1].

## **2. 6 Связь атмосферно-электрических характеристик с загрязнением**

Интерес к атмосферно-электрическим параметрам как индикаторам загрязнения атмосферы в атмосферном электричестве обозначился давно. Из обзора работ экологической направленности следует, что в настоящее время ведется поиск комплексного атмосферно-электрического параметра для контроля интегрального загрязнения.

Изучению влияния аэрозольных частиц на атмосферно-электрические параметры посвящено немало работ отечественных и зарубежных авторов [2, 8, 11, 13, 23, 22, 24, 30]. В частности, Семенов рассматривал связь элементов атмосферного электричества (концентрация легких ионов, электропроводность, напряженность поля) с загрязнением воздуха. Он указывал, что низкие значения электропроводности в приземном слое наблюдаются при условиях, способствующих накоплению аэрозолей вблизи земной поверхности (низкие скорости ветра, температурные инверсии). Уменьшение электропроводности вблизи крупных промышленных центров, а также при направлениях ветра со стороны более загрязненных районов отмечали Семенов и Колоколов [11] в п. Воейково (15 км на В от Санкт-Петербурга), Двали и Калаиджиева [3] в г. Душети (город заселен на ЮЗ от

наблюдательной площадки), Петров, Петрова и Панчишкина [19] в г.Ростов-на-Дону (город заселен на 3, ЮЗ от пункта наблюдений).

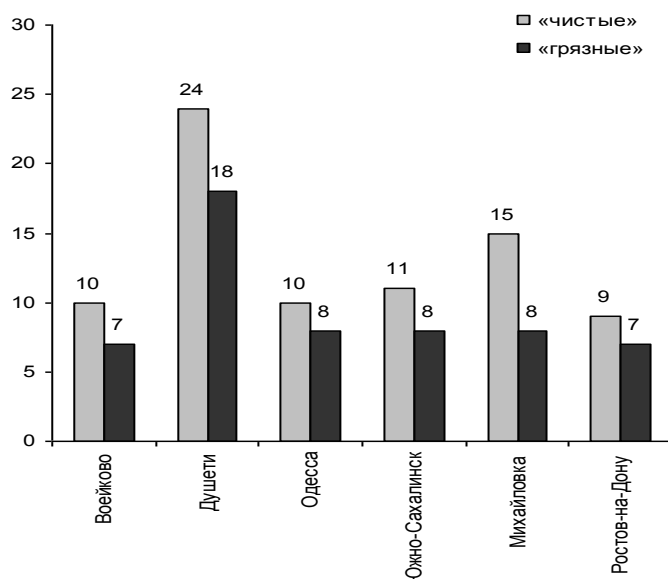


Рис. 12. Суммарная электропроводность атмосферы  $\lambda$  (фСм/м) при различных условиях

При известном расположении источников загрязнений можно выделить «чистые» и «грязные» направления ветра. На рисунке приведены осредненные таким способом значения электропроводности. Можно увидеть устойчивое снижение проводимости при «грязных» направлениях для различных пунктов наблюдений.

Из анализа данных измерения электропроводности в различных регионах следует, что ее уменьшение вызвано увеличением концентрации в воздухе аэрозольных частиц. Это позволяет говорить о том, что электропроводность может служить индикатором аэрозольного загрязнения.

Подобным индикатором загрязнения атмосферы может служить и концентрация легких ионов [20, 21, 25, 26].

В таблице 4 представлены средние значения концентраций положительных и отрицательных ионов для различных пунктов наблюдений [3, 11, 22], в том числе и пунктов, расположенных в Ростовской области, полученные по данным экспедиционных исследований группы.

Как видно из таблицы, крупные города характеризуются низкими значениями концентраций легких ионов по сравнению с таковыми для пунктов, в которых отсутствует антропогенное влияние.

**Таблица 4:** Средние значения концентрации легких ионов

Пункт	$n_+$ , ион/см <sup>3</sup>	$n_-$ , ион/см <sup>3</sup>	Примечания
о.Циглера	400	1650	Арктическая местность
Душети	300	270	Город. Горная местность
о.Байкал	590	490	Берег озера, тайга
Маштак	290	125	Пустыня в Калмыкии
с.Михайловка	360	290	Сельская местность
п.Воейково	240	175	Пригород Санкт-Петербурга
Ростов-на-Дону	200	180	Город
Москва	230	250	Город

Можно отметить, что на значения концентрации легких ионов в атмосфере в селе Михайловка и пустыне Маштак скорее всего сказывается действие природного аэрозоля (пыль и др.).

В качестве индикатора наличия в атмосфере аэрозолей может служить и градиент потенциала электрического поля Земли. В процессе измерений замечено, что появление помутняющих частиц в атмосфере приводит к тому, что значения градиента потенциала не только уменьшаются, но и переходят в область отрицательных значений [13, 14]. Такое влияние аэрозоля можно заметить при непрерывной регистрации градиента потенциала вблизи земной поверхности в ненарушенном состоянии и в часы с повышенным содержанием аэрозолей. Снижение градиента потенциала при наличии аэрозолей у поверхности земли сказывается на вертикальном распределении градиента потенциала электрического поля атмосферы в приземном слое при повышенном содержании аэрозолей.

### **Глава 3. Результаты экспериментальных исследований электрической проводимости приземной атмосферы и ее пространственного распределения при наличии адсорбирующих поверхностей**

#### **3.1 Приборы и методы измерений и обработки данных**

Изменения физических характеристик атмосферы имеют вероятностную природу, что позволяет в значительной мере ориентироваться на статистические методы обработки и анализа результатов экспериментальных наблюдений.

Для оценки репрезентативности данных использовалась стандартная погрешность  $S_x$  (статистическая ошибка, или ошибка репрезентативности выборки) определения выборочного среднего величины  $x$ :

$$S_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

где  $n$  – объем выборки,  $\sigma_x$  - выборочное стандартное отклонение величины  $x$ :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

При обработке данных использовались программные средства Microsoft Excel.

#### **3.1.1 Измерение удельной электропроводности**

Исходя из задач исследований, полярные электропроводности в ходе эксперимента измерялись на разных высотах. Осуществлялось это путем последовательного помещения датчика электропроводности на 6 различных уровнях от 0,05 до 3 метров (0,05; 0,3; 0,6; 1,0; 2,0; 3,0 м).

Измерение полярных электропроводностей осуществлялось прибором Гердиена, работающим по методу разряда. Применявшийся нами аспирационный цилиндрический конденсатор имеет следующие параметры: длина внутреннего электрода- 200 мм, его радиус–3,5 мм, радиус наружного электрода – 36 мм. Наружный электрод конденсатора заземлен. Для

формирования ламинарного воздушного потока наружный электрод снабжен, как обычно, раструбами. Внутренний собирающий электрод соединен с электрометром или электростатическим вольтметром, будучи закреплен непосредственно на его входном изоляторе. Скорость аспирации воздуха в конденсаторе контролировалась ручным чашечным анемометром, установленным перед аспиратором за собирающим электродом, и регулировалась таким образом, чтобы заметно превышать критическое значение. Для потенциала внутреннего электрода 75 В и критической подвижности ионов  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  критическая скорость воздушного потока в конденсаторе составляла 2 м/с.

Полярные электропроводности измерялись поочерёдно, для чего на внутренний электрод, находящийся в аспирируемом воздухе, подавался положительный или отрицательный потенциал, равный 75 В и устанавливаемый по электрометру. По истечении 2 минут аспирации отсчитывалось новое значение потенциала  $\varphi_t$ . Значение полярной электропроводности  $\lambda'$  при этом можно подсчитать по известной формуле:

$$\lambda' = \frac{\varepsilon_0 (C + C')}{t \cdot C} \ln \frac{\varphi_0}{\varphi_t} \quad (3.3)$$

(здесь  $C$  и  $C'$  - емкости электрода и электрометра соответственно,  $t$  – время аспирации,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума).

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

Измерение  $\Delta$  осуществлялось аналогично измерению электропроводности, но при закрытом конденсаторе без аспирации воздуха. Подсчёт  $\Delta$  производился по формуле:

$$\Delta = \frac{\varepsilon_0}{t} \left( \frac{C + C'}{C} - 1 \right) \ln \frac{\varphi_0}{\varphi_t} \quad (3.4)$$

Окончательно значение полярной электропроводности определялось как  $\lambda = \lambda' - \Delta$ , что обеспечивает, прежде всего, надёжный учёт утечек по изоляции.

Значения  $\Delta$  мало менялись в ходе эксперимента и редко превышали 0,5 фСм/м. В случаях существенного увеличения  $\Delta$  производилась чистка конденсатора, так как причиной увеличения  $\Delta$  были, как правило, паутина, травинка или попавшее в конденсатор насекомое, шунтирующие входное сопротивление электрометра.

Достоинством применявшегося метода измерения электропроводности является его традиционность. Метод этот хорошо известен и описан, методики измерений и обработки материала отработаны десятилетиями.

### **3. 1. 2 Измерения концентрации радона-222**

Одновременно с электропроводностью на тех же уровнях той же мачты радонOMETром «Alpha-guard» измерялась объемная радиоактивность радона-222 (Rn-222) в атмосфере. РадонOMETр работает по методу ионизационной камеры с медленной принудительной сменой объема воздуха. Специальный фильтр прибора обеспечивает попадание внутрь камеры радиоактивного изотопа  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ , задерживая прочие изотопы, влагу и пыль. При установке датчика на очередной высоте осуществляется интенсивная прокачка воздуха с той целью, чтобы осуществить быстрый забор воздушной пробы с нужного уровня в атмосфере. Затем исследуемый воздух медленно аспирируется через ионизационную камеру, что позволяет измерять объемную активность радона непрерывно. Для синхронизации измерений полярных электропроводностей и концентрации радона прибор настроен так, что осреднение объемной активности Rn-222 по времени осуществляется датчиком для 10-минутных интервалов.

В основу метода измерения интегральной объемной активности радона-222 комплексом КСИРА-2010z (комплекс средств измерений интегральной объемной активности радона-222), применявшегося для

измерения концентрации радона в почвенном газе, положен трековый метод регистрации  $\alpha$ -частиц с помощью специальных пленочных нитратцеллюлозных материалов (трековых детекторов). При распаде радона и его короткоживущих дочерних продуктов (RaA и RaC) образуются  $\alpha$  – частицы, которые, попадая на трековый детектор, приводят к образованию в его объеме радиационных дефектов (треков). После специальной химической обработки (травления) и сушки треки легко могут наблюдаться даже в обычный оптический микроскоп с увеличением 400х или более. Поверхностная плотность треков в чувствительном объеме детектора пропорциональна интегральной объемной активности радона в воздухе и длительности экспозиции ТД в контролируемой атмосфере.

Диффузионная камера с трековым детектором конструктивно состоит из цилиндрического корпуса, внутри которого на специальных направляющих установлена рамка с чувствительным материалом - трековым детектором. На открытую торцевую сторону корпуса устанавливается мембранный фильтр. Материал мембранного фильтра диффузионной камеры с трековым детектором подобран таким образом, чтобы за счет диффузии в рабочий объем камеры попадал только радон-222. В качестве материала фильтра использован силиконовый каучук толщиной порядка 50 $\mu$ , который одновременно обеспечивает отфильтровывание аэрозолей,  $^{220}_{86}Rn$  (торона) и, частично, влаги из воздуха. Диффузионную камеру экспонируют в контролируемой атмосфере в течение заданного времени, которое зависит от выполняемых задач. В экспедициях диффузионные камеры устанавливались в почве на глубине 0,1, 0,6 и 0,9 м и экспонировались в течение 2-3 суток.

Источником эманаций, присутствующих в атмосферном воздухе, являются горные породы и почвы, поэтому концентрация эманации зависит от интенсивности выделения (эксхалляции) их из почв. Кроме того, радиоактивное "дыхание" почвы зависит от изменения концентрации радона в почвенном газе с глубиной, а также от проницаемости почвы. Значения скорости эксхалляции радона-222 из почвы в атмосферу  $R$  для разных пунктов



наблюдений подсчитывались с использованием данных о концентрации радона-222  $A_1, A_2, A_3$  в почве на трех глубинах  $x_1, x_2, x_3$  по формулам:

$$R = Def \cdot gradA(x) \Big|_{x=0} \quad (3.5)$$

$$gradA(x) \Big|_{x=0} = C \cdot \left[ \frac{A_1}{x_1} + \frac{A_2 - A_1}{x_2 - x_1} \cdot e^{\Theta \cdot \frac{x_2}{2}} + \frac{A_3 - A_2}{x_3 - x_2} \cdot e^{\Theta \cdot \frac{(x_2 + x_3 - x_1)}{2}} \right] \quad (3.6)$$

где  $C = \frac{1}{3e^{\Theta \cdot \frac{x_1}{2}}}$ , а

$$\Theta = \frac{2}{3} \left[ \frac{1}{x_2} \ln \left[ \frac{A_1}{x_1} \cdot \frac{(x_2 - x_1)}{(A_2 - A_1)} \right] + \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left[ \frac{A_2 - A_1}{A_3 - A_2} \cdot \frac{x_3 - x_2}{x_2 - x_1} \right] + \frac{1}{x_2 + x_3 - x_1} \ln \left[ \frac{A_1}{x_1} \cdot \frac{(x_3 - x_2)}{(A_3 - A_2)} \right] \right].$$

Необходимо отметить, что в пунктах почвы черноземные. В соответствии с этим значения эффективного коэффициента диффузии радона в почве  $Def$  при подсчетах принимались  $2,00 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

### 3. 1. 3 Измерение метеорологических характеристик

Метеорологические измерения являются неременной частью экспедиционного комплекса, поскольку, как показал опыт исследований, это способствует пониманию физических процессов в атмосфере и позволяет успешнее интерпретировать результаты атмосферно-электрических наблюдений.

Для измерения температуры и определения характеристик влажности воздуха на уровнях 0,5; 1,0; 2,0 метра использовались аспирационные психрометры Ассмана, которые перед началом измерений тщательно сверялись в лабораторных условиях. Чашечными анемометрами определялась скорость ветра на высотах 0,5; 2,0; 5,0 метра. Температура почвы измерялась почвенными термометрами Савинова на стандартных для этих термометров глубинах: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20 метра.

Измерения метеорологических величин выполнялись в начале каждого часа в течение 10 минут. Велись также визуальные наблюдения за направлением ветра, видом и количеством облачности, наличием помутняющих атмосферу факторов (дымка, туман, пыль при работе сельскохозяйственных машин, дым от лесного пожара и т.п.).

Ежечасные градиентные измерения метеорологических характеристик в нижнем 2-метровом слое позволяют определять коэффициент турбулентности по методу Орленко на основании данных о температуре воздуха и скорости ветра на высотах 0,5 и 2 метра, а также параметр стратификации нижнего слоя атмосферы по методу Будыко.

### **3. 1. 4 Описание пунктов наблюдений**

Пункты наблюдений располагались на территории Ростовской области в Кашарском районе. Район степной, сельский, всхолмленная равнина, балки, овраги. Расположен на севере области, на краю литосферной плиты Русской равнины, удален от промышленных центров и связанных с ними источников загрязнений. Климат сухой.

*Первомайское* – площадка располагалась в 6 километрах от с. Первомайское на обширном ровном сельскохозяйственном поле, покрытом стерней и окруженном сельскохозяйственными угодьями (посевы зерновых культур, паровые площади). Под датчиками на площади не менее 20x20 м<sup>2</sup> стерня была аккуратно срезана на уровне земли.

*Орловский* - площадка в Орловском районе Ростовской области. Район сельский, полупустынная зона, равнина. Расположен на юго-востоке области в Сальских степях, удален от промышленных центров и связанных с ними источников загрязнений. Измерительная площадка находилась рядом с пос. Орловский на сельскохозяйственном поле примерно 1000x1000 м<sup>2</sup> с невысоким травостоем. Растительность под датчиками была срезана на уровне земли на площади не менее 50x50 м<sup>2</sup>.

## **3. 2 Исследование нижней части вертикального профиля электропроводности атмосферы в слое, прилегающем к адсорбирующей земной поверхности**

Исследование вертикального распределения удельной электрической проводимости атмосферы вблизи деятельной поверхности: твердой в случае

территории или жидкой на акваториях, - имеет большое значение для понимания закономерностей электрических процессов в нижнем слое атмосферы. Особенностью этого слоя является близость поверхности, которая представляет собой границу раздела двух фаз: газообразной и твердой (приземный слой) или жидкой (приводный слой).

Как показывают исследования [34], в приземном слое атмосферы удельные электропроводности уменьшаются с высотой выше некоторого уровня  $H$ , где профили полярных электропроводностей можно аппроксимировать степенной функцией:

$$\lambda = ch^{-\alpha} \quad (3.7)$$

Здесь  $\lambda$  – удельная электропроводность атмосферы в приземном слое на высоте  $h$ ,  $c$  и  $\alpha$  – эмпирические константы, зависящие от условий перемешивания атмосферы и содержания в ней радона. Уменьшение электропроводности по мере удаления от земной поверхности обусловлено главным образом снижением с высотой содержания в воздухе радона-222, поступающего в атмосферу из почвы.

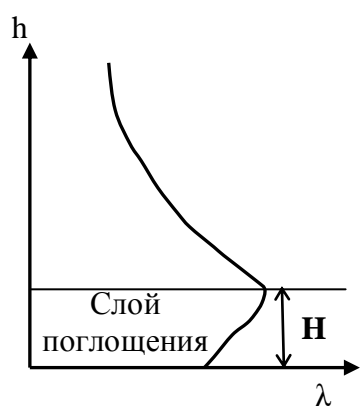


Рис. 13

Ниже уровня  $H$  находится слой, который может быть назван слоем поглощения (рис. 13). Для этого слоя характерно уменьшение электропроводности атмосферы по мере приближения к земле. Этот слой относительно обеднён ионами вследствие адсорбции их поверхностью почвы, а при наличии растительного покрова - и поверхностью растений.

Для анализа поведения вертикального профиля электрической проводимости вблизи земной поверхности использованы результаты измерений полярных электропроводностей трех экспедиций на территории Ростовской области: в пос. Орловский в 1999 г., в с. Первомайское в 1992 и 1994 годах

При анализе экспериментальных данных было обнаружено, что в отношении поглощения ионов почвой из нижнего слоя атмосферы можно выделить несколько типов профилей, которые условно были названы типами I, II, III, IV (рис. 14).

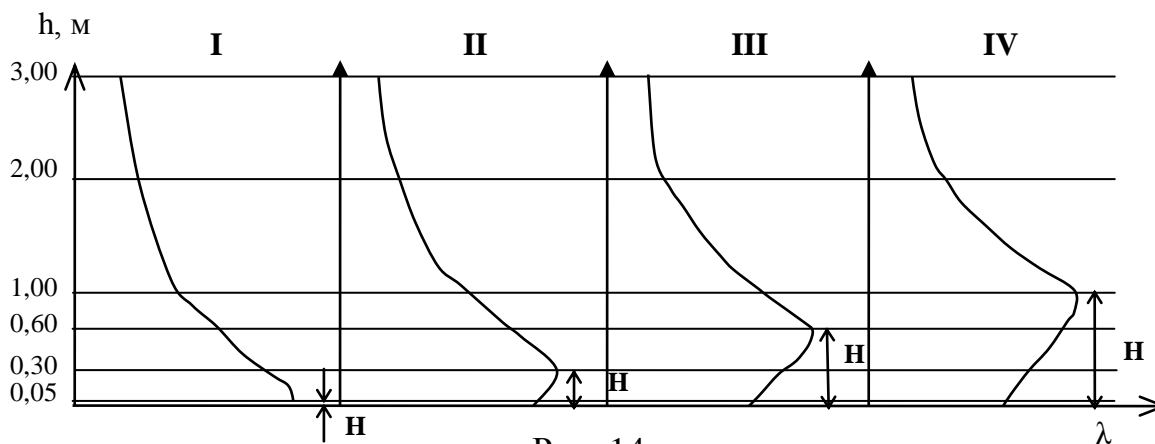


Рис. 14

Были построены вертикальные профили полярных электропроводностей атмосферы в слое от 0,05 до 3 м для каждого замера. Затем они были сгруппированы по указанным типам отдельно для дневных и ночных часов, поскольку дневные и ночные метеоусловия в летний период на территории Ростовской области существенно разнятся: дневное время характеризуется интенсивным турбулентным перемешиванием, а в ночное время при ослабленном ветре турбулентный обмен, как правило, незначителен. Далее для каждой группы было произведено осреднение электропроводности по уровням, и построены графики осредненных вертикальных профилей каждого типа.

Примеры осредненных профилей представлены на рис. 15, 16. Маркерами показаны результаты эксперимента, линии представляют собой кривые степенной функции, которой с помощью программных средств Microsoft Excel аппроксимировались экспериментальные данные. Для расчета аппроксимирующей кривой брались результаты измерений на высотах, расположенных выше слоя поглощения: для I типа это высоты 0,05÷3 м, для II типа - 0,3÷3 м, для III типа 0,6÷3 м и для IV типа соответственно 1÷3 м.

Проведенные исследования показали, что как в ночные, так и в дневные часы в разных пунктах наблюдений Ростовской области толщина слоя поглощения может достигать 0,6-1 м. В то же время ночью в большинстве случаев (80-95%) она составляет не более 0,3 метра (профили типа I и II). В дневное время доля профилей типа I и II также превалирует (60-65%), но профили типа III и IV встречаются значительно чаще, чем ночью (рис. 17).

Исследовались метеоусловия, при которых реализуется тот или иной профиль электропроводности атмосферы. Попытки выяснить, какие условия способствуют появлению того или иного типа профиля, позволили установить, что наиболее частые ночью профили I и II (тонкий слой поглощения) реализуются в ситуации наиболее глубокой инверсии температуры воздуха, когда ослаблено турбулентное перемешивание (рис. 18). С ростом коэффициента турбулентности в ночных условиях толщина слоя поглощения, как видно из диаграммы, растет.

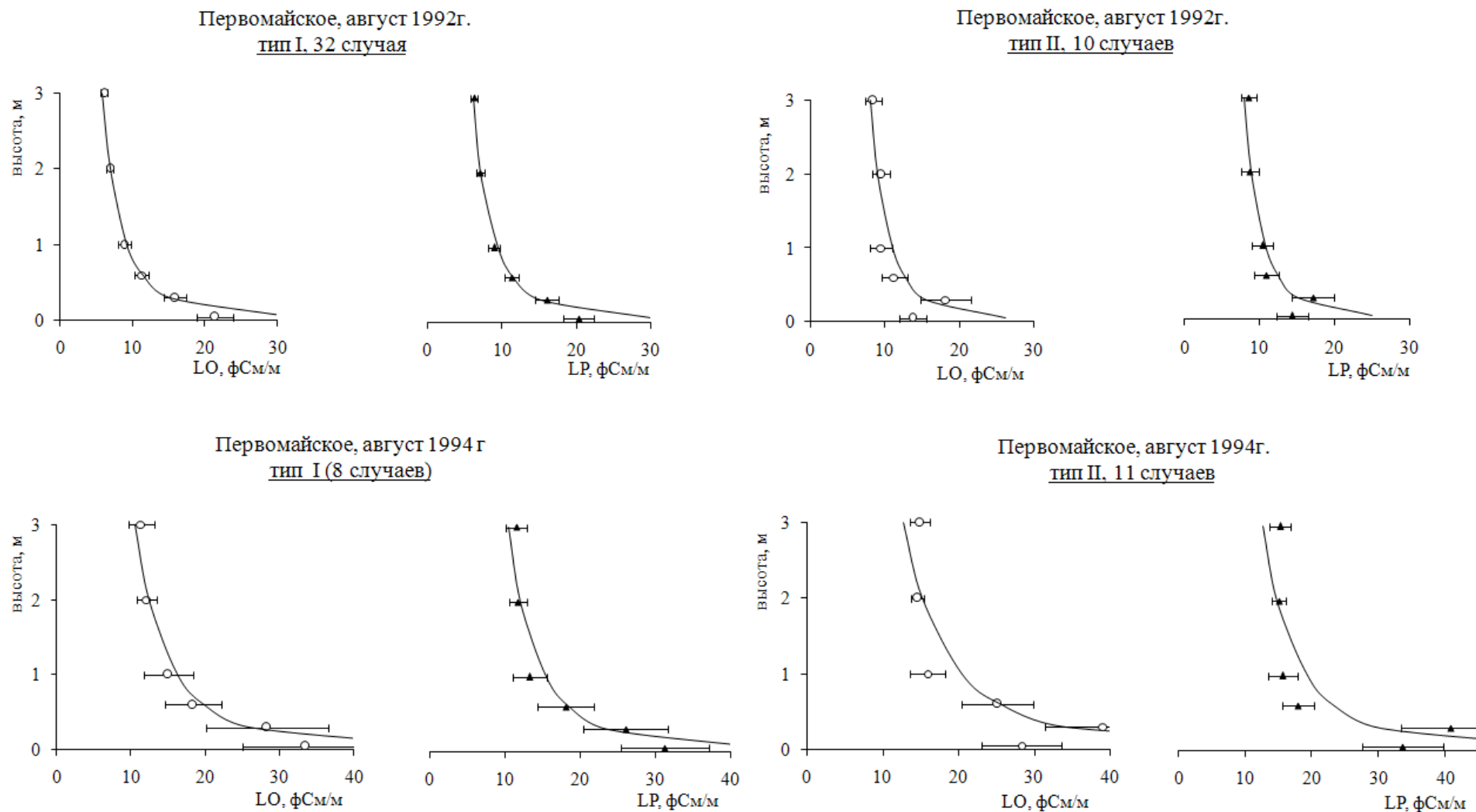


Рис. 15. Осредненные **ночные** профили полярных электропроводностей атмосферы разных типов. LO - отрицательная проводимость, LP - положительная проводимость. Линии - кривые степенной функции, которой аппроксимировались экспериментальные данные (показаны точками). Планки - значения стандартной ошибки.

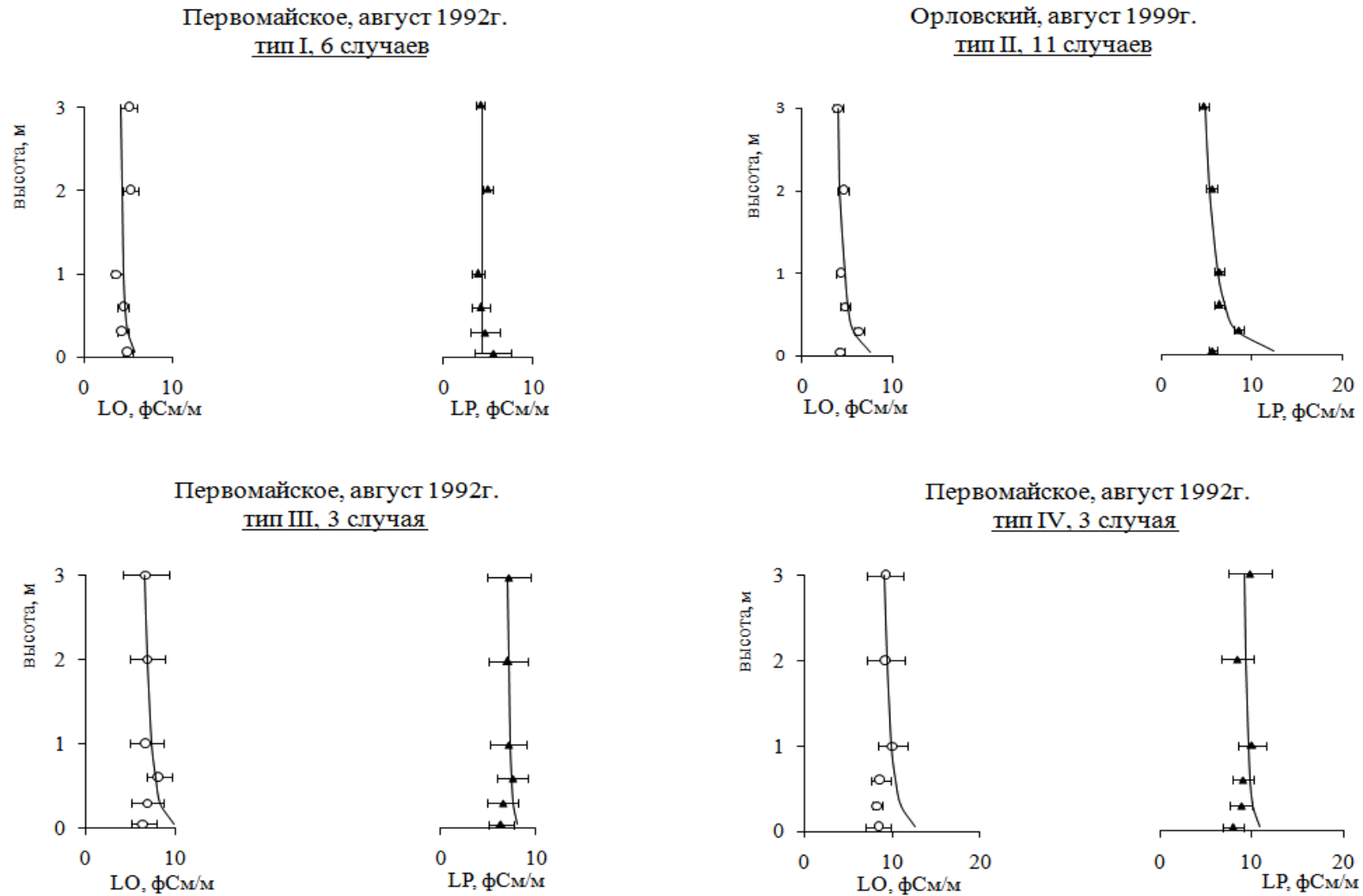


Рис. 16. Осредненные **дневные** профили полярных электропроводностей атмосферы разных типов. LO - отрицательная проводимость, LP - положительная проводимость. Линии - кривые степенной функции, которой аппроксимировались экспериментальные данные (показаны точками). Планки - значения стандартной ошибки.

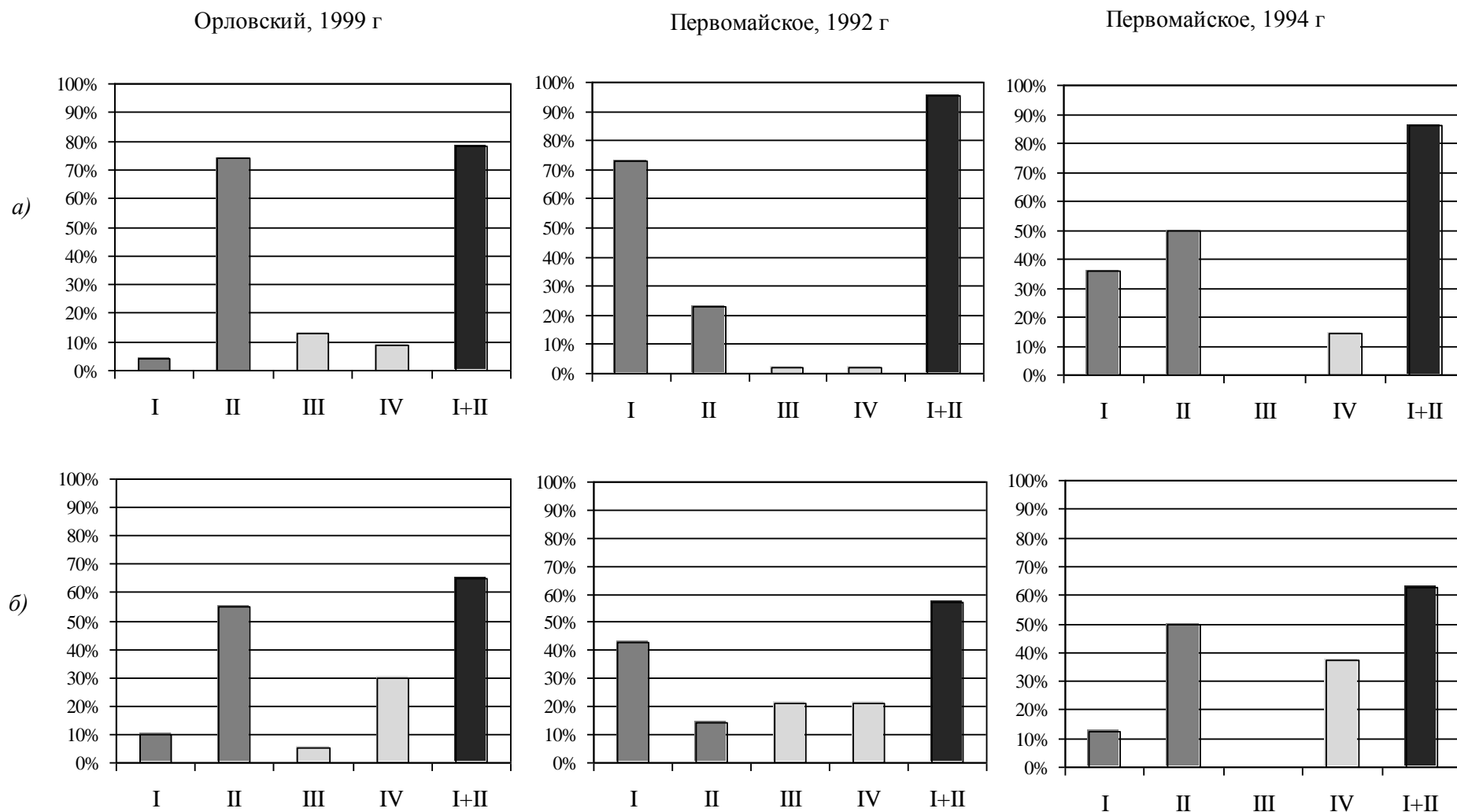


Рис. 17. Диаграммы статистики типов профилей для разных пунктов Ростовской области: а) ночные часы и б) дневные часы



Рис. 18. Средние ночные значения коэффициента турбулентности для разных типов профиля электропроводности (на примере данных наблюдений в пункте Орловский, авг.1999)

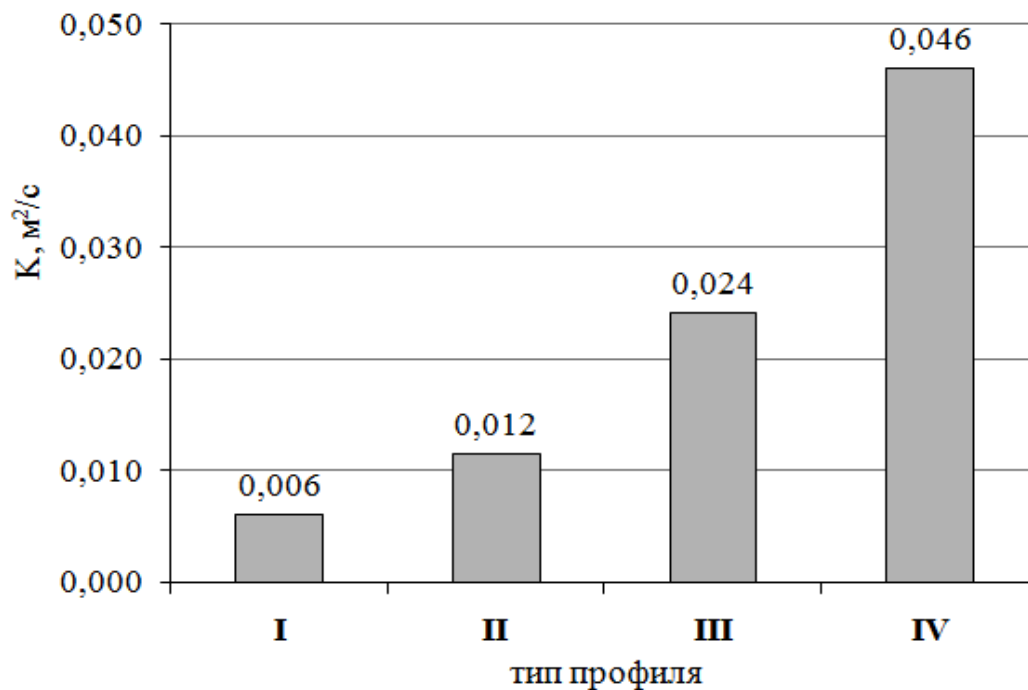
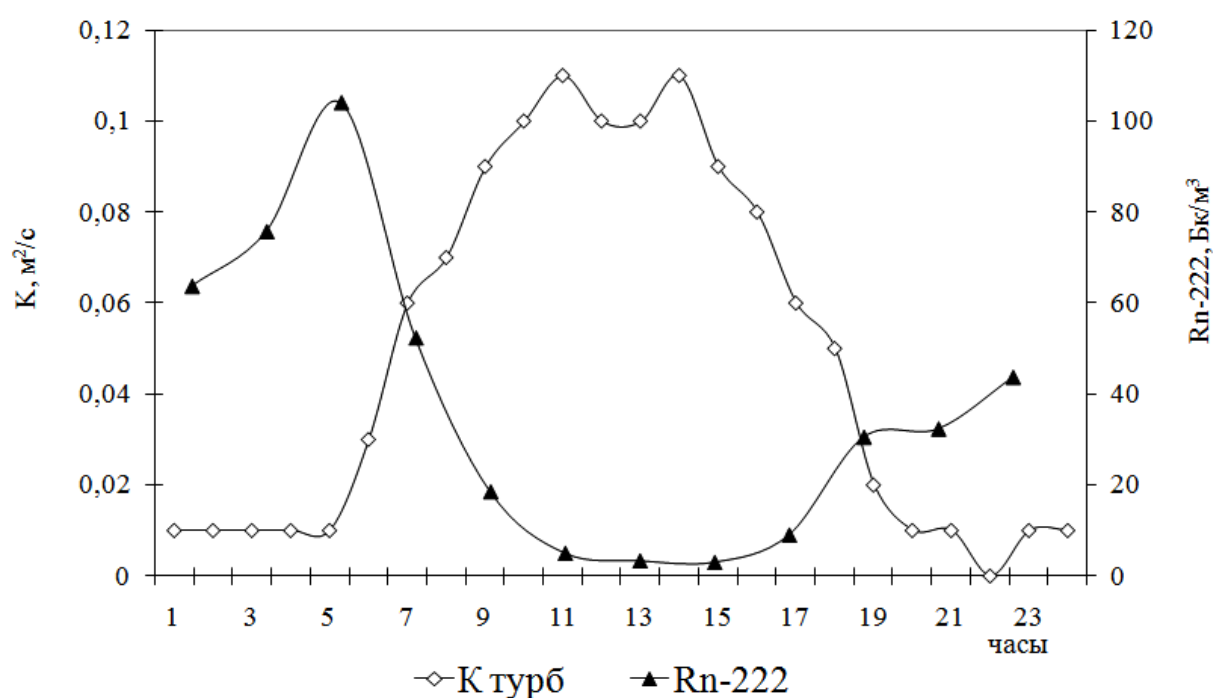


Рис. 19. Пример типичных среднесуточных вариаций коэффициента турбулентности и концентрации радона-222 вблизи земли



Как видно на примере данных, полученных в ночные часы в пос. Орловский в августе 1999 г., самый тонкий слой поглощения (I тип) наблюдается при самом слабом турбулентном обмене вблизи земли. Для ночных условий с малым коэффициентом турбулентной диффузии характерно высокое содержание радиоактивных газов вблизи земной поверхности, которые, накапливаясь из-за отсутствия заметного обмена в нижних слоях атмосферы, обеспечивают их повышенную ионизацию (рис.19). Возможно, в этих условиях ионизатору удастся компенсировать адсорбционные потери ионов на поверхности почвы, что и обуславливает столь малую толщину слоя поглощения в этом случае.

Оценить потерю ионов вследствие адсорбции можно по разности измеренного значения электропроводности на высоте 0,05 м и ее значения на этой высоте, рассчитанного путем экстраполяции вниз степенной функции, аппроксимирующей профиль электропроводности выше слоя поглощения. Расчетное значение, в таком случае, будет представлять собой гипотетическое значение электропроводности атмосферы на высоте 0,05 м при отсутствии адсорбции твердой поверхностью. В таблице 6 приведены значения разности экспериментальной и расчетной электропроводностей на высоте 0,05 м для всех анализируемых случаев и процент, который она составляет от расчетного значения электропроводности. Видно, что определенные таким образом “потери” электропроводности из-за адсорбции ионов из слоя на высоте нескольких сантиметров могут составлять десятки процентов.

Таким образом, очевидно, что заряд, получаемый землей из атмосферы в результате процессов диффузии и адсорбции ионов, необходимо учитывать при рассмотрении процессов обмена зарядами между атмосферой и землей в рамках работы над теорией глобальной атмосферно-электрической цепи.

Таблица 6.

	Электр. проводимость	Пункт наблюдений (число профилей)	$\alpha$	C	$\lambda_{расч.}$	$\lambda_{экср.}$	$\Delta\lambda$	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{расч.}}$
День	Отриц.	Орловский (11)	0,16	4,7	7,6	4,3	3,3	43%
		Первомайское-92	-	-	-	-	-	-
		Первомайское-94 (4)	0,09	9,0	11,8	10,8	1,0	8%
	Полож.	Орловский (11)	0,23	6,2	12,3	5,6	6,7	54%
		Первомайское-92	-	-	-	-	-	-
		Первомайское-94 (4)	0,12	8,8	12,6	11,1	1,5	12%
Ночь	Отриц.	Орловский (17)	0,54	10,4	52,4	14,6	37,9	72%
		Первомайское-92 (10)	0,29	11	26,2	13,7	12,5	48%
		Первомайское-94 (11)	0,43	20,4	74,0	28,3	45,6	62%
	Полож.	Орловский (17)	0,53	12,6	61,6	18,4	43,3	70%
		Первомайское-92(10)	0,28	10,8	25,0	14,3	10,7	43%
		Первомайское-94 (11)	0,38	19,3	60,2	33,6	26,6	44%

### **3. 3. Результаты исследований электропроводности нижней атмосферы при наличии в ней адсорбирующих ионы аэрозолей**

#### **3. 3. 1 Экспериментальные исследования полярных электрических проводимостей в пунктах наблюдений с разным содержанием аэрозолей**

Интересными представляются результаты измерений полярных электрических проводимостей в пунктах, атмосфера которых в разной степени подвержена антропогенному загрязнению, но прочие условия мало разнятся. Такими пунктами в исследованиях, проводимых ПИ ЮФУ в последние годы, являются с. Первомайское Кашарского района и г. Ростова-на-Дону. Оба пункта наблюдений расположены в одной климатической зоне. Измерения в данных пунктах проводились в период июля-августа. Наконец, по данным наших градиентных измерений концентрации радона в почве поток радона-222 из почвы в атмосферу в Ростове и Первомайском составляет 1,12 и 1,02 Бк/м<sup>2</sup>с соответственно (см. формулы 3.3 и 3.4). (Концентрация радона в почвенном газе этих пунктов наблюдений на глубине 0,1 м равна 2784 Бк/м<sup>3</sup> для Ростова и 2297 Бк/м<sup>3</sup> для Первомайского.) Таким образом, эксхалация радона из почвы в атмосферу в Ростове не ниже, чем в Первомайском. Учитывая, что радон-222 для нижних слоев атмосферы является основным ионизатором атмосферы, можно полагать, что интенсивность ионообразования в приземной атмосфере Ростова-на-Дону, по крайней мере, не меньше, чем в Первомайском.

В то же время, рассмотрение вертикальных профилей полярных проводимостей атмосферы в ее нижнем трехметровом слое (рис. 20) позволяет заметить, что проводимость в Первомайском в среднем вдвое превышает таковую для Ростова-на-Дону. Причиной такого положения, очевидно, является повышенное содержание антропогенного аэрозоля в воздухе крупного промышленного и транспортного центра, каковым является Ростов. Образующиеся под действием ионизаторов, прежде всего, радона, атмосферные ионы в условиях повышенного содержания аэрозоля адсорбируются на его частицах более интенсивно, что и обуславливает

относительно низкие значения обеих полярных проводимостей по всему трехметровому слою атмосферы в Ростове-на-Дону.

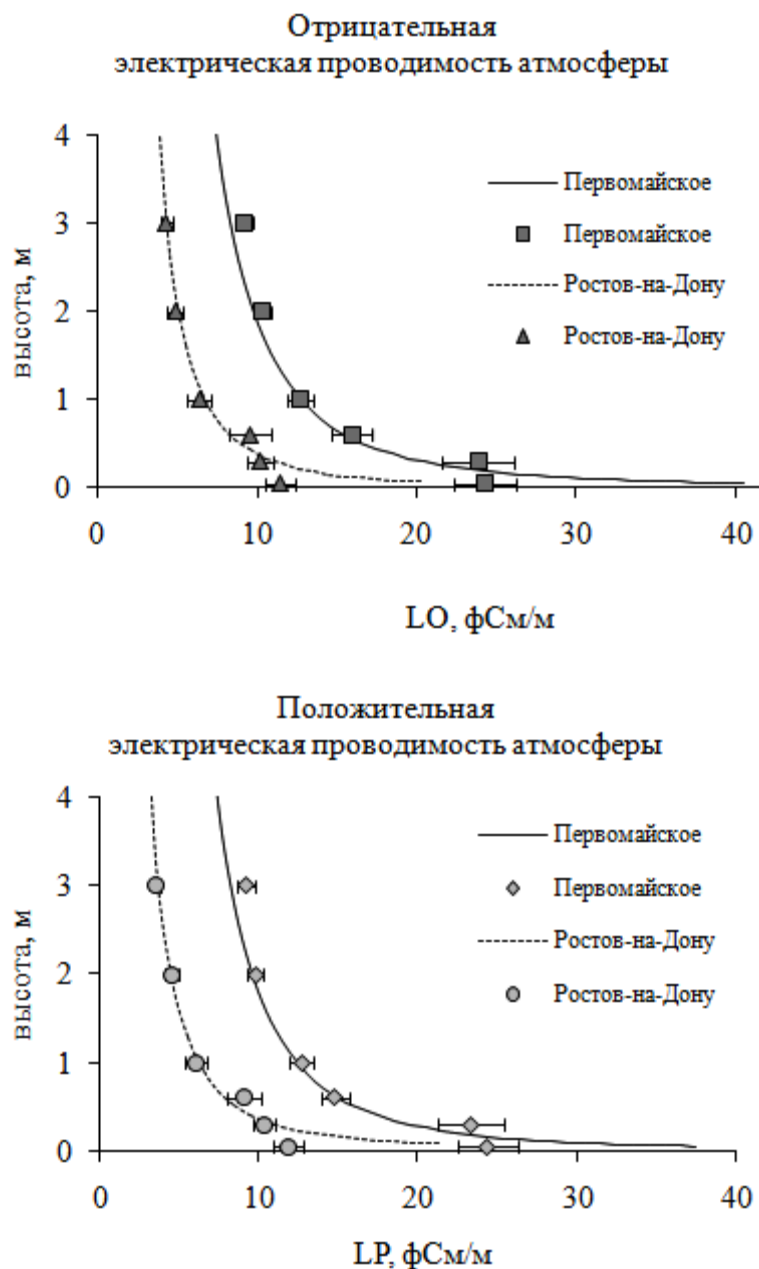


Рис. 20. Полярные электрические проводимости нижнего 3-метрового слоя атмосферы в пунктах наблюдений с разным антропогенным влиянием на атмосферу (средние значения за период наблюдений для ночных часов без ветра). Планки - значения стандартной ошибки.

### 3. 3. 2 Оценка интегрального аэрозольного загрязнения атмосферы на основании атмосферно-электрических данных

Тесная связь электрической проводимости атмосферы с концентрацией аэрозолей, обусловленная процессами адсорбции атмосферных ионов твердыми и жидкими аэрозольными частицами, позволяет на основании атмосферно-электрических данных делать оценки интегрального аэрозольного загрязнения атмосферы как экспериментальными, так и теоретическими методами. Это тем более важно, что прямые измерения аэрозолей сложны и трудоемки.

Влияние аэрозольных частиц на структуру приземного электродного слоя рассматривалось во многих теоретических работах [12, 15, 16, 17, 32, 33]. Численные расчеты системы уравнений, описывающих электрическое состояние приземного электродного слоя, показывают, что при  $N=10^8 \text{ м}^{-3}$  – аэрозольные частицы оказывают слабое влияние на свойства электродного слоя; при  $N=10^9 \text{ м}^{-3}$  – тяжелые и легкие ионы примерно одинаково влияют на распределение электрических характеристик, а при  $N=10^{10} \text{ м}^{-3}$  ролью легких ионов можно пренебречь.

В настоящей работе на основании экспериментальных атмосферно-электрических данных, полученных в геофизических экспедициях ПИ ЮФУ, сделана оценка средней концентрации аэрозолей теоретическими методами.

На основании уравнения Пуассона, предполагая, что

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 \quad (3.5)$$

где  $\rho_1 = e(n_1 - n_2)$  – плотность объемного заряда легких ионов и  $\rho_2 = e(N_1 - N_2)$  – плотность заряда, создаваемого тяжелыми однозарядными ионами и заряженными аэрозолями, можно оценить средние концентрации аэрозолей.

При расчетах использовалась стационарная система уравнений нетурбулентного электродного эффекта, в предположении, что количество ядер конденсации (аэрозольных частиц) в атмосфере сравнимо с числом легких ионов, ядра стационарны и имеют постоянную концентрацию [15].

$$\begin{aligned}
b_1 \frac{d}{dz}(En_1) &= q(z) - \alpha n_1 n_2 - \eta_1 n_1 N_2 - \eta_2 n_1 N_0, \\
-b_2 \frac{d}{dz}(En_2) &= q(z) - \alpha n_1 n_2 - \eta_1 n_2 N_1 - \eta_2 n_2 N_0, \\
\frac{dE}{dz} &= \frac{e}{\varepsilon_0} (n_1 - n_2 + N_1 - N_2).
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

$$\eta_2 n_1 N_0 - \eta_1 n_2 N_1 = 0, \quad \eta_2 n_2 N_0 - \eta_1 n_1 N_2 = 0, \quad N_1 + N_2 + N_0 = N = const$$

Значения параметров, входящих в уравнения, заимствованы в работе Хоппея [32]:

**Таблица 4:** Значения коэффициентов присоединения ионов к заряженным аэрозолям  $\eta_1$  и  $\eta_2$ , коэффициента рекомбинации ионов  $\alpha$ , подвижностей положительных и отрицательных ионов  $b_1$  и  $b_2$ , элементарного заряда  $e$  и электрической постоянной  $\varepsilon_0$ .

$\eta_1, \text{м}^3 \text{с}^{-1}$	$\eta_2, \text{м}^3 \text{с}^{-1}$	$\alpha, \text{м}^3 \text{с}^{-1}$	$b_1, \text{м}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$	$b_2, \text{м}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$	$e, \text{Кл}$	$\varepsilon_0, \text{Фм}^{-1}$
$1,4 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	$8,85 \cdot 10^{-12}$

В таблице 5 приведены результаты расчета средних концентраций легких ионов и аэрозолей для различных пунктов наблюдений на двух высотах. Можно заметить, что значения концентраций легких ионов в Ростове и Михайловке значительно ниже таковых на Байкале. Вместе с тем значения концентрации аэрозолей выше в Михайловке и много больше в Ростове, нежели на Байкале. Учитывая известную обратную связь между концентрацией легких ионов и содержанием аэрозолей в атмосфере, можно полагать, что особенности аэрозольного климата пунктов наблюдений обуславливают соотношение концентраций легких ионов для рассматриваемых пунктов. Пункт наблюдений в Прибайкалье характеризуется низким содержанием аэрозоля в атмосфере вследствие

удаленности антропогенных источников загрязнений и малого содержания аэрозолей естественного происхождения в силу влажного климата, отсутствия эрозии почвы. Михайловка территориально удалена от антропогенных источников аэрозольных загрязнений, но находится в зоне засушливого климата и распаханых земель, как и Ростов-на-Дону, из-за чего в атмосфере возможно заметное содержание естественных аэрозолей. Наконец, воздушный бассейн Ростова-на-Дону содержит как естественный, так и антропогенный аэрозоль, что и объясняет наблюдаемые высокие значения концентрации аэрозолей в этом пункте наблюдений.

**Таблица 5:** Средние значения концентраций легких ионов и аэрозолей

	<b>h=1 м</b>			<b>h=2 м</b>		
	$n_+, 10^9 м^{-3}$	$n_-, 10^9 м^{-3}$	$N, 10^9 м^{-3}$	$n_+, 10^9 м^{-3}$	$n_-, 10^9 м^{-3}$	$N, 10^9 м^{-3}$
<b>Байкал</b>	<i>1.34</i>	<i>1.48</i>	<i>2.0</i>	<i>1.18</i>	<i>1.38</i>	<i>9.8</i>
<b>Михайловка</b>	<i>0.71</i>	<i>0.57</i>	<i>7.5</i>	<i>0.63</i>	<i>0.56</i>	<i>12.7</i>
<b>Ростов</b>	<i>0.31</i>	<i>0.31</i>	<i>11.4</i>	<i>0.17</i>	<i>0.17</i>	<i>83.2</i>

Следует отметить, что концентрации аэрозольных частиц для указанных районов соответствуют  $N=10^9 м^{-3}$  и выполняется неравенство:

$N \gg \frac{\alpha n_1}{0.85 \cdot 10^{-12}}$ , что является условием, при котором можно считать, что влияние аэрозолей существенно для структуры приземного электродного слоя [17] и должно учитываться при математическом моделировании электрических процессов в приземном слое и интерпретации экспериментальных данных.



## Заключение

В данной работе проанализированы результаты измерений удельной электропроводности в приземном слое, проводившиеся в комплексе с измерениями метеорологических параметров и концентрации радона-222 в почве и воздухе в ряде пунктов наблюдений Ростовской области.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- Атмосферно-электрические характеристики реагируют на содержание аэрозолей как естественного, так и антропогенного происхождения.
- Значения полярных электропроводностей уменьшаются при увеличении содержания аэрозолей в атмосфере. В летние месяцы в Ростове-на-Дону они в 2-3 раза ниже, чем в с. Первомайское, несмотря на высокую естественную радиоактивность в Ростове-на-Дону.
- Профили полярных электропроводностей можно аппроксимировать степенной функцией лишь выше некоторого уровня  $H$ . Ниже уровня  $H$  находится слой поглощения, относительно обеднённый ионами вследствие адсорбции их поверхностью почвы. Толщина слоя достигает 0,6-1 м, но чаще составляет 0,3 м.
- Толщина слоя адсорбционного поглощения ионов поверхностью земли, а значит, и тип профиля электропроводностей, зависит от интенсивности турбулентного перемешивания и содержания в приземном воздухе радона-222
- “Потери” электропроводности из-за адсорбции атмосферных ионов земной поверхностью из “слоя поглощения” могут составлять десятки процентов.
- Можно считать, что для Ростовской области влияние аэрозоля на структуру приземного электродного слоя существенно.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития данного исследования геофизической группой факультета физики

ПИ ЮФУ, а также для разработки учебно-методических пособий для курса общей физики и специального курса по физике атмосферы. На основании материалов работы возможна подготовка публикации в научном журнале или на научной конференции по атмосферному электричеству.

### Список литературы

1. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели)// Л.: Гидрометеиздат, 1991.
2. Гордюк В.П. Связь электрических характеристик атмосферы с загрязненностью воздуха аэрозолем по данным измерений в обсерватории Мирный// В сб.: Атмосферное электричество. Труды III Всесоюзного симпозиума. Тарту, 1986.
3. Двали Е.Р., Калаиджева Л.Л. Ионизационное состояние воздуха в Душети// В сб.: Атмосферное электричество. Труды I Всесоюзного симпозиума. Л., 1976.
4. Ермаков В.И., Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С. Основные источники ионизации атмосферы// В сб.: Труды 5 Российской конференции по атмосферному электричеству.
5. Ильин Б. В. Природа адсорбционных сил// М, Л.: Гос. изд-во тех-теор. лит-ры, 1952.
6. Имянитов И.М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы// М.: ГТТИ, 1957.
7. Имянитов И.М., Чубарина Е.В. Электричество свободной атмосферы// Гидрометеиздат, 1965 г.
8. Исаев Г.С. Возможность использования электрических характеристик атмосферы для оценки интегрального уровня загрязнения// В сб.: Атмосферное электричество. Труды III Всесоюзного симпозиума. Тезисы докладов. Тарту, 1986.
9. Калашников С.Г. Электричество// М.: Наука, 1985.
10. Кикоин А. К, Кикоин И. К. Молекулярная физика// «Наука», М. 1976 г.
11. Колоколов В.П. Концентрация легких ионов в Воейкове в зависимости от направления ветра. //В сб.: Труды ГГО. 1977, вып.350.
12. Красногорская Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения// Л.: Гидрометеиздат, 1972.

13. 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.
14. Кудринская Т.В., Петров А.И., Петрова Г.Г. Электрическое поле атмосферы и аэрозоль.// Тезисы докладов. VII Всероссийская конференция молодых ученых “Малые примеси, атмосферное электричество и динамические процессы в атмосфере”. Н.Новгород, 2003.
15. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере.// Таганрог, Изд-во ТРТУ, 1998.
16. Морозов В.Н. Атмосферное электричество. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели).// Л.: Гидрометеиздат, 1991.
17. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Влияние турбулентности и аэрозоля на распределение электрических параметров в приземном слое атмосферы. // Труды ВГИ, 1989. Вып.77.
18. Наследов Д.И. Физика ионных и электронных процессов.// М.: ОНТИ, 1937.
19. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н. Влияние индустриального загрязнения воздушного бассейна электропроводность атмосферы в Ростове-на-Дону.// В сб.: Труды ГГО, 1990, вып.527.
20. Прюллер П.К., Рейнет Я.Ю. Исследования в области атмосферной ионизации в Тарту.// В сб.: Атмосферное электричество. Труды I Всесоюзного симпозиума. Л., 1976.
21. Сальм Я.И., Йхер Х.Р. Экспериментальное исследование спектра подвижности легких аэроионов.// В сб.: Атмосферное электричество. Труды II Всесоюзного симпозиума. Л., 1982
22. Семенов К.А. Связь элементов атмосферного электричества с загрязнением воздуха.// В сб.: Атмосферное электричество. Труды I Всесоюзного симпозиума. Л., 1976.
23. Семенов К.А. Влияние локальных условий на элементы атмосферного электричества.// В сб.: Труды ГГО, 1974, вып.323.

24. Соколенко Л.Г., Ваюшина Г.П. Измерение величин атмосферного электричества на о. Вильсанди.// В сб.: Труды ГГО, 1984, вып.474.
25. Смирнов В.В. Физическая модель атмосферных ионов средней подвижности.// В сб.: Труды 5 Российской конференции по атмосферному электричеству.
26. Смирнова С.А., Колерский С.В. Изучение ионизированности атмосферного воздуха в г.Москве и в курортных местностях центральных областей России.// В сб.: Труды 5 Российской конференции по атмосферному электричеству, 1 том.
27. Таммет Х.Ф., Сальм Я.Й., Ихер Ч.Р., Тамм Э.И., Мирме А.А., Кипас Ю.Э. Спектр подвижности аэроионов в приземном воздухе.// В сб.: Атмосферное электричество. Труды III Всесоюзного симпозиума. Тарту, 1986.
28. Тверской П.Н. Атмосферное электричество.// Л.: Гидрометеиздат, 1949.
29. Физический энциклопедический словарь.
30. Шварц Я.М., Электропроводность воздуха и аэрозоль.// В сб.: Труды ГГО, 1980, вып.401.
31. Элементарный учебник физики. Под ред. Ландсберга Г. С.// М.: Наука, 1985.
32. Hoppel W.A., Theore of electrode effect.// J. Atm. Terr. Phys., 1967, v.29, №6.
33. Knudsen E., Israelsson S. On the effect of space charge generation caused by evaporation.// J. Atm. Terr. Phys., 1992, v.54, №11-12.
34. 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.
35. 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.