

УДК 551.594.1

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НИЖНИХ СЛОЁВ АТМОСФЕРЫ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ

*Г. Г. Петрова, А. И. Петров, И. Н. Панчишжина*

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

В работе обсуждаются результаты экспедиционных исследований электрических процессов в приземном слое атмосферы. Рассматриваются вертикальные вариации градиента электрического потенциала вблизи земной поверхности наряду с данными измерений полярных электропроводностей, концентрации радона-222 (в атмосфере и почвенном газе) и метеорологических параметров в нижнем 3-метровом слое атмосферы. Вариации градиента потенциала в приземном слое атмосферы определяются локальными процессами формирования объёмного электрического заряда. Профили плотности суммарного объёмного заряда оценивались в соответствии с уравнением Пуассона на основании непосредственных измерений электрического потенциала. Плотность заряда лёгких ионов вычислялась по результатам измерений полярных электропроводностей. Обнаружено, что в исследуемом 3-метровом слое атмосферы в пунктах наблюдений, как правило, наблюдается чередование по вертикали двух или трёх слоёв объёмного заряда разного знака. Обсуждается природа заряженных слоёв, наблюдающихся в разных условиях вблизи земной поверхности.

### ВВЕДЕНИЕ

История исследования формирования электрической структуры приземной атмосферы насчитывает не один десяток лет. Настолько пристальное внимание к изучению электричества приземного слоя обусловлено его особой ролью в глобальной атмосферной электрической цепи: в этом слое располагается область электрического контакта атмосферы с земной поверхностью. Ещё одна причина, побуждающая заниматься свойствами приземного слоя, состоит в том, что в нём располагаются наземные датчики для исследования электричества атмосферы. Знания об основных особенностях поведения электрических характеристик необходимы для выработки методики наземных измерений атмосферного электричества, а также для адекватности интерпретации получаемых данных.

Близость границы раздела двух различных сред — атмосферы и земной поверхности — является основной причиной сложностей при изучении электричества приземной атмосферы. Во-первых, вблизи земной поверхности в атмосфере наблюдаются большие градиенты физических величин, из-за чего возникают интенсивные потоки различных веществ. Это обуславливает значительные пространственно-временные изменения электрических параметров, тесно связанных как с метеорологическими характеристиками, так и друг с другом. Во-вторых, при прохождении через границу раздела двух разнородных сред с различной природой проводимости ток проводимости претерпевает скачок. Следствием скачка тока проводимости является накопление объёмного заряда соответствующего знака вблизи земной поверхности согласно уравнению непрерывности тока. Это, в свою очередь, вызывает возмущение электрического поля в соответствии с уравнением Пуассона. Данная совокупность явлений известна в атмосферном электричестве как электродный эффект (термин позаимствован из техники), причём электродом служит земная поверхность. Объёмный заряд электродного эффекта вследствие конвекции и диффузии (молекулярной и, в особенности, турбулентной) переносится по вертикали в приземном слое, что

приводит к появлению в атмосфере тока механического переноса в дополнение к току проводимости [1–7].

Долгое время считалось, что ток механического переноса пренебрежимо мал и вертикальный ток в приземной атмосфере — это ток проводимости. Поскольку напряжённость электрического поля  $E$  и электропроводность атмосферы  $\lambda$  определяют плотность тока проводимости  $j_\lambda = \lambda E$ , то от их вертикального распределения зависит высотное изменение  $j_\lambda$ . Постоянство  $j_\lambda$  по высоте влечёт за собой вывод об отсутствии в атмосфере тока механического переноса зарядов или о его постоянстве по высоте.

На начальном этапе исследование распределения электропроводности атмосферы и напряжённости электрического поля по высоте вблизи земной поверхности строилось в предположении, что плотность тока механического переноса  $j_{\text{мп}}$  пренебрежимо мала и вертикальный ток — это ток проводимости. При этом можно применять к электродному слою атмосферы закон Ома и исключить из уравнений, описывающих электродный слой, члены, отвечающие за турбулентную диффузию ионов. Это значительно упростило математическое описание электрических процессов в приземной атмосфере. Экспериментальные данные на этом этапе часто игнорировались или полагались ошибочными, если они противоречили общепринятой модели, отрицающей возможность существования заметного тока механического переноса. Тем не менее, накапливающиеся со временем результаты измерений (см., например, [2–11]) неизбежно привели к пересмотру принятых ранее положений. Развитие вычислительной техники и методов математического моделирования способствовало успехам теоретических исследований электричества приземного слоя. Разработанные на данный момент модели электродного слоя атмосферы обеспечивают понимание основных электрических процессов, происходящих в атмосфере вблизи земли, и выделяют наиболее значимые для этих процессов факторы. В то же время теоретические результаты нуждаются в экспериментальном подтверждении, исследовании границ применимости моделей, выделении типичных физических условий в атмосфере, когда может применяться та или иная модель.

Разработка адекватных моделей приземного слоя требует достаточного объёма экспериментальных данных о вертикальном распределении электрических параметров, полученных в различных физических условиях, и классификации этих данных для выделения типичных электрических состояний. С этой целью на протяжении двух десятилетий на кафедре физики Южного федерального университета (ЮФУ) проводились экспедиционные измерения атмосферных электрических величин в нижнем 3-метровом слое атмосферы наряду с метеорологическими измерениями и регистрацией концентрации радона-222 в почве и атмосфере на территории Ростовской области в летний период. Поскольку объёмная активность радона пропорциональна концентрации его молекул, в дальнейшем под концентрацией радона-222 будем понимать именно его объёмную активность.

Целью настоящей работы является комплексный анализ полученных данных, их обобщение и типизация.

## 1. ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При организации экспедиционных исследований реализовывались определённые подходы к планированию эксперимента и анализу результатов измерений.

1) Интерпретация результатов электрических измерений в нижней атмосфере невозможна без изучения физических условий, в которых проводились эти измерения. Необходимо учитывать метеорологические условия, степень загрязнения воздушного бассейна, характер и состояние подстилающей поверхности, содержание радиоактивных элементов в почве и атмосфере и т. д. Для реализации такого подхода наряду с измерениями атмосферного электричества осуществлялись

комплексные измерения физических параметров приземного слоя, которые в наибольшей степени определяют электрические процессы вблизи земли.

2) Электрические параметры в приземном слое характеризуются значительной временной изменчивостью. Поэтому измерения необходимо проводить непрерывно и круглосуточно с целью формирования рядов данных, которые позволят обнаруживать характерные вариации элементов атмосферного электричества разной периодичности.

3) Электрические характеристики атмосферы вблизи земной поверхности претерпевают значительные изменения с высотой. Вертикальные распределения характеристик важны при описании структуры электродного слоя. В связи с этим электрические параметры измерялись на ряде высот (градиентные измерения) для получения представления об их пространственных вариациях.

4) Измерения в разных пунктах и в разные периоды проводились на одной и той же инструментальной базе, что позволяет обеспечить сравнимость полученных результатов.

Используемый комплекс для наземных измерений атмосферного электричества в сочетании с контролем содержания радона-222 в атмосфере и почве и физического состояния атмосферы уникален и позволяет получать качественно новый набор экспериментальных данных, анализ которых может способствовать более глубокому пониманию процессов в электродном слое атмосферы.

В работе рассматриваются данные ряда экспедиций ЮФУ, проводившихся в летние месяцы в Ростовской области (см. рис. 1, карта также опубликована в статье [12], пункты наблюдения подробно описаны в работе [13]).

Регион измерений характеризуется сухим климатом. Площадки наблюдений в экспедициях оборудовались на обширных степных участках. Растительность под датчиками на измерительных площадках была срезана на уровне земли на площади не менее  $20 \times 20$  м, при этом слой дёрна сохранялся, чтобы поверхность не пылила.

В работе рассматриваются локальные процессы, имеющие характерные периоды от десятков минут до десятков часов. Экспедиционные измерения проводились в августе в течение нескольких лет в каждом пункте с целью выявления типичных вариаций атмосферных электрических величин. Результаты экспедиций позволяют сделать вывод, основанный на большом объёме статистически достоверного материала, что обсуждаемые в работе закономерности являются типичными и в определённом пункте наблюдений в летние месяцы повторяются год за годом. При этом каждый из пунктов наблюдений характеризуется своим особым комплексом физических параметров, что определяет специфику протекания атмосферных электрических процессов в конкретном пункте.

Параметры атмосферы в экспедициях измеряются известными и широко распространёнными методами. Подробное описание применяемого измерительного комплекса приведено в работе [13].

Для измерения полярных электропроводностей на высотах 0,05; 0,3; 0,6; 1; 2 и 3 м используется прибор Гердиена (параметры описаны в работе [13]), который последовательно устанавливается на разных уровнях деревянной мачты так, что ось аспирационного конденсатора находится на соответствующей высоте. Цикл измерений на каждой высоте составляет 10 минут, таким образом, на измерение одного профиля требуется 1 ч. Объёмная активность радона-222 в атмосфере измерялась одновременно с электропроводностью на тех же уровнях той же мачты радонOMETром «Alpha-GUARD». РадонOMETр работает по методу ионизационной камеры. Специальный фильтр прибора обеспечивает попадание внутрь камеры радиоактивного изотопа  $^{222}_{86}\text{Rn}$ , задерживая прочие изотопы, влагу и пыль. При установке датчика на определённой высоте осуществляется интенсивная прокачка воздуха для быстрого забора воздушной пробы с нужного уровня в атмосфере. Затем исследуемый воздух диффундирует в ионизационную камеру, что

позволяет измерять объёмную активность радона непрерывно. Для синхронизации измерений полярных электропроводностей и концентрации радона прибор настроен так, что объёмная активность радона-222 усредняется по 10-минутным интервалам.

Методом радиоактивного коллектора измеряются потенциалы на высоте 1; 2 и 3 м. Активным веществом коллекторов, подвешенных на горизонтальных изолированных проволоках, является ионий, дающий  $\alpha$ -излучение. Потенциалы регистрируются поочерёдно с разных коллекторов путём последовательного подсоединения коллекторов к электростатическому вольтметру. Для каждой высоты выполняются 5 серий таких измерений. При обработке результатов измерений потенциалы для каждой высоты усредняются по часовым интервалам. При отсчёте потенциала после подсоединения очередного коллектора к прибору учитывается время релаксации установки около 40 с. Наблюдатель располагается на расстоянии 10 м от коллекторов, чтобы не искажать электрическое поле. Отсчёты потенциалов (в течение получаса) и профилактика коллекторной установки (чистка изоляторов, контроль расстояний между коллекторами и т. д.) занимают около часа, так что за один час может быть получен один высотный профиль потенциала. Большое внимание уделяется качеству изоляции коллекторов. Перед началом сезона измерений поверхность эбонитовых изоляторов тщательно полируется. Для снижения утечек заряда подвесные эбонитовые изоляторы проволок снабжены нагревателями в виде тонкой проволоки, навитой на ту часть цилиндра изолятора, которая обращена к мачте. По проволоке пропускается такой постоянный ток, чтобы выделяемое тепло обеспечивало нагрев изолятора, достаточный для предотвращения

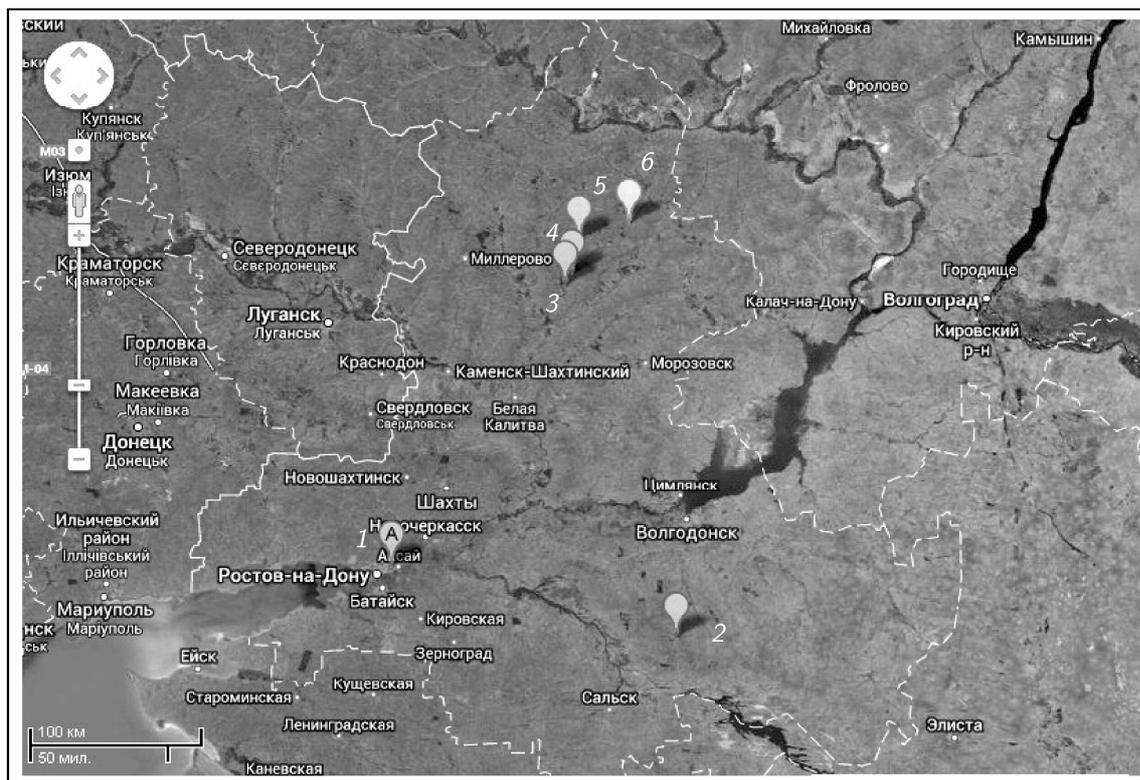


Рис. 1. Расположение пунктов экспедиционных наблюдений на территории Ростовской области: 1 — Ростов-на-Дону (август 1989), 2 — Орловский (август 1999), 3 — Михайловка (август 1997), 4 — Первомайское (август 1992, 1994), 5 — Талловеров (август 2008), 6 — Платов (август 2003, 2004, 2005)

конденсации влаги на его поверхности. Ежедневно с помощью спирта поверхность изоляторов очищается от загрязнений, осаждающихся на ней из атмосферы. Сухая чистка изоляторов осуществляется ежедневно.

Напряжённость электрического поля на уровне земли измеряется флюксометром «Поле-2» системы Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, измерительная пластина которого устанавливается вровень с земной поверхностью. Сигнал флюксометра непрерывно регистрируется с помощью персонального компьютера и аналого-цифрового преобразователя «L-Card L-761». Для анализа в данной работе используются среднечасовые значения поля.

Раз в час измерялись температура и влажность атмосферы (на высотах 0,15; 0,5 и 2 м), скорость ветра (на высотах 0,5; 2 и 5 м), температура поверхности почвы и температура почвы (на глубине 0,05; 0,10; 0,15 и 0,20 м). По методу Орленко [14] рассчитывался коэффициент турбулентности вблизи земной поверхности.

По измеренным значениям полярных электропроводностей оценивалась плотность объёмного заряда в атмосфере. На основании известного соотношения для плотности объёмного заряда  $\rho = e(n_+ - n_-)$ , где  $n_+$  и  $n_-$  — концентрации положительных и отрицательных ионов соответственно,  $e > 0$  — элементарный заряд, и с учётом того, что удельная электропроводность  $\lambda$  связана с концентрацией  $n$  носителей заряда и подвижностью  $b$  формулой  $\lambda = neb$ , рассчитывалась плотность объёмного заряда лёгких ионов в атмосфере:  $\rho_{л.и} = \lambda_+/b_+ - \lambda_-/b_-$ . Здесь  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$  — измеренные на данной высоте значения полярных удельных электропроводностей. При этом подвижности лёгких ионов принимались равными  $b_+ = 1,36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  и  $b_- = 1,56 \times 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

Средняя проекция градиента электрического потенциала на вертикаль  $G_z$  некоторого слоя  $AB$  рассчитывается по среднечасовым значениям потенциала  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$  для точек  $A$  и  $B$  и измеренному для этого часа расстоянию между ними  $l_{AB}$  по формуле  $G_z = (\varphi_A - \varphi_B)/l_{AB}$ .

На основании измерений высотного профиля потенциала в работе сделаны оценки плотности объёмного заряда косвенными методами [15]. Несмотря на приблизительность таких оценок, на наш взгляд, удаётся обнаружить некоторые типичные особенности вертикального распределения плотности объёмного заряда, допускающие их вполне разумную физическую интерпретацию. Средняя для некоторого слоя плотность объёмного заряда всех ионов  $\rho$  оценивалась по вертикальному профилю градиента потенциала на основании уравнения Пуассона:  $\rho = -\varepsilon_0 (G_2 - G_1)/l_{1-2}$ . Здесь  $G_1$  и  $G_2$  — средние значения вертикальной проекции градиента электрического потенциала в соседних слоях 1 и 2 соответственно,  $l_{1-2}$  — расстояние между центрами этих слоёв.

Для каждого часа по градиентным измерениям температуры воздуха и скорости ветра в нижнем слое атмосферы с толщиной 5 м был рассчитан параметр стратификации  $m$  [14]. Как известно из теории,  $m = 1$  соответствует нейтральной стратификации приземного слоя,  $m > 1$  — неустойчивой стратификации и  $m < 1$  — устойчивой стратификации. На практике резкой границы между этими тремя состояниями нет. Поэтому в группу замеров с устойчивой стратификацией отбирались те, для которых  $m < 0,7$ , а в группу с неустойчивой — те, для которых  $m > 1,3$ , чтобы отсеять случаи нейтральной стратификации, для которой  $m$  имеет значения вблизи 1.

Следует отметить, что устойчивая стратификация нижнего слоя атмосферы в донских степях в летнее время наблюдается обычно в ночные часы при малой скорости ветра, неустойчивая — днём при развитой конвекции и заметном ветре. По результатам наших наблюдений усреднённый коэффициент турбулентности для случая устойчивой атмосферы в пунктах Ростовской области составляет  $0,00 \div 0,01 \text{ м}^2/\text{с}$ , в то время как для неустойчивой стратификации он лежит в пределах  $0,05 \div 0,10 \text{ м}^2/\text{с}$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ АНАЛИЗ

Как известно, основную роль в ионизации приземной атмосферы наряду с космическими лучами (20 % ионообразования согласно [16]) играет естественная радиоактивность почвы (35 %) и воздуха (45 %). Поэтому в наших экспериментах уделялось большое внимание изучению радона-222 как ионизирующего фактора. Результаты многолетних экспедиций обнаруживают заметное содержание радона-222 в почвах пунктов наблюдений на территории Ростовской области (см. табл. 1) [12, 17].

В результате в летний период, когда поверхность почвы свободна от снега и льда, почва заметно эманурует и радон поступает в прилегающий к земной поверхности слой атмосферы. В среднем содержание радона в атмосфере тем выше, чем больше его в почве (см. рис. 2). В то же время, в конкретном пункте наблюдений концентрация радона колеблется от нескольких единиц до нескольких сотен Бк/м<sup>3</sup> на протяжении суток (см. рис. 3). Представленная на рис. 3 динамика концентрации радона в атмосфере обнаруживает явно выраженные суточные вариации с высокими значениями в ночные часы при низкой скорости ветра. Как видно на рис. 3, непосредственно вблизи земной поверхности на высоте 5 см концентрация радона в эти периоды заметно превышает концентрацию на высоте 2 м, что образует значительные градиенты интенсивности ионообразования в приземном слое. В случае ветреных ночей суточный ритм вариаций концентрации радона в атмосфере нарушается (например, 13 и 23 августа в п. Михайловка и 19 августа в п. Платов, см. рис. 3).

Таблица 1

Глубина, м	Концентрация радона-222 в почвенном газе (Бк/м <sup>3</sup> ) в пунктах					
	Ростов-на-Дону	Орловский	Платов	Талловеров	Первомайское	Михайловка
0,1	3 899	4 119	3 040	4 928	3 216	940
0,6	8 199	15 861	6 880	11 968	9 536	1 234
0,9	10 755	21 758	13 408	12 928	13 248	1 312

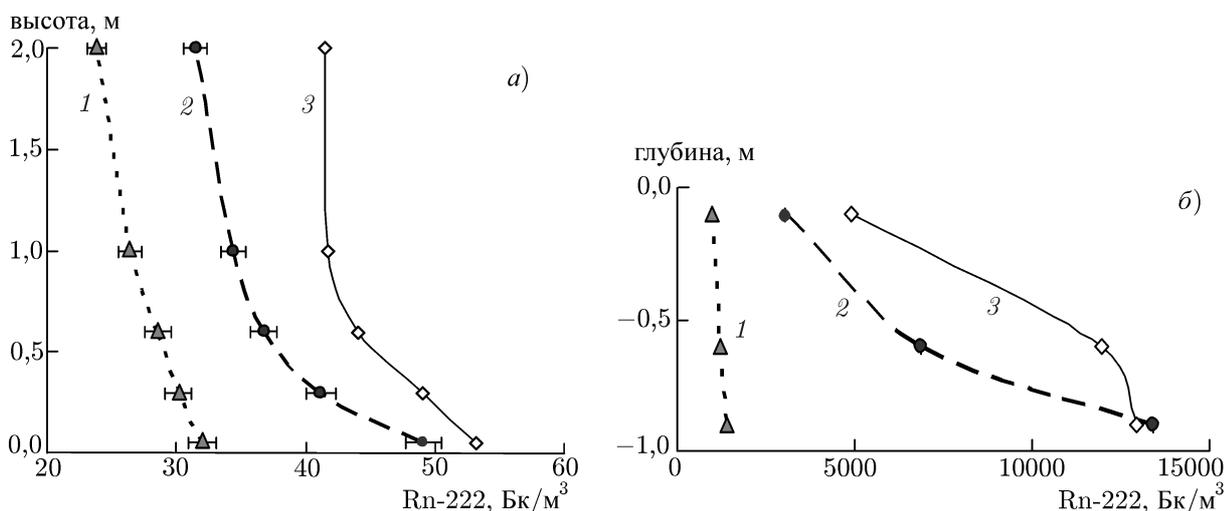


Рис. 2. Вертикальное распределение объёмной активности радона-222 в атмосфере (а) и в почве (б) пунктов Михайловка (кривые 1), Платов (2) и Талловеров (3) по результатам экспедиционных измерений. Кривая 3 — отсутствуют планки погрешностей. Горизонтальными отрезками показана стандартная ошибка измерений

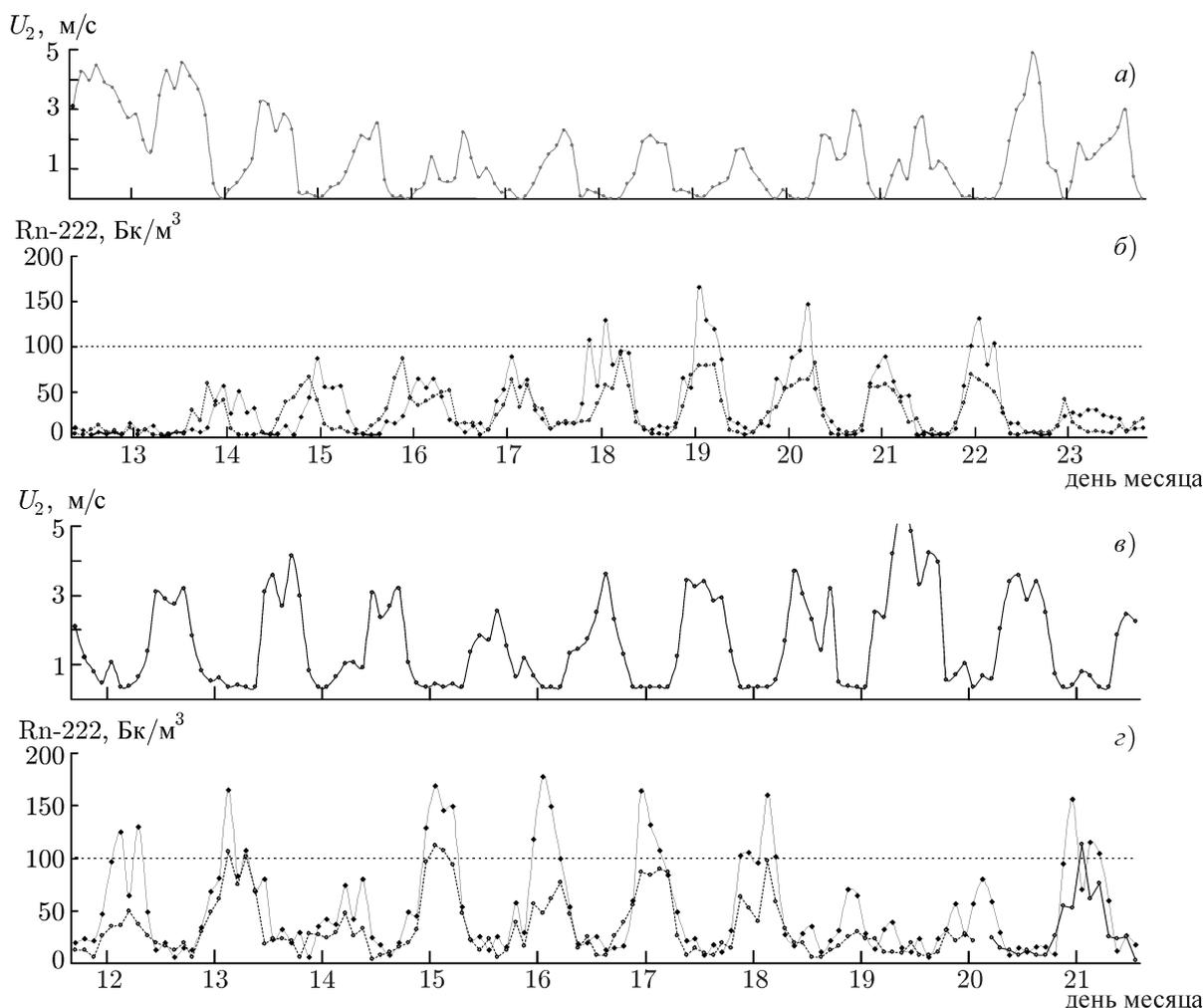


Рис. 3. Динамика скорости ветра и концентрации радона-222 в атмосфере для п. Михайловка в августе 1998 года (а, б) и п. Платов в августе 2005 года (в, з). Скорость измерялась на высоте 2 м, концентрация — на высоте 0,05 м (сплошная линия с маркерами) и 2 м (пунктирная линия с маркерами). Для сравнения горизонтальная пунктирная прямая показан уровень предельной допустимой концентрации радона-222 для закрытых помещений

На поток радона в атмосферу влияет состояние почвы: газопроницаемость и, как показали исследования, особенности распределения температуры приповерхностных слоёв почвы. По данным, полученным в пунктах наблюдений Ростовской области, спокойными ночами радона в атмосфере у земной поверхности тем больше, чем теплее почва на глубине 20 см по сравнению с глубиной 5 см (см. рис. 4). При таком распределении температуры в почве тёплый воздух из глубины выходит через почвенные поры в атмосферу и обогащает её радоном. Как правило, эта ситуация наблюдается, когда почва за день прогрелась, а с вечера начинается радиационное выхолаживание её поверхности. Радон при этом особенно активно выходит из почвы, и, если перемешивание ослаблено, накапливается вблизи её поверхности, вследствие чего образуется значительный вертикальный градиент его концентрации [12, 17]. Такая ситуация характерна для устойчивой стратификации температуры воздуха, когда атмосфера слабо перемешивается. При неустойчивой стратификации радиоактивные эманации выносятся вверх, из-за чего их концентрация вблизи земли снижается, и исчезает вертикальный градиент.

Ряд регрессии радона по градиенту температуры почвы для п. Платов на рис. 4 расположен в целом выше, чем для п. Михайловка, что вполне соотносится с более высоким содержанием радона-222 в почве п. Платов, чем в почве п. Михайловка.

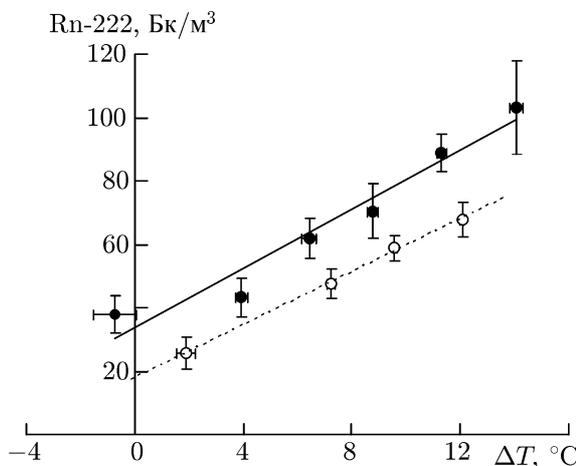


Рис. 4. Эмпирические ряды регрессии и уравнения линейной регрессии концентрации радона-222 в атмосфере на высоте 0,3 м  $Rn_{0,3}$  по разности температур почвы  $\Delta T$  на глубине 0,2 м и на её поверхности в пунктах Платов (чёрные точки и сплошная линия,  $Rn_{0,3} = 4,7\Delta T + 34$ ) и Михайловка (светлые точки и пунктирная линия,  $Rn_{0,3} = 4,2\Delta T + 18$ )

ции в ночные часы в п. Михайловка для тех периодов, когда наблюдатель фиксировал туман или густую дымку (см. табл. 3). В холодные ночи в конце лета, когда выстывает поверхность прогретой за день почвы, усиливается эксхалляция радона (выход радона из почвы, см. рис. 4). В итоге растёт его концентрация вблизи земли, увеличивая ионизацию, но в этих же условиях начинается конденсация влаги, образуется дымка или туман, из-за чего электропроводность в своих вариациях не следует за радоном [18].

Как видно из табл. 2 и 3, с увеличением высоты коррелированность полярных электропроводностей с концентрацией радона, в целом, понижается, что естественно. Также понятно, что близость адсорбирующей ионы земной поверхности сказывается на полярной электропроводности, из-за чего рассматриваемые коэффициенты корреляции на высоте 5 см оказываются, как правило, более низкими, чем на высоте 30 см.

Как уже отмечалось, по результатам измерений содержание радона-222 в атмосфере вблизи

Наблюдения показывают, что с радоном-222 тесно связана электропроводность атмосферы. Коэффициенты корреляции полярных электропроводностей и концентрации радона-222 (см. табл. 2) достигают 0,8, но, в общем, варьируются в зависимости от условий. Как правило, отрицательная электропроводность обнаруживает несколько более низкие коэффициенты корреляции с концентрацией радона-222, чем положительная. Это, по-видимому, связано с более сильным влиянием электродного эффекта на отрицательную электропроводность. Под отрицательной электропроводностью здесь и в дальнейшем будем понимать электропроводность, обусловленную отрицательными ионами, под положительной — электропроводность, обусловленную положительными ионами.

Повышение содержания аэрозолей при дымках или тумане ослабляет корреляцию электропроводности с радоном, о чём свидетельствуют более низкие значения коэффициентов корреляции

Таблица 2

Пункты наблюдений	Коррелируемые величины	Коэффициенты корреляции на высоте					Интервал усреднения, ч
		0,05 м	0,3 м	0,6 м	1,0 м	2,0 м	
Михайловка	$\lambda_+$ и Rn-222	0,63	0,70	0,61	0,60	0,53	265
	$\lambda_-$ и Rn-222	0,58	0,59	0,53	0,50	0,53	
Платов	$\lambda_+$ и Rn-222	0,76	0,77	0,71	0,72	0,68	235
	$\lambda_-$ и Rn-222	0,71	0,78	0,54	0,59	0,56	
Орловский	$\lambda_+$ и Rn-222	0,56	0,55	0,58	0,59	0,49	67
	$\lambda_-$ и Rn-222	0,60	0,54	0,60	0,59	0,45	

Таблица 3

Коррелируемые величины	Погодные условия	Коэффициенты корреляции на высоте				
		0,05 м	0,30 м	0,60 м	1,00 м	2,00 м
$\lambda_+$ и Rn-222	неясная атмосфера	0,05	0,11	0,19	0,50	0,17
	ясная атмосфера	0,37	0,67	0,64	0,71	0,45
$\lambda_-$ и Rn-222	неясная атмосфера	0,09	0,20	0,40	0,29	0,08
	ясная атмосфера	0,40	0,49	0,48	0,31	0,39

земной поверхности зависит от интенсивности турбулентного перемешивания [17] и стратификации приземного слоя [12]. Перемешивание атмосферы влияет на содержание радиоактивных эманаций в атмосферном воздухе и тем самым опосредованно определяет её электропроводность. Полученные в экспедициях данные показывают, что при устойчивой стратификации приземной атмосферы полярные электропроводности возрастают в разы по сравнению с ситуацией неустойчивой стратификации, особенно ниже уровня 1 м [12, 17, 18]. Поскольку устойчивая стратификация нижнего слоя атмосферы в летнее время наблюдается в безветренные ночные часы, а неустойчивая — днём, суточные вариации устойчивости атмосферы и, как следствие, интенсивности турбулентного обмена в значительной мере определяют суточные вариации атмосферных электрических величин в приземном слое. Анализ показывает, что средние высотные профили полярных электропроводностей  $\lambda$  над лишённым растительности грунтом выше некоторого уровня  $H$  можно аппроксимировать степенной функцией вида  $\lambda = ch^{-\alpha}$ . На рис. 5 представлены

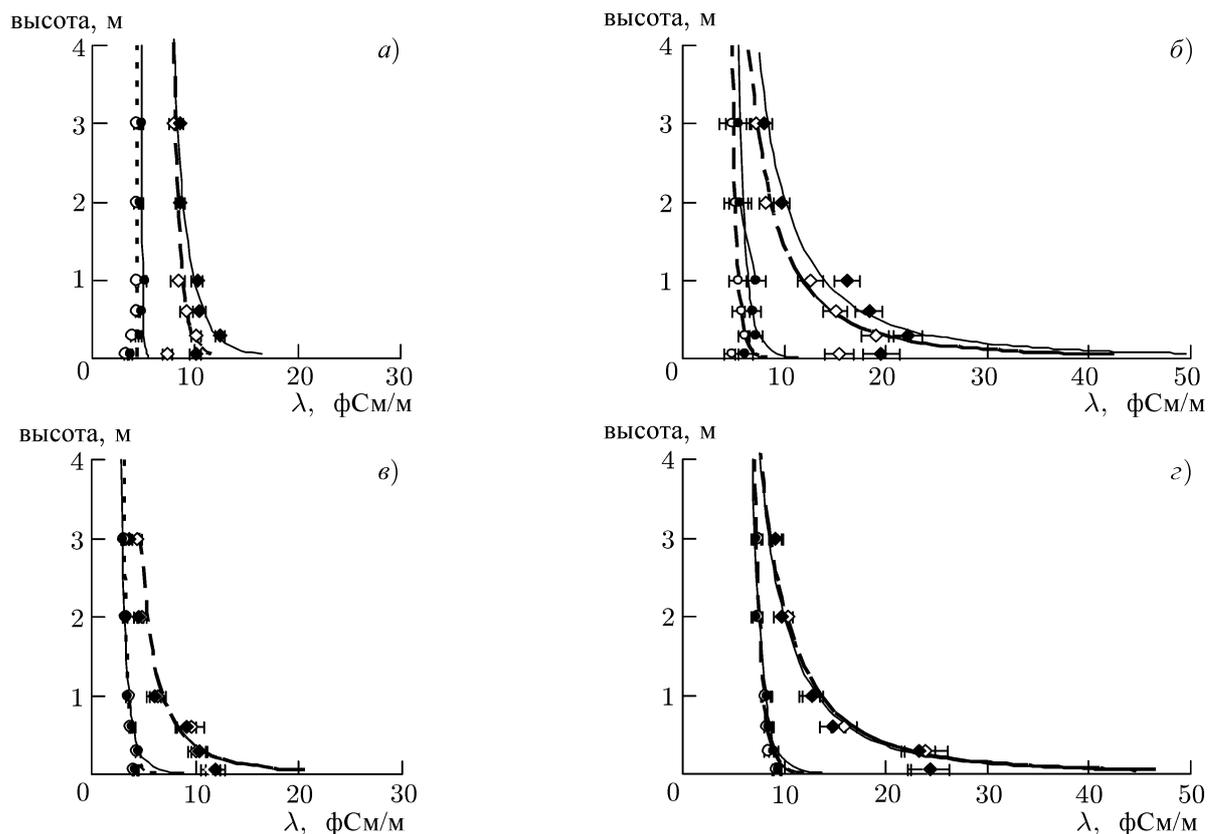


Рис. 5. Вертикальные профили полярных электропроводностей атмосферы, усреднённые для устойчивой ( $\diamond$  — отрицательная электропроводность,  $\blacklozenge$  — положительная) и неустойчивой ( $\circ$  — отрицательная электропроводность,  $\bullet$  — положительная) стратификации приземного слоя

измеренные высотные профили полярных электропроводностей для устойчивой и неустойчивой стратификации и аппроксимирующие их кривые (сплошные линии — положительная, пунктирные — отрицательная электропроводность). В работе [12] показано, как параметры аппроксимации связаны с содержанием радона в почве.

Ниже уровня  $H$  находится слой, прилегающий к земной поверхности, который может быть назван слоем поглощения. Этот слой обеднён ионами из-за адсорбции их поверхностью почвы и растениями. Толщина  $H$  над открытым грунтом иногда достигает  $0,6 \div 1,0$  м, но обычно не превышает  $0,3$  м. В работе [12] представлены аппроксимации вертикальных профилей полярных электропроводностей отдельно для условий устойчивой и неустойчивой стратификации приземного слоя и вычислена разность экспериментальной и расчётной электропроводностей на высоте  $0,05$  м для всех анализируемых случаев. Определённое таким образом уменьшение электропроводности из-за адсорбции ионов из слоя на высоте нескольких сантиметров для условий устойчивой стратификации может составлять  $30 \div 60$  %.

Градиент электропроводности выше слоя поглощения обуславливает образование здесь отрицательного объёмного заряда лёгких ионов, обнаруживаемого многими исследователями в условиях ослабленного перемешивания атмосферы при её устойчивой стратификации (см., например, [4, 5]).

Вопросы формирования объёмного заряда лёгких ионов рассматриваются в известных работах [1, 19]. Как отмечается в [1], объёмный заряд в атмосфере определяется двумя факторами: проводимостью в условиях градиента электропроводности и дисбалансом ионных потоков вблизи границы. С учётом того, что  $\mathbf{E} = \mathbf{j}_\lambda / \lambda$ , для плотности заряда лёгких ионов в квазистационарных условиях на основании уравнения Пуассона можно записать

$$\rho_{\text{л.и}} = \frac{\varepsilon_0}{\lambda} \operatorname{div} \mathbf{j}_\lambda - \frac{\varepsilon_0}{\lambda} (\mathbf{E} \nabla \lambda). \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{E} = -\mathbf{G} = -\nabla \varphi$  — электрическое поле,  $\mathbf{j}_\lambda$  — плотность тока,  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная.

Первое слагаемое в выражении (1) определяется дивергенцией тока проводимости на границе, в том числе атмосферы с землёй, а второе — градиентом электропроводности атмосферы. Таким образом, при прохождении тока проводимости вблизи земли объёмный заряд лёгких ионов

$$\rho_{\text{л.и}} = \rho_{\text{ээ}} + \rho_{\Delta\lambda} \quad (2)$$

образуется как в результате дивергенции тока проводимости, связанной с электродным эффектом (слагаемое  $\rho_{\text{ээ}}$ ), так и вследствие градиента электропроводности атмосферы (слагаемое  $\rho_{\Delta\lambda}$ ), обусловленного уменьшением интенсивности ионообразования с увеличением высоты.

Плотность объёмного заряда лёгких ионов при устойчивой стратификации, когда градиенты электропроводности особенно велики, имеет сложный высотный профиль (см. рис. 6). Следует отметить, что пункты наблюдений Платов и Талловеров характеризуются в среднем заметно более высокой электропроводностью, чем пункты Михайловка и Первомайское. Пунктирные линии на рис. 6 играют вспомогательную роль, позволяя лучше видеть тенденцию вариаций плотности заряда лёгких ионов.

В процессе формирования объёмного заряда вертикальная структура электрического поля в приземном слое атмосферы изменяется сложным образом. В атмосфере проекция градиента потенциала глобального электрического поля на вертикальную ось, направленную вверх, положительна, поэтому уменьшение градиента потенциала по высоте соответствует положительному объёмному заряду в слое, а увеличение — отрицательному. Действительно, на основании уравнения Пуассона для случая горизонтально однородной атмосферы можно записать  $\partial G_z / \partial z = -\rho / \varepsilon_0$  ( $\mathbf{G} = \nabla \varphi$ ).

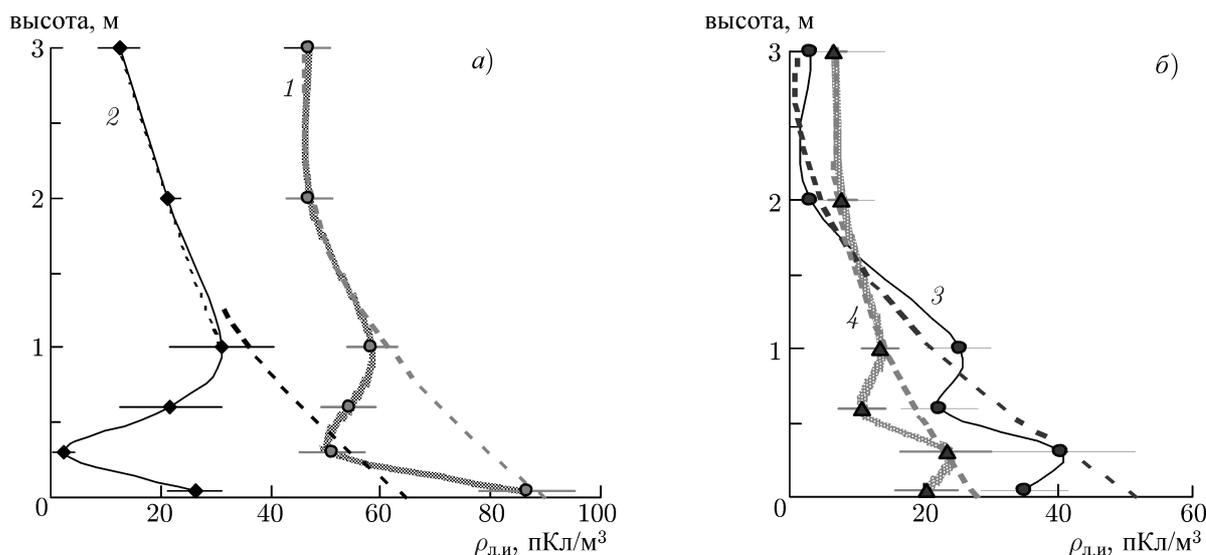


Рис. 6. Вертикальные профили плотности объёмного заряда лёгких ионов при устойчивой стратификации приземного слоя атмосферы для пунктов Платов (кривая 1), Талловеров (2), Михайловка (3) и Первомайское (4)

Следуя работе [20], мы решили выявить основные наиболее часто встречающиеся типы вертикальных профилей градиента электрического потенциала электродного слоя атмосферы на основании измерений электрических характеристик атмосферы, выполненных одним и тем же измерительным комплексом в разных пунктах наблюдений, а затем проанализировать, при каких условиях реализуется тот или иной профиль поля и какова природа объёмных зарядов, которые его определяют.

На рис. 7 представлены 8 видов высотного профиля электрического поля для двух пунктов (измерения проводились тремя коллекторами и флюксометром). В табл. 4 представлена относительная частота повторяемости того или иного вида профиля. Поле в целом ниже (см. рис. 7) в п. Платов, где радона больше, чем в п. Михайловка (табл. 1).

Профили градиента потенциала могут быть сведены к трём основным типам (см. рис. 8). Типы I и II характеризуются положительным объёмным зарядом непосредственно у земли и отрицательным — над ним. При этом тип I — двухслойный (слой положительного заряда — слой отрицательного, структура «плюс—минус»), II тип — трёхслойный («плюс—минус—плюс»), так называемый Z-образный профиль. Наконец, III тип — двухслойный: «минус» внизу и «плюс» над ним. Типы I и II наблюдаются чаще при устойчивой стратификации. Тип III характерен для неустойчивой атмосферы. При устойчивой стратификации профили I и II-го типов составили 89 %, 75 % и 60 % соответственно в пунктах Михайловка, Платов и Талловеров, а при неустойчивой стратификации профили III-го типа составили 100 %, 78 % и 77 % соответственно. В табл. 5 представлены характеристики атмосферы, усреднённые для периодов с типичными профилями градиента потенциала с учётом стратификации приземного слоя.

Таким образом, при устойчивой стратификации вблизи земли, как правило, формируются высотные профили поля, в которых уменьшение с высотой градиента электрического потенциала в нижней части, вызванное положительным зарядом электродного эффекта, выше сменяется его ростом по вертикали из-за наличия отрицательного объёмного заряда, связанного со значительным градиентом электропроводности на этих уровнях (профиль типа I, рис. 8а). Часто наблюдается Z-образный вертикальный профиль поля с чередованием объёмного заряда «плюс—минус—плюс» (профиль типа II, рис. 8б). Анализ всей совокупности результатов свидетельствует

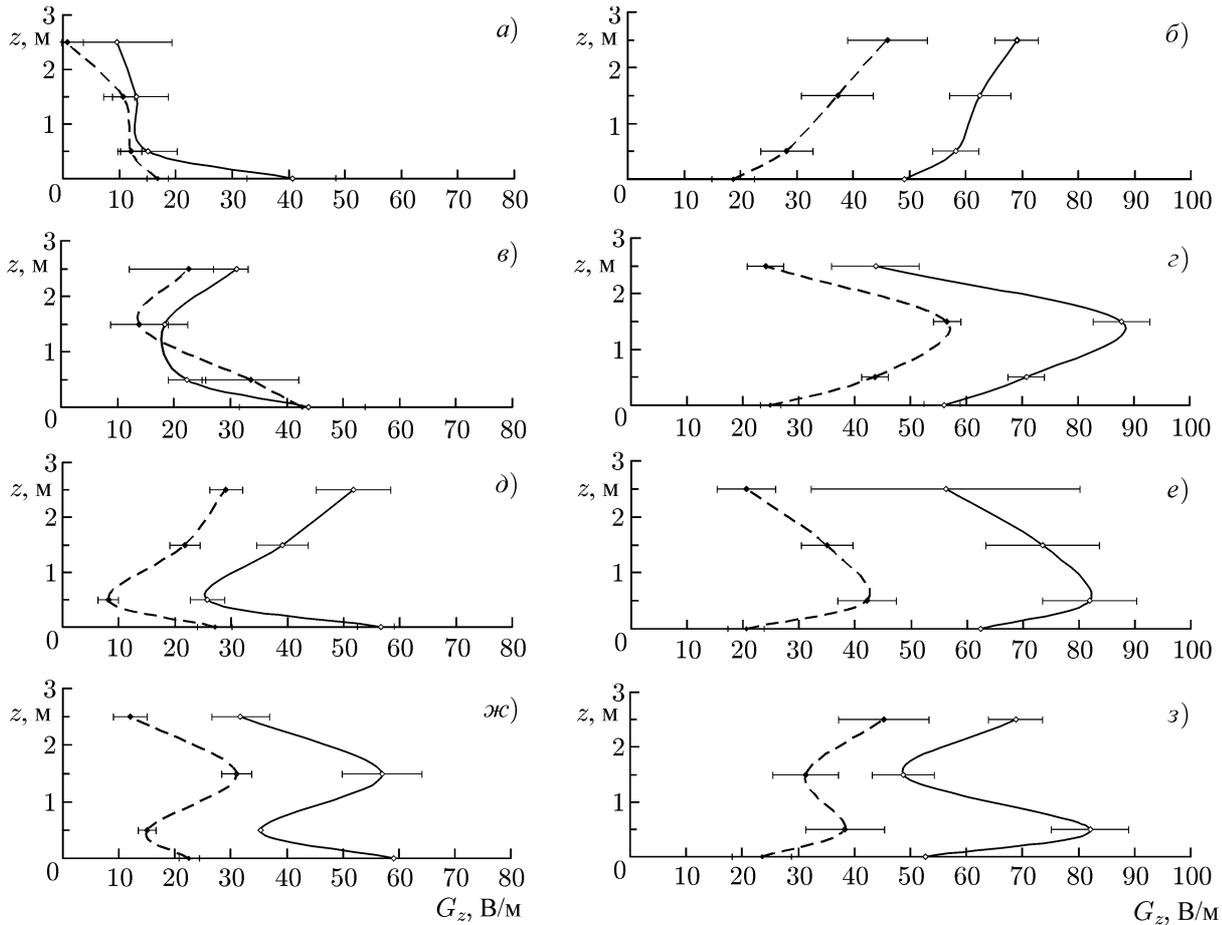


Рис. 7. Виды профилей градиента потенциала, наблюдавшихся по данным флюксметра и коллекторной установки в п. Платов (штриховые линии), Михайловка (сплошные линии)

Таблица 4

Пункт наблюдений	Доля наблюдаемых профилей (в процентах), изображённых на рис. 7 на панелях								Интервал усреднения, ч
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>	
Платов	6	5	1	37	6	12	29	3	202
Михайловка	8	4	17	12	20	4	24	12	113

о том, что поле в приземном слое в условиях устойчивой стратификации при заметном эманировании почвы имеет трёхслойный Z-образный вертикальный профиль, который сжимается или вытягивается по вертикали в зависимости от условий. Возможно, оба варианта профиля имеют трёхслойную структуру, но различаются масштабом по вертикали: профиль II сжат по вертикали, а профиль I более растянут и выходит за пределы изучаемого слоя. Полученные для устойчивой стратификации результаты находятся в хорошем согласии с результатами экспериментальных и теоретических исследований других авторов [5, 21]. На рис. 8а наряду с профилями поля для четырёх пунктов Ростовской области (кривые 1–4) показано экспериментальное распределение градиента потенциала, полученное в работе [5] для безветренных ночей (кривая 5 на рис. 8а), и результат расчёта [21] для случая отсутствия турбулентности (кривая 6 на рис. 8а).

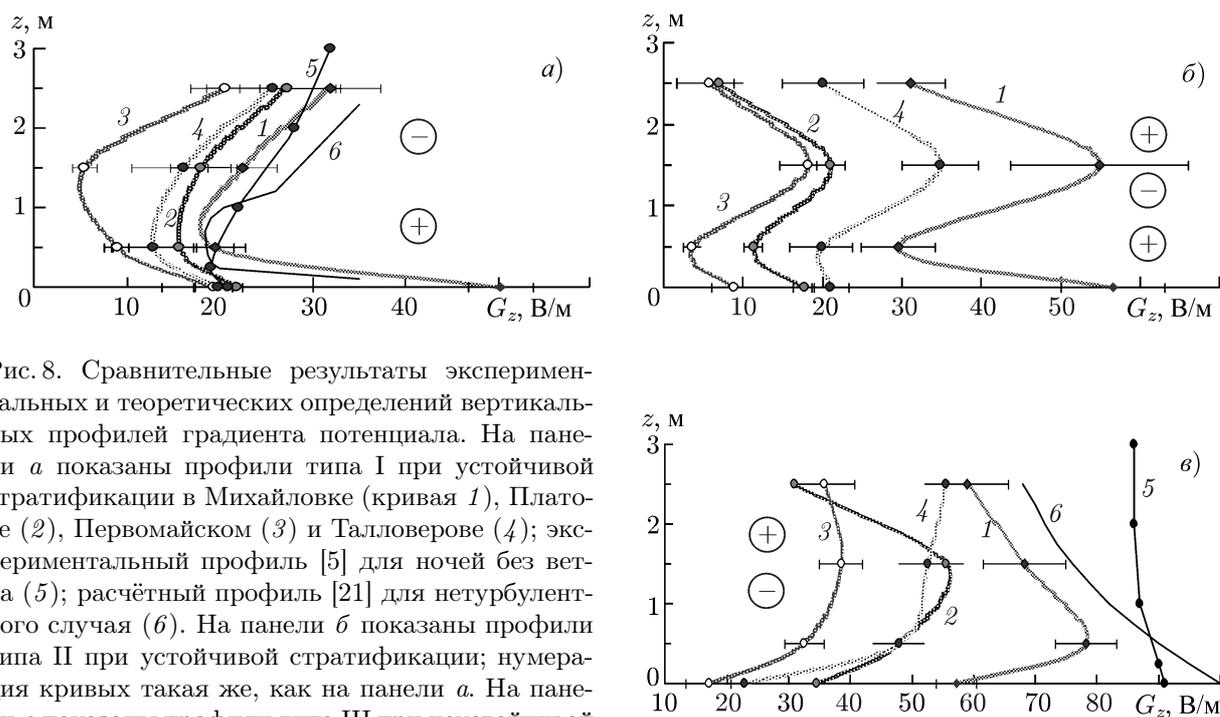


Рис. 8. Сравнительные результаты экспериментальных и теоретических определений вертикальных профилей градиента потенциала. На панели *a* показаны профили типа I при устойчивой стратификации в Михайловке (кривая 1), Платове (2), Первомайском (3) и Талловерове (4); экспериментальный профиль [5] для ночей без ветра (5); расчётный профиль [21] для нетурбулентного случая (6). На панели *b* показаны профили типа II при устойчивой стратификации; нумерация кривых такая же, как на панели *a*. На панели *c* показаны профили типа III при неустойчивой стратификации; нумерация кривых такая же, как на предыдущих панелях

Градиентные измерения электрических характеристик атмосферы [4, 5] обнаружили одними из первых появление слоёв отрицательного объёмного заряда в пределах нижнего 3-метрового слоя атмосферы в ночные часы без ветра. В работе [4] уменьшение концентрации полярных ионов, наблюдаемое для большинства условий в Кембридже в нижнем метровом слое, объяснялось увеличением содержания радиоактивных эманаций вблизи земной поверхности. При этом наблюдался отрицательный объёмный заряд на высоте 0,5 м в ночные часы. Днём заряд на этой высоте был положительным. Наблюдаемые различия прослеживаются как по экспериментальным, так и по расчётным данным для ночного и дневного электродного слоя, и в работе [4] связываются со значительным изменением турбулентной диффузии в течение суток. В измерениях [5] по данным радиоактивных коллекторов установлено, что тихими ночами при скорости ветра на высоте 4 м ниже 0,5 м/с профиль градиента потенциала имеет минимум на высоте 15÷40 см, ниже которого располагается положительный объёмный заряд с плотностью 160÷320 пКл/м<sup>3</sup> (заряд измерялся фильтром Оболенского на уровне земли). Выше этого минимума градиента потенциала присутствует отрицательный объёмный заряд до высоты, по крайней мере, 3 м с плотностью порядка сотен  $e/\text{см}^3$  ( $100e/\text{см}^3 = 16 \text{ пКл/м}^3$ ). Нижний положительный объёмный заряд в [5] объяснялся электродным эффектом, а отрицательный заряд связывался со значительным перепадом по высоте скорости ионообразования из-за заметной диффузии радиоактивных газов из почвы.

Как показали наши наблюдения и результаты других авторов (см. [9]), ещё одним источником объёмного заряда в самом нижнем слое атмосферы является подъём пыли ветровыми потоками с иссушенной земной поверхности. В работе [22] в качестве примера показан часовой фрагмент записи градиента потенциала на уровне земли флюксметром. Хорошо видно, что при подъёме пыли машинами на грунтовой дороге, что фиксировалось наблюдателем, поле резко уменьшается, меняет знак, а затем восстанавливается. Всё это длится 3÷5 минут, такое же время для подобных эффектов указано в работе [9]. Автор [9] наблюдал отрицательный объёмный за-

Таблица 5

Параметры атмосферы	Высота, м		Устойчивая стратификация, $m < 0,7$			Неустойчивая стратификация, $m > 1,1$	
			Михайловка		Платов, I и II	Михайловка, III	Платов, III
			I	II			
Температура воздуха, °C	2,0	среднее	11,6	7,7	13,2	22,8	26,5
		ст. ошибка	5,2	4,1	5,0	2,2	4,5
Градиент температуры, °C/м	0,5 ÷ 2,0	среднее	0,4	1,0	0,5	-0,1	-0,4
		ст. ошибка	0,2	0,8	0,3	0,1	0,2
Скорость ветра, м/с	0,5	среднее	0,2	0,0	0,2	1,9	2,0
		ст. ошибка	0,2	0,0	0,2	0,6	0,8
	2,0	среднее	0,4	0,1	0,5	2,5	2,8
		ст. ошибка	0,4	0,1	0,5	0,9	1,0
Коэффициент турбулентности, м <sup>2</sup> /с	0,5 ÷ 2,0	среднее	0,02	0,00	0,01	0,08	0,12
		ст. ошибка	0,02	0,00	0,01	0,04	0,03
Концентрация радона-222, Бк/м <sup>3</sup>	0,05	среднее	47	60	88	9	17
		ст. ошибка	26	25	43	7	8
Число профилей			27	12	54	19	47

ряд при работе сельскохозяйственных машин рядом с площадкой наблюдений, если поверхность почвы была сухой. Насыщение нижних слоёв атмосферы отрицательно заряженной пылью при позёмке, по-видимому, обуславливает появление профиля поля типа III при неустойчивой стратификации. Это профиль с отрицательным объёмным зарядом в самом нижнем слое от 0 м до высоты примерно 0,5 ÷ 1,5 м, который выше сменяется положительным зарядом, судя по уменьшению поля с увеличением высоты (кривые 1–4 на рис. 8в). Кривая 5 на рис. 8в показывает, что отрицательный объёмный заряд вблизи поверхности земли в дневные часы с ветром не был обнаружен, что объясняется, возможно, характером подстилающей поверхности (мелкий гравий, глина) в гористой местности вблизи подножия Сокорро.

Суточные вариации устойчивости приземного слоя в сочетании с эманированием почвы в пунктах наблюдений обуславливают типичную суточную трансформацию электрических характеристик нижнего слоя атмосферы, в частности, закономерную смену типов профилей поля в течение суток (рис. 9). Как видно на диаграммах рис. 9, плотность объёмного заряда, находящегося на ионах всех подвижностей, в том числе и на заряженных из-за адсорбции зарядов лёгких ионов аэрозолях, по нашим оценкам в среднем на порядок больше, чем плотность объёмного заряда лёгких ионов. Плотность объёмного заряда лёгких ионов  $\rho_{л.и}$  (см. рис. 6) имеет величину порядка десятков пКл/м<sup>3</sup>. Аналогичный результат для  $\rho_{л.и}$  получен в работе [10], где приведены высотные профили полярных электропроводностей в слое до 1,5 м и их разности, по которым нетрудно оценить плотность заряда лёгких ионов. При этом плотность объёмного заряда ионов всех подвижностей оценивается сотнями пКл/м<sup>3</sup>, как мы видим на рис. 9. Можно предположить, что объёмный заряд лёгких ионов в приземном слое формируется при прохождении тока проводимости через электродный слой и оседает затем на аэрозольных частицах. Тяжёлые ионы живут на порядок дольше лёгких ионов, поэтому заряженные аэрозольные частицы могут долго находиться в приземном слое атмосферы и определять его электрическую структуру. Заряд накапливается на аэрозольных частицах, что обуславливает наблюдаемые плотности заряда ионов всех групп.

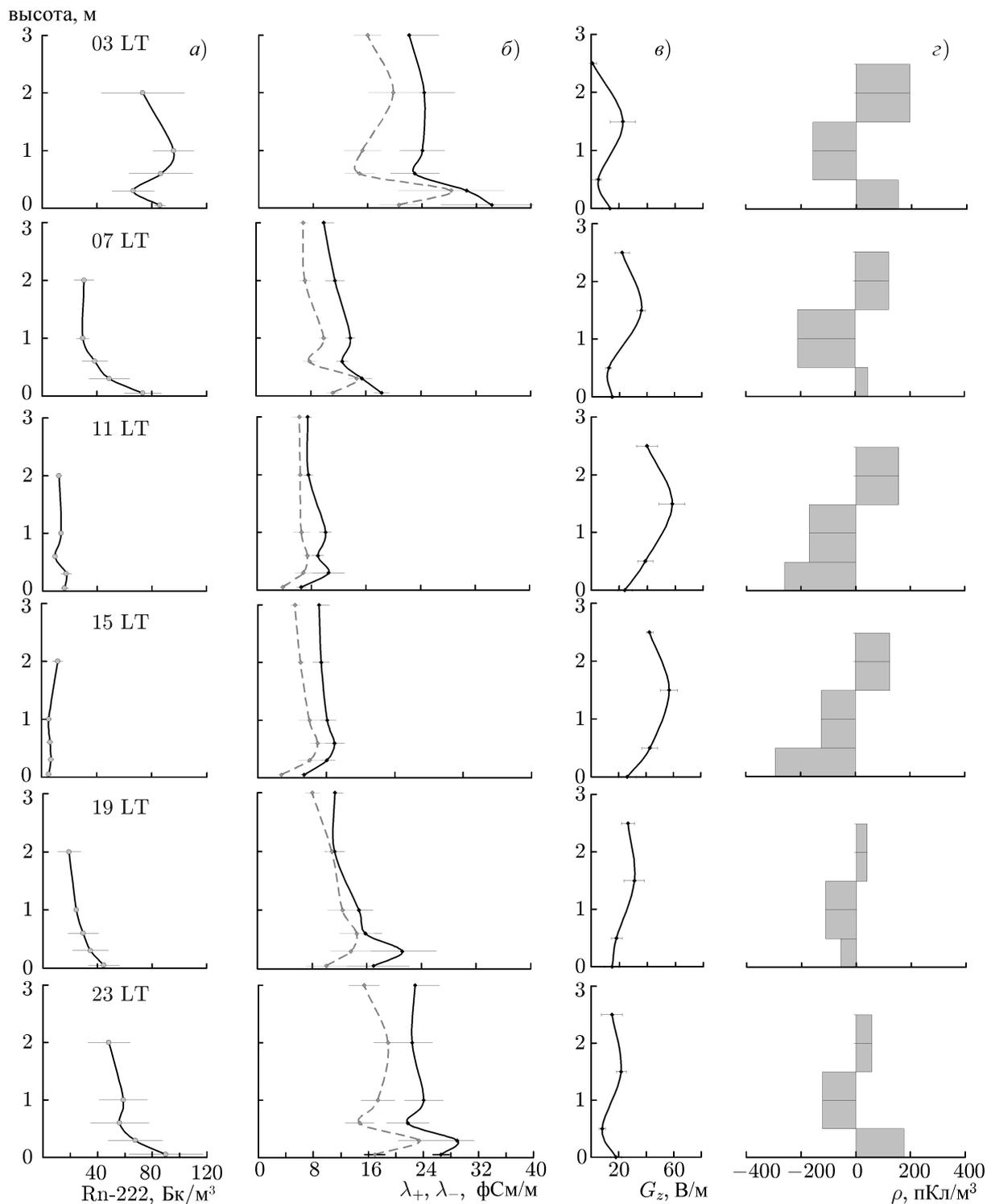


Рис. 9. Типичные суточные трансформации вертикальных профилей характеристик атмосферы: концентрации радона-222 (*a*); положительной (сплошная линия) и отрицательной (штриховая линия) удельной электропроводностей атмосферы (*б*); градиента электрического потенциала (*в*); плотности объёмного заряда всех ионов (*г*) в нижнем 3-метровом слое (п. Платов, 2003–2005 гг.). Графики построены усреднением данных по 2 реализациям (первый ряд графиков сверху), 4 реализациям (второй ряд), 6 (третий ряд), 5 (четвёртый ряд), 4 (пятый ряд) и 5 (шестой ряд)

## ВЫВОДЫ

Отдельное описание структуры электродного слоя для устойчивой и неустойчивой стратификации температуры приземного слоя необходимо, если почва в пункте наблюдений заметно эманурует [8, 12, 17]. Значительная эксхалация радона и накопление его у земли при устойчивой стратификации атмосферы существенно сказывается на вертикальном распределении электропроводности в электродном слое и повышает ионизацию вблизи земной поверхности. Это, в свою очередь, влияет на формирование приземного объёмного заряда, на электрическое поле и на обмен зарядами между землёй и атмосферой. Наличие аэрозолей в приземной атмосфере способствует образованию долгоживущих слоёв объёмного заряда разного знака в результате адсорбции аэрозолями зарядов лёгких ионов. Анализ распределения по высоте плотности заряда всех ионов и плотности заряда лёгких ионов позволяет предположить, что имеет место отличие коэффициентов присоединения лёгких ионов разной полярности к аэрозолям, как показывают расчёты [23].

По результатам измерений при устойчивой стратификации в нижнем 3-метровом слое атмосферы наиболее часто наблюдается высотный профиль градиента потенциала, соответствующий положительному объёмному заряду непосредственно вблизи земной поверхности, над которым расположен слой отрицательного заряда (тип I, структура «плюс–минус»). В пределах нижних 3-х метров при устойчивой стратификации выше этого отрицательного заряда часто фиксируется положительный объёмный заряд (тип II, структура «плюс–минус–плюс»). При неустойчивой стратификации (днём при заметном ветре) в условиях сухой поверхности почвы степной зоны юга России в летний период большинство профилей градиента потенциала свидетельствуют о наличии вблизи земли отрицательного объёмного заряда, который, по-видимому, может быть связан с наэлектризованной при сносе ветром с поверхности земли пыли; над ним располагается положительный объёмный заряд электродного эффекта (тип III, структура «минус–плюс»).

Суточные вариации устойчивости приземного слоя в сочетании с эманированием почвы в пунктах наблюдений обуславливают типичную суточную трансформацию электрических характеристик в нижнем слое атмосферы, в частности, закономерную смену типов высотных профилей электрического поля в течение суток.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hoppel W. A., Anderson R. V., Willett J. C. // Atmospheric electricity in the planetary boundary layer in the Earth's electrical environment / Ed. by E. P. Krider, R. G. Roble. National Academy Press, 1986. P. 149.
2. O'Donnel G. A. // J. Atm. Terr. Phys. 1952. V. 2. P. 201.
3. Mühleisen R. // J. Atm. Terr. Phys. 1961. V. 20. P. 79.
4. Law J. // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1963. V. 89. P. 107.
5. Crozier W. D. // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 2785.
6. Higazi K. A., Chalmers J. A. // J. Atm. Terr. Phys. 1966. V. 28. P. 327.
7. Khera M. K., Raina B. N. // J. Atm. Terr. Phys. 1978. V. 4. P. 1297.
8. Israelsson S. // Pure Appl. Geophys. 1978. V. 116. P. 149.
9. Israelsson S. // J. Atm. Terr. Phys. 1994. V. 56, No. 12. P. 1551.
10. Israelsson S., Knudsen E., Anisimov S. V. // J. Atm. Terr. Phys. 1994. V. 56, No. 12. P. 1545.
11. Knudsen E., Israelsson S., Hallberg B. // J. Atm. Terr. Phys. 1989. V. 51, No. 6. P. 521.
12. Petrov A. I., Petrova G. G., Panchishkina I. N. // Atm. Res. Elsevier. 2009. V. 91. P. 206

13. Петров А. И., Петрова Г. Г., Панчишкина И. Н. и др. // Изв. вузов. Сев.-Кав. рег. Естест. науки. 2010. № 3. С. 47
14. Орленко Л. Р. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 270 с.
15. Имянитов И. М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М.: Гостехтеоретиздат, 1957. 483 с.
16. Брикар Дж. // Проблемы электричества атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. С. 68.
17. Petrov A. I., Petrova G. G., Panchishkina I. N. // Proc. 11th Int. Conf. Atm. Electricity. Alabama, 7–11 June 1999, Guntersville, USA. P. 547.
18. Петров А. И., Петрова Г. Г., Панчишкина И. Н. и др. // Тр. V Российской конф. по атмосферному электричеству, 22–26 сентября 2003 г., г. Владимир. С. 124.
19. Margeev E. A. // Space Sci. Rev. 2008. V. 137, No. 1–4. P. 373.
20. Имянитов И. М., Чубарина Е. В. Электричество свободной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 240 с.
21. Hoppel W. A. // Planetary Electrodynamics. V. 2. New-York: Gordon and Breach Sci. Publ., 1969. P. 167.
22. Петрова Г. Г. // Изв. вузов. Сев.-Кав. рег. Естест. науки. Спецвыпуск «Физика атмосферы». 2010. С. 77.
23. Hoppel W. A., Frick G. M. // Aerosol Sci. Tech. 1986. V. 5, No. 1. P. 1.

Поступила в редакцию 16 апреля 2013 г.; принята в печать 27 декабря 2013 г.

#### **FORMATION OF THE ELECTRIC STRUCTURE IN THE BOTTOM LAYERS OF THE ATMOSPHERE: EXPERIMENTAL STUDIES AND GENERALIZATION OF THE RESULTS**

*G. G. Petrova, A. I. Petrov, and I. N. Panchishkina*

We discuss the results of field research of the electric process in the near-Earth layer of the atmosphere, where we studied vertical variations of the electric potential gradient near the Earth's surface along with the data of measurements of polar conductivity, concentration of radon-220 in the atmosphere and soil gas, and meteorological parameters in the bottom 3-meter layer of the atmosphere. Variations in the potential gradient in the near-Earth atmosphere layer are determined by local processes of formation of the volume electric discharge. Density profiles of the total space charge were estimated in accordance with Poisson's equation basing on direct measurements of the electric potential. The density of the light-ion charge was calculated basing on the results of measurements of polar electric conductivity. It was found that alternation of two or three layers of the space charge with different signs is observed, as a rule, at the observation points in the 3-m layer of the atmosphere under consideration. The nature of the charged layers, which are observed in different conditions near the Earth's surface, is discussed.