

# Оценка плотности объемного заряда по результатам измерений вертикальных профилей электрических характеристик в приземном слое атмосферы

Петрова Г.Г.

## Состояние проблемы.

Значение приземного слоя атмосферы для глобальных электрических процессов велико, поскольку именно здесь происходит обмен зарядами между атмосферой и землей. Здесь расположен один из электрических «контактов» глобальной электрической цепи (ГЭЦ): контакт нижнего слоя атмосферы с земной поверхностью. В то же время поиск закономерностей пространственно - временных вариаций электрических характеристик приземного слоя и их интерпретации осложнен тем, что электрические процессы протекают здесь вблизи границы двух сред, каковой является земная поверхность, и многие физические характеристики претерпевают на ней разрыв.

Теоретические подходы к исследованию структуры электродного слоя атмосферы подробно рассматриваются, например, в таких известных работах, как [1,2], а также в справочном обзоре [3]. Для описания электрических процессов в нижних слоях атмосферы рассматривается система уравнений:

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

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{1}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$$

Если  $\vec{j} = \lambda \vec{E} + \rho \vec{V} - D_T \nabla \rho$ , где  $\lambda = \sum_i (e_+^i b_+^i n_+^i + e_-^i b_-^i n_-^i) = \lambda_+ + \lambda_-$  - удельная электропроводность атмосферы, и  $\rho = e \sum (n_+^i - n_-^i)$  - плотность объемного заряда ионов всех подвижностей, то

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = 0 \tag{2}$$

Здесь  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума,  $n_{\pm}^i$  - объемная концентрация ионов  $i$ -той группы,  $b_{\pm}^i$  - их подвижность,  $\bar{v}$  - гидродинамическая скорость,  $\bar{D}_{\pm}^i = D_{\pm}^i + D_T$  - коэффициент диффузии,  $D_{\pm}^i$  - коэффициент молекулярной диффузии,  $D_T$  - коэффициент турбулентной диффузии,  $K_{\pm}^i$  - член, описывающий взаимодействие ионов с ионами других групп и с аэрозольными частицами,  $\nu_{\pm}^i$  - интенсивность ионообразования ионов  $i$ -той группы,  $\alpha_{\pm}^i$  - коэффициенты рекомбинации ионов,  $j$  - плотность электрического тока.

Вместе с граничными и начальными условиями система уравнений образует полную систему уравнений для нахождения пространственного распределения электрических характеристик атмосферы вблизи поверхности земли.

Обычно задачу сводят к одномерной, исходя из того, что характерные масштабы изменения электрических величин по горизонтали много больше вертикальных, а вектор напряженности перпендикулярен к земной поверхности. При этом находят вертикальные распределения  $E$ ,  $\lambda$  и  $\rho$  в горизонтально-однородном приземном слое над горизонтальным участком земной поверхности.

При  $T \gg \frac{L}{4\pi\lambda_0}$  ( $\lambda_0 = en_0b_0$ ) будет иметь место стационарность процессов, и стационарную систему уравнений для горизонтально-однородного слоя можно записать, исходя из условия:  $\frac{dn_{\pm}^i}{dt} = 0$ . Здесь  $L$  - характерный масштаб пространственного изменения величин,  $T$  - характерное время электрических процессов в приземном слое атмосферы.

При решении задачи об электродном эффекте рассматривается два предельных случая: классический и турбулентный электродные эффекты.

Классический электродный эффект проявляется в условиях хорошей погоды, то есть при отсутствии ветра, облачности, конвекции, загрязнения. Считая коэффициент турбулентной диффузии равным нулю, а также, пренебрегая молекулярной диффузией и аэрозолями и рассматривая только одну группу легких ионов, получают уравнения, описывающие классический электродный эффект.

Характерная толщина электродного слоя в случае классического электродного эффекта определяется как  $L = \frac{b_0 E_0}{\sqrt{\alpha v}}$ , где  $b_0 = \max\{b_+, b_-\}$ ,  $E_0$  - напряженность вблизи земной поверхности.

Для учета аэрозолей в правой части уравнения для  $n_{\pm}$  сохраняется член  $K_{\pm}$ , учитывающий взаимодействие легких ионов с аэрозольными частицами. Обычно он имеет вид  $K_{\pm} = -\beta N_{\pm} n_{\pm} - \gamma N_0 n_{\pm}$  ( $\beta$  и  $\gamma$  - коэффициенты присоединения легких ионов к заряженным и незаряженным аэрозолям,  $N_{\pm}$  и  $N_0$  - концентрация заряженных и незаряженных аэрозолей соответственно).

Для учета влияния турбулентной диффузии на электродный эффект используют метод Рейнольдса. Все входящие в основную систему уравнений величины, например,  $f$ , представляются в виде

$$f = \langle f \rangle + f'$$

где  $f'$  - флуктуации величины  $f$ , а  $\langle f \rangle = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} f dt$  - среднее значение  $f$ , полученное путем осреднения по времени. Здесь  $T_1$  - масштаб времени, для которого справедливо условие  $T_{\phi} \ll T \ll T_{cp}$ , причем  $T_{\phi}$  - характерный временной масштаб флуктуаций,  $T_{cp}$  - характерный временной масштаб для средних значений,

$\langle f' \rangle = 0$ . Если пренебречь квадратичными членами и представить  $\langle n_{\pm}^i \vec{v}' \rangle$  путем введения коэффициента турбулентной диффузии  $D_T$  в виде

$$\langle n_{\pm}^i \vec{v}' \rangle = -D_T(\vec{r}) \text{grad} \langle n_{\pm}^i \rangle$$

можно получить уравнение, описывающее турбулентный электродный эффект. Для  $T \gg \tau$  ( $T$  - характерное время изменения электрических характеристик,  $\tau = \sqrt{\nu \alpha}$ ) система уравнений становится стационарной. Для решения системы уравнений в случае турбулентного электродного эффекта требуется задание вида коэффициента турбулентной диффузии  $D_T(\vec{r})$  [3].

Обзор теоретических подходов показывает, насколько непростой является задача математического моделирования электродного слоя атмосферы. Система уравнений, описывающих электродный слой атмосферы, аналитического решения

в общем виде в настоящее время не имеет, поэтому при решении обсуждаемой задачи как аналитически, так и широко применяемыми ныне методами численного моделирования, неизбежно приходится принимать целый ряд условий и ограничений, которые, по-видимому, не всегда соответствуют реальным состояниям электродного слоя. Принимающиеся в процессе моделирования значения констант также могут не соответствовать их реальным значениям.

Сложность математического описания электрических свойств приземного слоя атмосферы делает особенно важным экспериментальное изучение электродного слоя. Как видно из приведенных уравнений, значительную роль в приэлектродных процессах играет плотность объемного заряда  $\rho$ . Плотность объемного заряда в приземной атмосфере очень изменчива и подвержена влиянию множества факторов. В одномерном случае вариации  $\rho$  определяются дивергенцией плотности вертикального тока (2), а сам заряд в соответствии с уравнением Пуассона (1) обуславливает вертикальный профиль градиента электрического потенциала вблизи земли.

Вопрос о закономерностях вариаций плотности объемного заряда в приземном слое актуален в силу важности данного параметра для исследований атмосферного электричества и недостатка данных о нем, обусловленного сложностью измерений этой величины. В поисках этих закономерностей в настоящей работе сделаны оценки плотности объемного заряда косвенными методами [4] в условиях устойчиво стратифицированного приземного слоя. Несмотря на приблизительность таких оценок, на наш взгляд удастся обнаружить некоторые типичные особенности вертикального распределения этой величины, допускающие их вполне разумную физическую интерпретацию.

Необходимо заметить, что настоящую работу следует рассматривать как продолжение статьи [5], размещенной в данном сборнике. Здесь использованы те же массивы данных об электрических характеристиках атмосферы, что описаны в указанной статье, а метеорологические условия измерений представлены в таблице 1 работы [5]. Кроме того, методы измерений и измерительный комплекс,

использованный при создании этой работы, описаны в статье [6] из настоящего сборника.

### **Результаты экспериментальных исследований и их анализ**

Один из методов оценки средней для некоторого слоя плотности объемного заряда ионов всех подвижностей основан на измерениях электрического потенциала на нескольких уровнях. Он позволяет оценить  $\rho$  по вертикальному профилю градиента потенциала на основании уравнения  $\text{div}\vec{G} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$ , где  $\vec{G} = \text{grad}\varphi$  - градиент электрического потенциала атмосферы. Поскольку в случае горизонтальной земной поверхности характерные масштабы изменения электрических величин по горизонтали много больше вертикальных и вектор  $\vec{G}$  перпендикулярен к земле, можно записать:  $\frac{dG}{dz} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$ , где  $G$  - проекция вектора градиента на вертикаль. Схема подсчетов  $\rho$  дана в разделе «Измерение вертикальной составляющей градиента потенциала электрического поля атмосферы» работы [6] в настоящем сборнике.

На рис.1, 2 помещена диаграмма плотности  $\rho$  объемного заряда ионов всех подвижностей, оцененной по измеренному профилю потенциала. Результаты получены посредством одного и того же измерительного комплекса в разные периоды в двух пунктах Ростовской области: на измерительной площадке Михайловка в августе 1997 г. (рис.1) и измерительной площадке Талловеров Кашарского района в августе 2008 года (рис.2). Различием является то, что в Талловерове потенциал атмосферы измерялся не на трех высотах: 1; 2; 3 метра, - а на четырех: 0,5; 1; 2; 3 метра, что позволило подробнее просчитать градиент потенциала и, соответственно, плотность объемного заряда вблизи земной поверхности.

Здесь же представлены профили концентрации радона-222, удельных полярных электропроводностей и градиента потенциала, измеренные одновременно в условиях устойчиво стратифицированного приземного слоя. Планками на всех рисунках показаны значения стандартной погрешности.

Для оценки плотности объемного заряда легких ионов можно использовать разность удельных полярных электропроводностей  $(\lambda_+ - \lambda_-)$ . Действительно, исходя из выражения для плотности объемного заряда легких ионов  $\rho_{л.и.} = e(n_+ - n_-)$  с учетом того, что  $\lambda_+ = eb_+n_+$  и  $\lambda_- = eb_-n_-$ , полагая  $b_+ = b_- = b$ , получим  $\rho_{л.и.} = \frac{\lambda_+ - \lambda_-}{b}$  (здесь  $e$  - элементарный заряд,  $n_+$ ,  $n_-$  - концентрация положительных и отрицательных легких ионов,  $b$  - их подвижность).

Вертикальный профиль разности  $(\lambda_+ - \lambda_-)$  помещен на рисунках 1 и 2. Как можно видеть, отрицательные значения разности полярных электропроводностей  $(\lambda_+ - \lambda_-)$  на графиках соотносятся с отрицательными значениями плотности объемного заряда ионов всех подвижностей, рассчитанной по результатам измерения характеристик поля.

Следует в то же время заметить, что подвижности положительных и отрицательных легких ионов, вообще говоря, как известно, разнятся. В таком случае для подсчета плотности объемного заряда легких ионов через удельные электропроводности надо использовать соотношение:

$$\rho_{л.и.} = \frac{\lambda_+}{b_+} - \frac{\lambda_-}{b_-}.$$

Если принять, например, что  $b_+ = 1,36 \cdot 10^{-4}$  и  $b_- = 1,56 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/В·с (как обычно мы полагаем в наших работах), то даже в случае отрицательных величин  $(\lambda_+ - \lambda_-)$  значение плотности объемного заряда легких ионов, рассчитанное по данным эксперимента, может оказываться положительным. В то же время вид профиля  $\rho_{л.и.}$  по экспериментальным данным повторяет конфигурацию профиля  $(\lambda_+ - \lambda_-)$  с впадиной в сторону отрицательных значений, указывая, как отмечалось выше, на процесс накопления отрицательного объемного заряда легких ионов, который, очевидно, и компенсирует в этом слое положительный объемный заряд электродного эффекта - частично или полностью. В работе [7] получена зависимость вида расчетного профиля градиента потенциала в нижнем километровом слое атмосферы от соотношения подвижностей положительных и отрицательных ионов, которая косвенно подтверждает наши выводы. По

результатам этих расчетов при соотношении подвижностей, близком к 1, реализуется Z-образный профиль поля, что указывает на наличие слоя отрицательного заряда, но уже при  $b_+/b_- = 0,9$  профиль градиента потенциала при тех же прочих условиях становится гладким и соответствует положительному объемному заряду на всем протяжении исследуемого слоя.

Плотность объемного заряда, дислоцированного на ионах всех подвижностей - в том числе и на заряженном из-за адсорбции зарядов легких ионов аэрозоле - по нашим оценкам в среднем на порядок больше, чем плотность объемного заряда легких ионов. Действительно, для  $(\lambda_+ - \lambda_-) = 1$  фСм/м при  $b = 1,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/В·с  $\rho_{л.и.} = 7$  пКл/м<sup>3</sup>. Как видно из рисунков 1 и 2,  $(\lambda_+ - \lambda_-)$  достигает 4 фСм/м, то есть  $\rho_{л.и.}$  имеет величину порядка десятков пКл/м<sup>3</sup>. (Аналогичный результат получен в работе [8], где приводятся профили как полярных электропроводностей в слое до 1,5 м, так и их разности.) Плотность же объемного заряда ионов всех подвижностей оценивается, как мы видим на рисунках 1, 2, сотнями пКл/м<sup>3</sup>.

На основании анализа результатов более ранних исследований и известных представлений можно предложить следующий ход рассуждений относительно механизмов формирования объемного заряда вблизи земли. На границе атмосфера-земля вертикальный электрический ток проводимости, обусловленный глобальным атмосферно-электрическим полем и ионизацией атмосферы, претерпевает разрыв из-за различной природы проводимости граничащих сред. Вследствие этого разрыва возникает электродный эффект, который проявляется в дефиците легких ионов одной из полярностей вблизи земной поверхности, что приводит к образованию в атмосфере объемного заряда. В свою очередь, последний способствует пространственному изменению напряженности поля  $\vec{E}$  в соответствии с уравнением Пуассона. Как известно, потенциал ионосферы положителен по отношению к потенциалу земной поверхности. При этом ток положительных ионов направлен вниз, к земле, а ток отрицательных ионов от земли. В этом случае в приземном слое образуется объемный заряд положительного знака. Плотность заряда по мере удаления от земной

поверхности уменьшается и на некоторой высоте обращается в ноль. Этот уровень определяет толщину электродного слоя атмосферы.

Причиной накопления объёмного заряда легких ионов в атмосфере может также служить прохождение тока проводимости через слой с вертикальным градиентом электропроводности. Согласно Чалмерсу [9], для квазистатических условий справедливо:  $\rho_{\Delta\lambda} = \varepsilon_0 \frac{i}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{dh}$ , где  $\lambda$  - удельная электропроводность атмосферы,  $i$  - плотность вертикального тока проводимости. Как показывают исследования [10-13], вблизи земной поверхности часто наблюдаются вертикальные градиенты электропроводности, вызванные уменьшением с высотой интенсивности ионообразования, обусловленной естественной радиоактивностью. Таким образом, при прохождении тока проводимости вблизи земли образование объёмного заряда легких ионов осуществляется как в результате электродного эффекта ( $\pm \rho_{\text{ээ}}$ ), так и вследствие градиента электропроводности атмосферы ( $\pm \rho_{\Delta\lambda}$ ), обусловленного уменьшением интенсивности ионообразования с высотой. Итоговое значение плотности объёмного заряда легких ионов на каждом горизонте электродного слоя:

$$\rho_{\text{л.и.}} = \pm \rho_{\text{ээ}} \pm \rho_{\Delta\lambda}$$

определится знаком и величиной каждого слагаемого, которые будут зависеть от состояния слоя [10].

Время жизни легких ионов невелико, в то время, как заряженный аэрозоль может долго находиться в атмосфере. По-видимому, в процессах формирования объёмного заряда в приземном слое участвуют легкие ионы, так как эти процессы связаны с током проводимости, а уже готовый заряд, оседая на частицах аэрозоля, может длительно присутствовать в электродном слое, определяя его электрическую структуру. Аэрозоль в таком случае играет роль аккумулятора объёмного заряда, способного перенимать его у легких ионов и накапливать, обуславливая наблюдаемые значения плотности заряда ионов всех групп. В итоге электрическое поле в приземном слое атмосферы претерпевает сложные изменения по вертикали из-за совокупного действия электродного эффекта и



наличия слоев объемного заряда иного происхождения. При этом из-за присутствия в атмосфере заряженных слоев может меняться по высоте не только численное значение напряженности поля, но и ее направление.

В исследовании структуры электродного слоя Law [14] одним из первых обнаружил появление отрицательного объемного заряда вблизи земли в ночные часы. Law уверенно говорит о меняющихся по высоте в нижнем метровом слое концентрациях полярных ионов для большинства условий в Кембридже, связывая это с увеличением концентрации радиоактивных эманаций вблизи земли. Им обнаружен отрицательный объемный заряд на высоте 50 см ночью, тогда как днем заряд на этой высоте положителен. Различия, прослеживающиеся как по экспериментальным, так и по расчетным данным для ночного и дневного электродного слоя, автор [14] связал со значительным изменением турбулентной диффузии в течение суток.

Crozier [15] получил детальное распределение характеристик поля и плотности объемного заряда в электродном слое. Измерялся потенциал атмосферы в нижнем 3-метровом слое на 4 высотах пассивной проволочной антенной и плотность объемного заряда методом Оболенского на уровне земли и на высоте 1 м. Crozier обнаружил, что тихими ночами (скорость ветра на высоте 4 м ниже 0,5 м/с) в профиле градиента потенциала имеет место минимум на высоте 15-40 см. Ниже этого минимума присутствует положительный объемный заряд с плотностью 160-320 пКл/м<sup>3</sup> на уровне земли. Над минимумом градиента потенциала располагается отрицательный объемный заряд до высоты, по крайней мере, 3 м с плотностью порядка сотен  $e/cm^3$  ( $100 e/cm^3=16$  пКл/м<sup>3</sup>). Нижний положительный объемный заряд Crozier объяснил электродным эффектом, а отрицательный заряд справедливо связал со значительным перепадом по высоте скорости ионообразования вследствие заметной диффузии радиоактивных газов из почвы.

## Выводы

Значительная эксхалация радона и накопление его у земли при устойчивой стратификации атмосферы существенно сказывается на вертикальном распределении электропроводности в электродном слое, повышая ионизацию вблизи земной поверхности. Это, в свою очередь, влияет на процессы формирования приземного объемного заряда, а значит и на электрическое поле, и на обмен зарядами между землей и атмосферой. Из-за образования в электродном слое трехслойной структуры объемного заряда в условиях устойчивой стратификации формируется Z-образный профиль градиента потенциала вблизи земли, вертикальный масштаб которого зависит от устойчивости слоя.

## Литература

1. *Hoppel W.A.* Electrode effect: comparison of theory and measurement. // In: Planetary Electrodynamics, 2.S.C.Coroniti and J.Hughes; editors: Gordon and Breach Science Publishers, New-York. 1969. P.167-181.
2. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог, 1998.
3. *Морозов В.Н.* Атмосферное электричество. // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат. 1991. С.394-408.
4. *Имянитов И.М.* Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М., 1957.
5. *Петрова Г.Г.* Вертикальные профили градиента электрического потенциала в различно стратифицированном приземном слое атмосферы // (В настоящем сборнике)
6. *Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В., Петров Н.А.* Измерительный комплекс для исследования электричества приземного слоя атмосферы // (В настоящем сборнике)
7. *Anisimov, S.V. and E.M.Dmitriev.* Aeroelectrical altitude profile in limit of regular convection // J.Atm.Electr. 1999. 19 (1). P.25–33,

8. *Israelsson S., Knudsen E. and Anisimov S.V.* Vertical profiles of electrical conductivity in the lowermost part of the turbulent boundary layer over flat ground. // *J. of Atm. and Terr. Phys.* 1994. V.56, №12. P.1545-1550.
9. *Чалмерс Дж.А.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1974.
10. *Петров А.И., Петрова Г.Г.* Вертикальные профили полярных электропроводностей и плотности объемного заряда в электродном слое атмосферы. // *Труды ГГО.* 1988. Вып.514. С.12-16.
11. *Petrov A.I., Petrova G.G., and Panchishkina I.N.* On factors determining the variations of the electric characteristics of a surface layer. // *Proc.11th Int. Conf. Atm. Electricity.* Alabama, USA. 1999. P. 547-550.
12. *Petrov A.I., Petrova G.G., and Panchishkina I.N.* Measurements of polar conductivities in the surface layer of the atmosphere.// *Proc.10<sup>th</sup> Int. Conf. Atm. Electricity.* Osaka, Japan. 1996. P.188-191.
13. *Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Клово А.Г.* Электропроводность воздуха и концентрация радона в приземном слое. // *Труды V Российской конференции по атмосферному электричеству.* Владимир, ВлГУ. 2003. Т.1. С.124-127.
14. *Law J.* The ionization of the atmosphere near the ground in fair weather. // *Quart.J.R.Met.Soc.* 1963. 89. P.107-121.
15. *Crozier W.D.* Atmospheric electrical profiles below three meters. // *J.Geoph.Res.* 1965. 70. P.2785-2792.

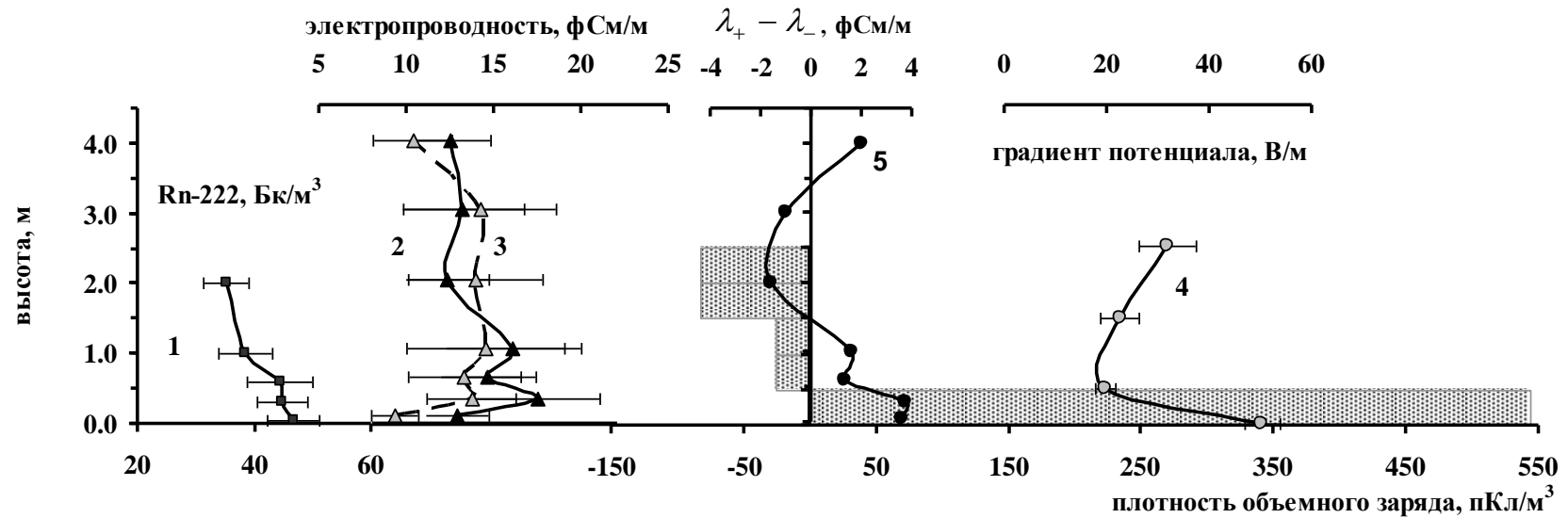


Рисунок 1. Распределение по высоте электрических характеристик приземного слоя в условиях устойчивой стратификации температуры: концентрации радона-222 (1), положительной (2) и отрицательной (3) удельных электропроводностей атмосферы, их разности  $\lambda_+ - \lambda_-$  (5), градиента электрического потенциала атмосферы (4) и плотности объемного заряда ионов всех групп (серая линейчатая диаграмма), - по результатам измерений в Михайловке в августе 1997 года. Выборка получена для 27 часов измерений при параметре стратификации  $m < 0.7$  и соответствует условиям «Устойчивая стратификация-I» для данного пункта наблюдений в табл. 1 [5].

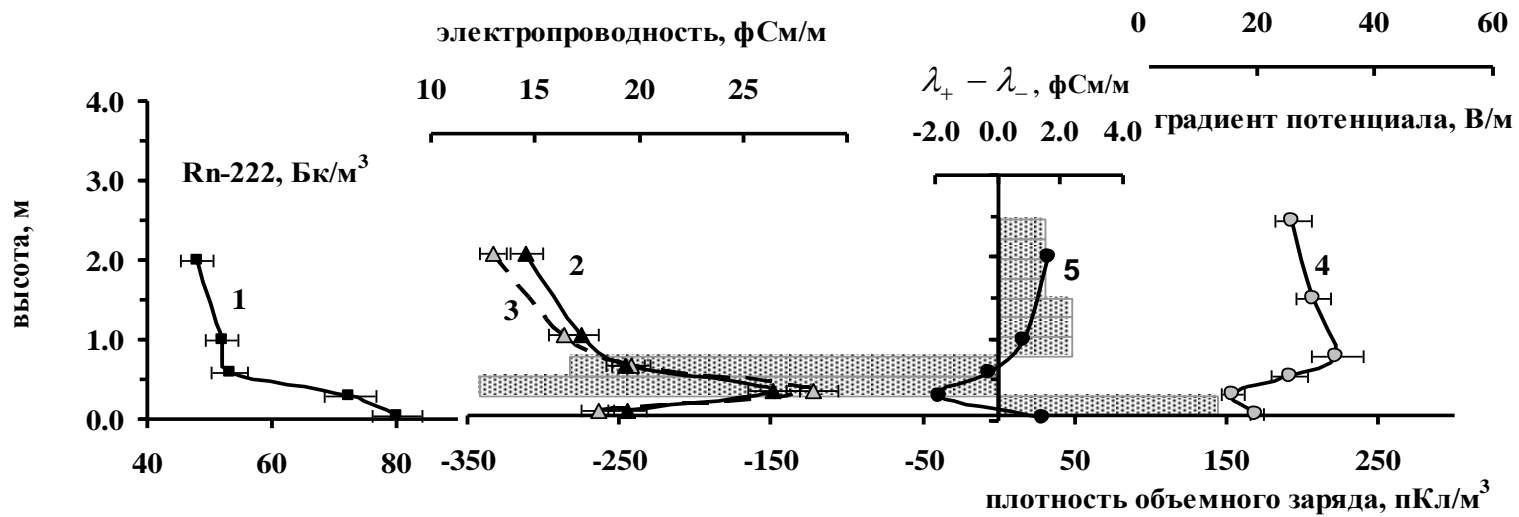


Рисунок 2. Распределение по высоте электрических характеристик приземного слоя в условиях устойчивой стратификации температуры: концентрация радона-222 (1), положительная (2) и отрицательная (3) удельные электропроводности атмосферы, их разность  $\lambda_+ - \lambda_-$  (5), градиент электрического потенциала атмосферы (4) и плотность объемного заряда ионов всех групп (серая линейчатая диаграмма), - по результатам измерений в Талловерове в августе 2008. Выборка получена для 67 часов измерений при параметре стратификации  $m < 0.5$  и соответствует условиям «Устойчивая стратификация» в таблице для данного пункта наблюдений [5].