

УДК 551.594

ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ АЭРОЗОЛЕЙ В ФОРМИРОВАНИИ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ *

**Г. Г. Петрова¹, И. Н. Панчишкина¹, А. И. Петров¹
О. Г. Чхетиани², Е. В. Егоров¹, В. А. Болдырева¹**

¹ Южный федеральный университет, 344000, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5

² Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, 119017, Москва, пер. Пыжёвский, 3

E-mail: georgpu@rambler.ru, ochkheti@rssi.ru

В работе обсуждаются результаты атмосферно-электрических измерений лаборатории геофизических исследований Физического факультета Южного федерального университета за период с 2012 до 2017 года. Многолетние исследования позволяют типизировать наблюдаемые атмосферно-электрические профили. Вид вертикальных профилей электрического поля по результатам измерений градиента потенциала в приземном слое свидетельствует о присутствии слоёв отрицательного объёмного заряда в нижней атмосфере. Возможная интерпретация их появления основана на том, что объёмные заряды лёгких ионов вблизи земли адсорбируются аэрозолями. Аккумуляция заряда на аэрозолях способствует длительному присутствию в приземной атмосфере заряженных слоёв, влияющих на пространственное распределение электрического поля и его величину. Измерение концентрации аэрозолей субмикронного и микронного диапазонов в экспедициях дополнило измерительный комплекс после 2012 года. Представлены результаты регрессионного и дисперсионного анализа связи градиента потенциала с содержанием аэрозолей в приземной атмосфере. Рассматривается роль влажности в формировании аэрозоля и возможное косвенное влияние этого фактора на вариации атмосферного электрического поля.

Ключевые слова: приземный слой, электропроводность атмосферы, атмосферно-электрическое поле, радон-222, аэрозоли, глобальная электрическая цепь, турбулентность, полевой эксперимент.

© Петрова Г. Г. и др., 2018

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), гранты 16-05-00930_а и 17-05-41121 РГО_а.

В настоящее время актуальным представляется дальнейшее совершенствование физико-математической модели электрических процессов вблизи земной поверхности, которая позволила бы адекватно описывать электрическую структуру приземного слоя в различных условиях, процессы её трансформации, обмен зарядами атмосферы с земной поверхностью. Для решения этой задачи важно установить типы электрической структуры приземного слоя, наблюдаемые при различных сочетаниях значимых для атмосферного электричества факторов, и произвести сравнительную оценку влияния этих факторов на электрические параметры нижней атмосферы, получить для них эмпирические зависимости. К таким факторам относятся, как известно, прежде всего, турбулентное перемешивание, радиоактивность почвы и атмосферы (в первую очередь, объёмная активность радона — ^{222}Rn) и содержание аэрозолей.

Как известно, в рамках представлений классического электродного эффекта, вблизи земной поверхности формируется положительный объёмный заряд, вследствие чего в соответствии с уравнением Пуассона напряженность поля увеличивается по мере приближения к земной поверхности. Уменьшение с высотой интенсивности ионообразования, обусловленной радиоактивностью земной поверхности и её эманированием, наблюдалось рядом исследователей ещё в 60-е годы прошлого века (Crozier и Biles [1], Law [2]). Учёт его для нетурбулентного электродного эффекта позволил Norpel [3] получить расчетный профиль поля, который свидетельствовал о формировании отрицательного объёмного заряда при значительных градиентах интенсивности ионизации приземной атмосферы. Полученные данные хорошо согласовывались с результатами измерений профиля поля Crozier [4] при слабом перемешивании атмосферы в безветренные ночи, способствующем накоплению радиоактивных эманаций вблизи земли и возникновению, как следствие, отрицательного градиента электропроводности приземной атмосферы.

На основании уравнения Пуассона для плотности объёмного заряда лёгких ионов, образующегося в результате действия электродного эффекта земной поверхности в условиях меняющейся с высотой электропроводности, можно записать [5,6]:

$$\rho_{\text{л.и.}} = \frac{\epsilon_0}{\lambda} \nabla \cdot \vec{j}_\lambda - \frac{\epsilon_0}{\lambda} \vec{E} \cdot \nabla \lambda \quad (1)$$

В проекции на вертикальную ось:

$$\rho_{\text{л.и.}} = \frac{\epsilon_0}{\lambda} \frac{\partial j_z}{\partial z} - \frac{\epsilon_0}{\lambda} E_z \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (2)$$

Здесь λ – удельная электропроводность атмосферы, \vec{E} – вектор напряжённости электрического поля, \vec{j}_λ – плотность тока проводимости, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Таким образом, в соответствии с уравнением (2) плотность объёмного заряда лёгких ионов на каждом уровне будет зависеть от соотношения продуктивности электродного эффекта, формирующего положительный объёмный заряд (первый член), и процесса накопления объёмного заряда, обусловленного прохождением через атмосферу тока проводимости в условиях меняющейся с высотой удельной электропроводности (второй член уравнения). В случае ненарушенного поля в горизонтально-однородной атмосфере, когда вектор напряжённости направлен вниз, его проекция на вертикальную ось, направленную вверх, отрицательна: $E_z < 0$.

В случае уменьшения электропроводности с высотой проекция её градиента на ось, направленную вверх, также будет отрицательна, и минус перед вторым членом уравнения (2) сохранится. Это свидетельствует об отрицательном знаке формирующегося в этих условиях в соответствующем слое объёмного заряда.

Наличие аэрозолей в атмосфере способствует тому, что заряд лёгких ионов, передислоцировавшись на аэрозольные частицы вследствие адсорбции лёгких ионов аэрозолями, может длительно оставаться в приземной атмосфере: время жизни тяжелых ионов исчисляется часами в отличие от нескольких минут для лёгких ионов. Каким окажется в итоге заряд тяжелых ионов по знаку и плотности, будет определяться полярными концентрациями лёгких ионов и коэффициентами присоединения их к аэрозолям [7].

Известные результаты самолётных измерений (Имянитов, Шифрин [8]) вертикальных профилей электрического поля обнаружили регулярно наблюдаемые в разных регионах профили (группа III), которые свидетельствуют об отрицательном объёмном заряде в нижних сотнях метров. Избирательная адсорбция аэрозолями разных по знаку зарядов ионов может приводить к появлению неоднородных электрических полей, являясь важнейшим механизмом образования заряженных слоёв в приземной атмосфере [9]. На формирование заряженных структур в нижних десятках и сотнях метров атмосферы указывают авторы ряда работ, в частности, [10]. Наблюдения показывают, что источником отрицательно заряженного аэрозоля в нижней атмосфере, снижающего поле и даже вызывающего перемену его направления, служит подъём пыли с иссушенной зноем земной поверхности. Причиной могут быть сильные ветровые потоки, срывающие поземку, движение машин по грунтовой дороге или работающая в поле техника [11,12]. Наблюдения за градиентом электрического потенциала вблизи земной поверхности во время извержения вулкана при прохождении над пунктом наблюдений облаков дыма и пепла позволили обнаружить большие отрицательные значения при выпадении пепла в зоне <50 км и положительные в зоне >100 км [13].

В работе обсуждаются новые результаты атмосферно-электрических измерений лаборатории геофизических исследований Физического факультета Южного федерального университета в период совместных экспедиций с Институтом физики атмосферы им.А.М.Обухова (ИФА РАН) на Цимлянкой научной станции ИФА в летние месяцы. Станция находится в донских степях, для которых характерно жаркое засушливое лето. Площадка наблюдений расположена на обширном ровном поле со степной растительностью и покрыта низко скошенным травостоем.

Напряжённость электрического поля атмосферы на уровне земли регистрировалась флюксметрами «Поле-2» (ГГО им.А.И. Воейкова). Для регистрации сигнала этих датчиков использовалась плата АЦП L761 фирмы L-Card. С помощью радиоактивных коллекторов на высотах 1, 2, 3 и 4 метра регистрировались электрические потенциалы, что позволяло рассчитывать средние для четырех слоев значения градиента потенциала через разность потенциалов и расстояние между коллекторами. Для расчёта градиентов потенциала использовались осреднённые за полчаса значения потенциалов на разных высотах.

Наряду с регистрацией атмосферно-электрических характеристик контролировалось содержание ^{222}Rn в атмосферном воздухе и почвенном газе. Концентрации ^{222}Rn измерялась радономером «AlphaGUARD PQ2000 PRO» фирмы «Genitron Instruments», работающий по методу ионизационной камеры с использованием уникальных фильтров. Концентрация аэрозолей микронного и

субмикронного диапазонов при натуральных наблюдениях в измерительном комплексе в 2017 году измерялась лазерным аэрозольным спектрометром ЛАС-П (НИФХИ им. Л.Я.Карпова) в диапазонах размеров 0.1–0.2; 0.2–0.3; 0.3–0.4; 0.4–0.5; 0.5–0.7; >0.7 мкм. В более ранние периоды использовался счётчик аэрозольных частиц АЗ-10. Прибор предназначен для измерения счетной концентрации аэрозольных частиц с диаметрами от 0.3 до 10 мкм в шести диапазонах: 0.3–0.4; 0.4–0.5; 0.5–1; 1–2; 2–5; более 5. Наряду с этим ежедневно проводились градиентные измерения температуры воздуха (и его влажности) аспирационными психрометрами Ассмана и скорости ветра чашечными анемометрами. Эти тонкие измерения термодинамических параметров позволили вычислять коэффициент турбулентности по методу Л.Р.Орленко. Измерения велись круглосуточно в течение примерно 10 дней. Для анализа использовались, в основном, среднечасовые осреднения.

Обсуждаемый далее материал 2017 года получен в условиях неустойчивой и безразличной стратификации при развитой турбулентности. Для профилей поля в этих условиях, как показывают результаты измерений в разные периоды в различных пунктах наблюдений [12], характерен отрицательный объёмный заряд непосредственно вблизи земной поверхности, на что указывает рост поля с высотой в нижней части профиля поля.

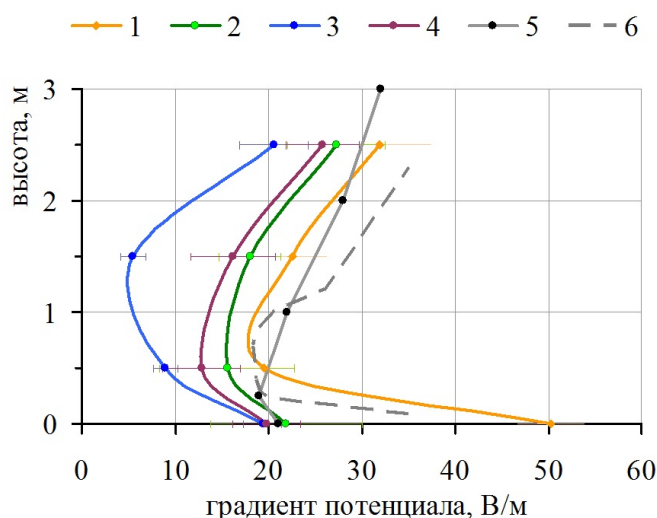


Рис. 1. Вертикальные профили градиента электрического потенциала в нижнем слое приземной атмосферы при слабом турбулентном перемешивании в условиях устойчивой стратификации в степной зоне юга России (Ростовская область): с 1 по 4 – Кашарский район (1 – Михайловка 1997, 2 – Платов 2003, 3 – Первомайское 1992, 4 – Талловеров 2008); 5 – экспериментальный профиль Crozier [4] для ночных часов без ветра; 6 – расчётный профиль Норрел [3] для нетурбулентного электродного эффекта

На рис. 1 и 2 представлены результаты, ранее полученные в Ростовской области при устойчивой и неустойчивой стратификации, а также для сравнения профили Crozier [4] для безветренных ночей (рис.1) и дневных ветреных условий (рис.2) и расчётные кривые Норрел [3] для нетурбулентного и турбулентного электродного эффекта (рис.1 и 2 соответственно). Аналогичный экспериментальным профилям для неустойчивой стратификации (кривые 1–4 рис.2) профиль поля получен Куповых [14] расчетным путем для турбулентного электродного эффекта

при аэрозольном загрязнении. Планками на всех рисунках показаны значения стандартной погрешности.

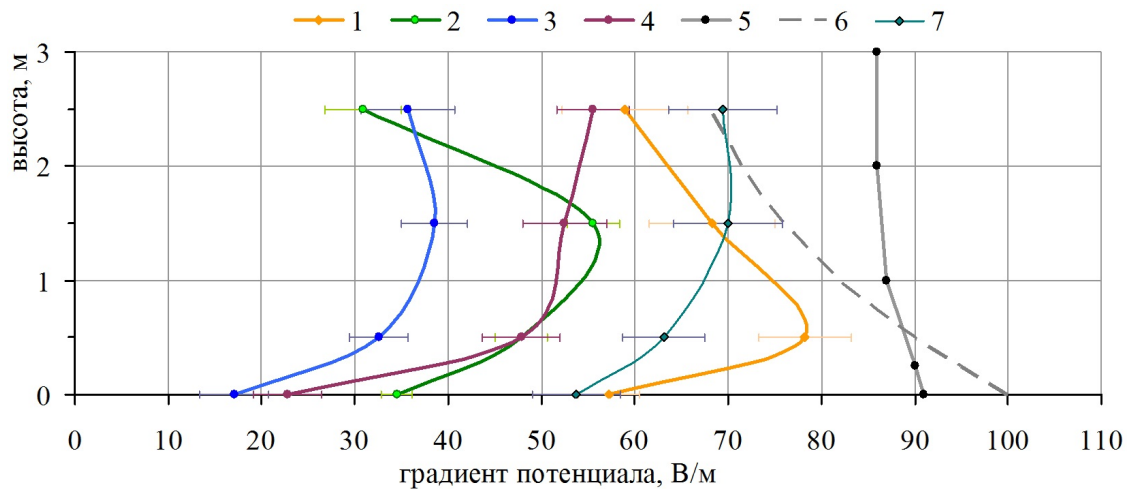


Рис. 2. Вертикальные профили градиента электрического потенциала в нижнем слое приземной атмосферы при интенсивном турбулентном перемешивании в условиях неустойчивой стратификации в степной зоне юга России (Ростовская область): с 1 по 4 – Кашарский район (1 – Михайловка 1997, 2 – Платов 2003, 3-Первомайское 1992, 4 – Талловеров 2008); 7 – Цимлянск (научная станция ИФА им.А.М.Обухова РАН, 2014; 5 – экспериментальный профиль Crozier [4] для дневных ветреных часов; 6 – расчётный профиль Норреп [3] для турбулентного электродного эффекта

На основании материалов экспедиции 2017 года обнаружена ранее замеченная тенденция [15] снижения значений поля вблизи земной поверхности при росте общей концентрации аэрозольных частиц с диаметром >0.1 мкм.

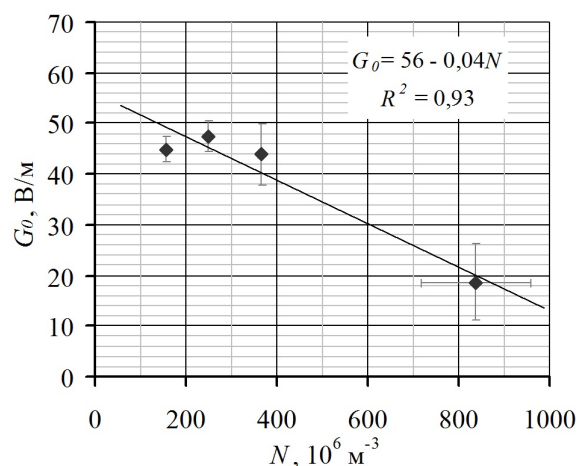


Рис. 3. Эмпирический ряд регрессии градиента потенциала на уровне земли по значениям общей концентрации аэрозольных частиц с диаметром >0.1 мкм ($h=1$ м) в Цимлянске (август, 2017)

На рис. 3 представлен эмпирический ряд регрессии, отражающий эту тенденцию. В соответствии с уравнением регрессии при росте общей концентрации аэрозолей

на порядок: от 100 до 1000 млн. частиц в м^3 , – значения градиента электрического потенциала снижаются на 70%. В процессе дальнейшего более пристального анализа рядов динамики исследуемых величин было замечено, что поле по-разному реагирует на изменения концентрации аэрозолей разного размерного диапазона. При увеличении содержания мелких частиц поле снижается, что косвенно свидетельствует о накоплении в атмосфере отрицательного объёмного заряда, то есть об отрицательных зарядах аэрозольных частиц.

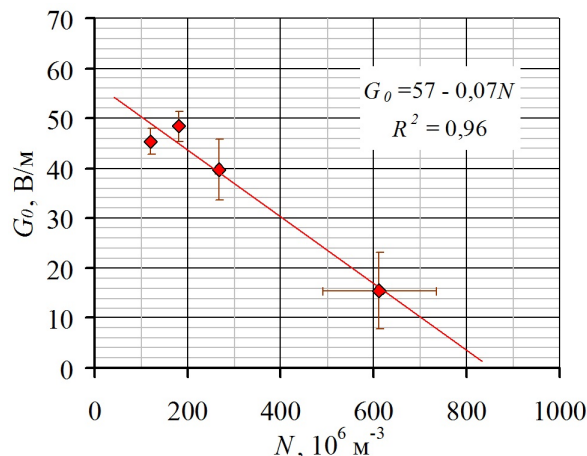


Рис. 4. Эмпирический ряд регрессии градиента потенциала на уровне земли по значениям концентрации аэрозольных частиц с диаметром от 0.1 до 0.2 мкм ($h=1\text{м}$) в Цимлянске (август, 2017)

Действительно, на рис.4 можно видеть существенное снижение значений поля с ростом концентрации аэрозолей диаметра от 0.1 до 0.2 мкм. Аналогичная предыдущей оценка в соответствии с уравнением регрессии при росте концентрации аэрозолей диаметра от 0.1 до 0.2 мкм на порядок: от 100 до 1000 млн. частиц в м^3 , – значения градиента электрического потенциала снижаются на 125%, то есть более, чем вдвое.

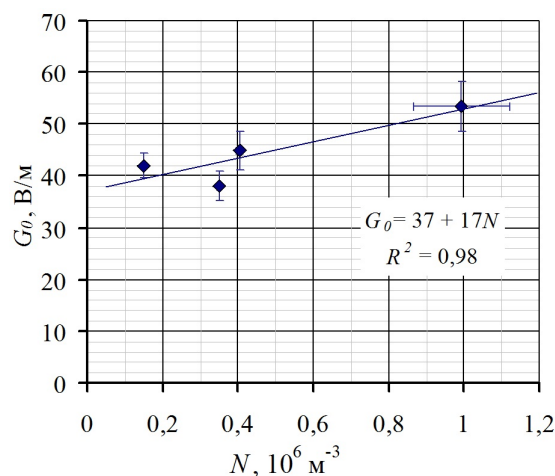


Рис. 5. Эмпирический ряд регрессии градиента потенциала на уровне земли по значениям концентрации аэрозольных частиц с диаметром от 0.5 до 0.7 мкм ($h=1\text{ м}$) в Цимлянске (август, 2017)

В то же время рост содержания в атмосфере более крупных частиц с диаметром от 0.5 до 0.7 мкм вызывает увеличение значений поля, что свидетельствует о положительном объёмном заряде (рис.5). При росте концентрации аэрозолей с диаметром от 0.5 до 0.7 мкм на порядок: от 0.1 до 1 млн.частиц в м³, – значения градиента электрического потенциала увеличиваются на 40 %, как можно видеть, анализируя уравнение регрессии на рис.5. Наблюдаемое по эмпирическому ряду регрессии снижение поля с ростом общей концентрации частиц всех размеров объясняется тем, что число мелких частиц, заряженных отрицательно, на порядок превосходит число более крупных положительно заряженных частиц аэрозоля, и отрицательный заряд аэрозоля превалирует.

Наличие причинно-следственной связи между исследуемыми величинами подтверждено проведённым для всех выборок дисперсионным анализом. Как видно из таблицы 1, фактические значения критерия Фишера превысили стандартные его значения для соответствующего объёма выборки (151 часовая серия) для всех исследованных размерных диапазонов.

Таблица 1

Результаты дисперсионного анализа причинно-следственных отношений между концентрацией аэрозолей разного размера (ЛАС-П, h=1м) и градиентом электрического потенциала: фактические F_ϕ и стандартные F_{st} значения критерия Фишера

	Диаметр аэрозолей, мкм	F_ϕ	F_{st}	Метод измерения градиента потенциала
1	0.4-0.5	3.0	2.7	флюксметр "Поле-2" (ГГО им. А.И.Воейкова)
2	0.5-0.7	4.3	2.7	
3	0.1-0.2	4.9	2.7	
4	>0.1	4.5	2.7	
5	>0.1	3.9	2.7	радиоактивный коллектор

Интерес представляет исследование процессов, способствующих изменению содержания аэрозольных частиц разного размера в приземной атмосфере. Новые данные подтверждают полученные ранее результаты, указывающие на рост концентрации атмосферных аэрозолей с увеличением относительной влажности [15].

Ряды регрессии, представленные на рис.6, получены как с помощью аэрозольного счетчика АЗ-10 (2012-2015), так и с помощью лазерного аэрозольного счетчика ЛАС-П в 2017 году для частиц с диаметром >0.3 мкм.

Вынос аэрозоля в атмосферу в периоды летних измерений в Цимлянске нередко был связан с задымлением, вызванным степными пожарами. Концентрация аэрозоля в такие часы увеличивается в разы и даже на порядок по сравнению с ненарушенными условиями. На рис.7 показаны вертикальные профили градиента электрического потенциала, осреднённые для ряда условий, а в таблице 2 – средние значения некоторых характеристик приземной атмосферы для этих условий. Значения параметра стратификации для всех этих выборок соответствуют неустойчивой или безразличной стратификации, скорость ветра и коэффициент турбулентности свидетельствуют о развитом турбулентном перемешивании нижних слоёв. Содержание ²²²Rn низкое, типичное для этих условий перемешивания.

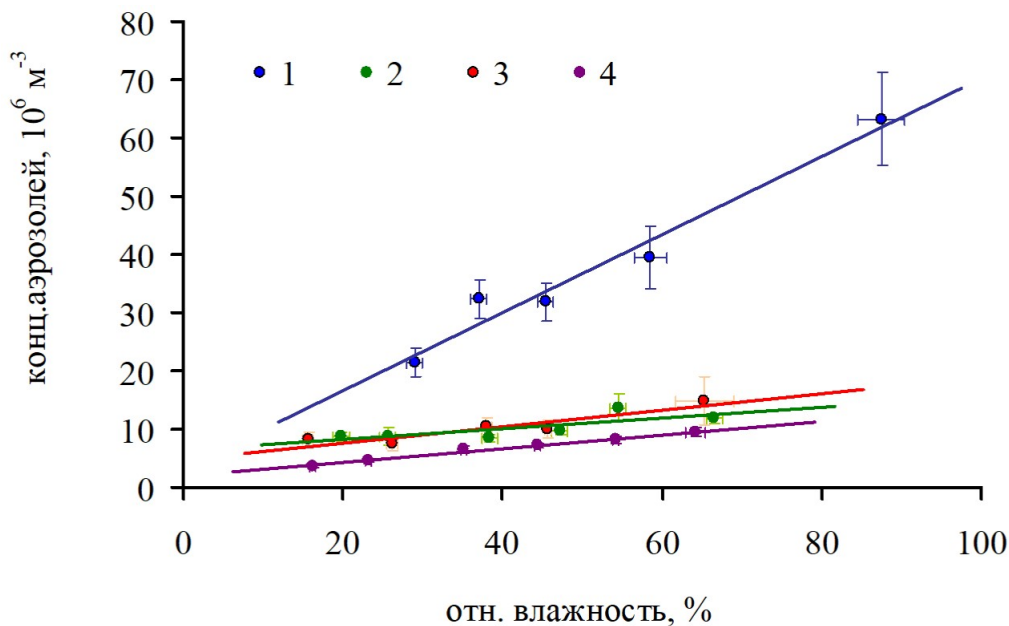


Рис. 6. Зависимость концентрации N аэрозольных частиц с диаметром $d > 0.3$ мкм от относительной влажности воздуха f по результатам измерений в пунктах Ростовской области: 1 – Федоровка Кашарского района 2012 ($N = 0.67f + 3$); 2,3,4 – Цимлянск соответственно: 2014 ($N = 0.09f + 6$); 2015 ($N = 0.14f + 5$); 2017 ($N = 0.12f + 2$)

Таблица 2

Характеристики атмосферы, осреднённые для групп вертикальных профилей, полученных в Цимлянске при различном содержании аэрозолей

Измеряемая величина	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C/м}$	$U, \text{м/с}$	$K_T, \text{м}^2/\text{с}$	$f, \%$	$OA_{Rn}, \text{Бк/м}^3$	$N > 0,1\mu\text{м}, 10^6 \text{ м}^{-3}$	$N > 0,3\mu\text{м}, 10^6 \text{ м}^{-3}$
Высота	2 м	0.5-2 м	2 м	0-2 м	2 м	0.05 м	1 м	1 м
1) Цимлянск - 2017 (65 часов) $N < 200 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ (ЛАС-П)								
Сред.знач.	29.5	0.2	4.2	0.16	30	13	159	4
Станд.откл.	4.6	0.3	1.5	0.07	13	7	33	1
2) Цимлянск - 2017 (24 часа) $200 < N < 500 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ (ЛАС-П)								
Сред.знач.	26.5	0.1	4.6	0.15	45	20	353	11
Станд.откл.	5.3	0.5	2.2	0.09	14	14	56	4
3) Цимлянск - 2017 (6 часов) $N > 500 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ (ЛАС-П)								
Сред.знач.	31.1	-0.4	6.5	0.25	27	12	1036	33
Станд.откл.	2.1	0.2	1.0	0.02	6	6	267	17
4) Цимлянск - 2014 (25 часов), неустойчивая стратификация (А3-10)								
Сред.знач.	31.6	-0.8	2.5	0.10	34	16	-	9
Станд.откл.	5.0	0.3	0.5	0.02	17	8	-	3
5) Цимлянск - 2017 (151 час), все замеры за период наблюдений (ЛАС-П)								
Сред.знач.	27.9	0.1	4.4	0.16	36	15	263	7
Станд.откл.	4.9	0.5	1.7	0.08	14	9	187	8

Первые три строки табл. 2 представляют выборки с различным содержанием аэрозолей в атмосфере, полученные по результатам измерений 2017 года в Цимлянске. Соответствующие профили градиента потенциала показаны на рис.7 (кривые 1, 2, 3).

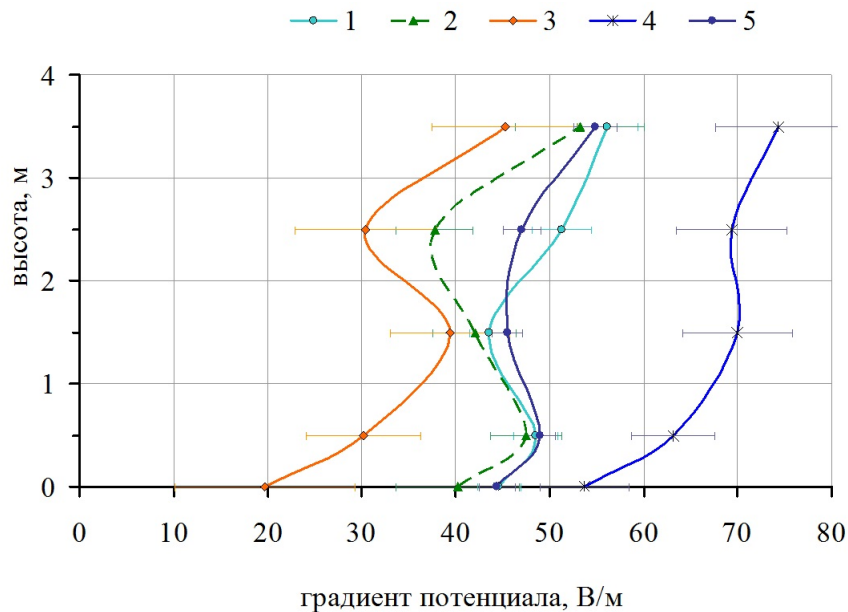


Рис. 7. Вертикальные профили градиента потенциала атмосферы, осреднённые для групп замеров при различной концентрации аэрозолей в Цимлянске (см. табл.2): 1 – $N < 200 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ (2017, 65 профилей); 2 – $200 < N < 500 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ (2017, 24 профиля); 3 – $N > 500 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ (2017, 6 профилей); 4 – неустойчивая стратификация (2014, 25 профилей); 5 – все замеры за период наблюдений (2017, 151 профиль)

Отметим, что третья группа профилей получена во время степного пожара, когда содержание аэрозолей в атмосфере увеличилось на порядок. Кроме того и в таблице 2, и на рис.7 для сравнения показаны данные, касающиеся всех замеров периода 2017 года (строка 5 и кривая 5), а также результаты измерений в Цимлянске в августе 2014 года при неустойчивой стратификации (строка 4 и кривая 4).

Анализ графиков рис.7 позволяет заметить, что все профили градиента потенциала, полученные в Цимлянске, в целом, наклонены вправо. Уменьшение поля по мере приближения к земной поверхности свидетельствует о том, что в исследуемом 4-метровом слое превалирует отрицательный объёмный заряд. В то же время, каждый из представленных профилей имеет участок, на котором наблюдается слой положительного заряда. Это, очевидно, результат проявления электродного эффекта.

Оценка плотности объёмного заряда на основании уравнения Пуассона дана в табл. 3. При анализе первых трех строк таблицы (Цимлянск 2017, ЛАС-П, $d > 0.1 \mu\text{км}$) обращает на себя внимание тот факт, что при увеличении концентрации аэрозолей увеличивается плотность отрицательного объёмного заряда в целом по нижнему 4-метровому слою (первый столбец). Уравнение регрессии плотности объёмного заряда ρ (пКл/м³) по концентрации аэрозолей N (10^6 м^{-3}): $\rho = -72 - 0.15N$ – с высокой достоверностью аппроксимации $R^2=0.99$.

Таблица 3

Оценка плотности объёмного заряда, выполненная на основании уравнения Пуассона по результатам измерений профилей градиента потенциала в Цимлянске в нижнем 4-метровом слое атмосферы, в соответствии с рис. 7

№ проф.	N, 10 ⁶ м ⁻³ d > 0,1 мкм	Плотность объёмного заряда, пКл/м ³				
		0-4 м	0-0.5 м	0.5-1.5 м	1.5-2.5 м	2.5-3.5 м
1	159	-102	-70	44	-68	-43
2	353	-115	-129	48	38	-137
3	1036	-226	-184	-82	80	-131
4	-	-182	-166	-61	5	-44
5	263	-92	-81	31	-14	-69

Таким образом, на основании результатов экспедиционных исследований обнаруживается влияние зарядов атмосферных аэрозолей на величину и вертикальное распределение атмосферного электрического поля. Аэрозоли с диаметром до 0.3 мкм заряжены, по-видимому, преимущественно отрицательно, о чем косвенно свидетельствует снижение поля при увеличении концентрации аэрозолей этого размерного диапазона. Рост концентрации более крупных частиц (>0.5 мкм) сопровождается по результатам измерений 2017 года ростом поля, что позволяет предположить, что они имеют преимущественно положительные заряды. На основании новых данных подтвердилось линейное увеличение концентрации аэрозолей с ростом относительной влажности. Можно полагать, что фазовые переходы воды, зависящие от температуры, имеют значение для формирования вариаций электрического поля атмосферы.

Список литературы

- [1] Crozier W.D., Biles N., "Measurements of radon 220 (thoron) in the atmosphere below 50 centimeters", *J.Geoph.Res.*, 1966, № 71, 4735-4741.
- [2] Law J., "The ionization of the atmosphere near the ground in fair weather", *Quart.J.R.Met.Soc.*, 1963, № 89, 107-121.
- [3] Hoppel W.A., "Electrode effect: comparison of theory and measurement", *Planetary Electrodynamics*, Gordon and Breach Science Publishers, New-York, 1969, 167-181.
- [4] Crozier W.D., "Atmospheric electrical profiles below three meters", *J.Geoph.Res.*, 1965, № 70, 2785-2792.
- [5] Mareev E.A., "Formation of Charge Layers in the Planetary Atmospheres", *Space Science Reviews*, **137**:1-4 (2008), 373-397.
- [6] Hoppel W.A., Anderson R.V and Willett J.C., "Atmospheric electricity in the planetary boundary layer", *The Earth's Electrical environment, Studies in Geophysics*, National Academy Press, USA, 1986, 149-165.
- [7] Hoppel W.A., Frick G.M., "Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distribution on Aerosols in a Bipolar Ion Environment", *Aerosol Science and Tech.*, **5**:1 (1986), 1-21.
- [8] Имянитов И. М., Шифрин К. С., "Современное состояние исследований атмосферного электричества", *Успехи физических наук*, **LXXVI**:4 (1962), 593-639. [Imyanitov I. M., Shifrin K. S., "Sovremennoe sostoyanie issledovaniy atmosfernogo elektrichestva.", *Uspekhi fizicheskikh nauk*, **LXXVI**:4 (1962), 593-639].
- [9] Смирнов В. В., "Электризация аэрозоля, обводняющегося в биполярно ионизированном воздухе", *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, **46**:3 (2010), 321-331. [Smirnov V. V., "Elektrizatsiya aerolya, obvodnyayushchegosya v bipolyarno ionizirovanom vozdukh", *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, **46**:3 (2010), 321-331].

- [10] Anisimov S.V., Galichenko S.V., Shikhova N.M., "Space charge and aroelectric flows in the exchange layer: An experimental and numerical study", *Atmospheric Research*, 2014, № 135–136, 244–254.
- [11] Israelsson S., "Measurements of surface-air space charges carried by dry wind-driven dust", *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 1994, № 56(12), 1551–1556.
- [12] Petrova G. G., Petrov A. I., Panchishkina I. N., "Formation of the Electric Structure in the Lower Layer of the Atmosphere: Experimental Studies and Generalization of the Data", *Radiophysics and Quantum Electronics*, **56**:11 (2014), 723–738.
- [13] Акбашев Р. Р., Фирстов П. П., Чернева Н. В., "Регистрация потенциала электрического поля атмосферы в центральной части полуострова Камчатка", *Сборник тезисов докладов IX Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений»*, ИКИР ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2018, 44. [Akbashev R. R., Firstov P. P., Cherneva N. V., "Registratsiya potentsiala elektricheskogo polya atmosfery v tsentral'noy chasti poluostrova Kamchatka.", *Sbornik tezisov dokladov IX Mezhdunarodnoy konferentsii «Solnechno-zemnye svyazi i fizika predvestnikov zemletryaseniya»*, IKIR DVO RAN, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2018, 44].
- [14] Куповых Г. В., "Моделирование влияния загрязнений на электрические характеристики приземного слоя атмосферы", *Известия ТРТУ*, 2004, № 5, 175–179. [Kupovykh G. V., "Modelirovanie vliyaniya zagryazneniy na elektricheskie kharakteristiki prizemnogo sloya atmosfery", *Izvestiya TRTU*, 2004, № 5, 175–179].
- [15] Петрова Г.Г., Петров А.И., Панчишкина И.Н., "Экспедиционные исследования электрических процессов в приземной атмосфере с учётом аэрозолей", *Материалы Второй Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь»*, Филигрань, Ярославль, 2015, 38–39. [Petrova G. G., Petrov A. I., Panchishkina I. N., "Ekspeditsionnye issledovaniya elektricheskikh protsessov v prizemnoy atmosfere s uchyotom aerorozoley.", *Materialy Vtoroy Vserossiyskoy konferentsii «Global'naya elektricheskaya tsep'»*, Filigran', Yaroslavl', 2015, 38–39].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Crozier W.D., Biles N. Measurements of radon 220 (thoron) in the atmosphere below 50 centimeters // *J.Geoph.Res.* 1966. no. 71. pp. 4735–4741.
- [2] Law J. The ionization of the atmosphere near the ground in fair weather // *Quart.J.R.Met.Soc.* 1963. no. 89. pp. 107–121.
- [3] Hoppel W. A. Electrode effect: comparison of theory and measurement. *Planetary Electrodynamics*. New-York: Gordon and Breach Science Publishers, 1969. pp. 167–181.
- [4] Crozier W.D. Atmospheric electrical profiles below three meters // *J.Geoph.Res.* 1965. no. 70. pp. 2785-2792.
- [5] Mareev E. A. Formation of Charge Layers in the Planetary Atmospheres // *Space Science Reviews*. 2008. vol. 137. no. 1–4. pp. 373–397.
- [6] Hoppel W. A., Anderson R. V, Willett J. C. Atmospheric electricity in the planetary boundary layer. *The Earth's Electrical environment, Studies in Geophysics*. USA: National Academy Press. 1986. pp. 149–165.
- [7] Hoppel W.A., Frick G.M. Ion-Aerosol Attachment Coefficients and the Steady-State Charge Distribution on Aerosols in a Bipolar Ion Environment // *Aerosol Science and Tech.* 1986. vol. 5. no. 1. pp. 1–21.
- [8] Имянитов И. М., Шифрин К. С. Современное состояние исследований атмосферного электричества // *Успехи физических наук*. 1962. Т. LXXVI. №4. С. 593–639.
- [9] Смирнов В. В. Электризация аэрозоля, обводняющегося в биполярно ионизированном воздухе // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т. 46. №3. С. 321–331.
- [10] Anisimov S. V., Galichenko S. V., Shikhova N. M. Space charge and aroelectric flows in the exchange layer: An experimental and numerical study // *Atmospheric Research*. 2014. no. 135–136. pp. 244–254.

- [11] Israelsson S. Measurements of surface-air space charges carried by dry wind-driven dust // *J. Atmosph. Terr. Phys.* 1994. vol. 56(12). pp. 1551–1556.
- [12] Petrova G. G., Petrov A. I., Panchishkina I. N. Formation of the Electric Structure in the Lower Layer of the Atmosphere: Experimental Studies and Generalization of the Data // *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2014. vol. 56. no. 11. pp. 723–738.
- [13] Акбашев Р. Р., Фирстов П. П., Чернева Н. В. Регистрация потенциала электрического поля атмосферы в центральной части полуострова Камчатка // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2018. 44 с.
- [14] Куповых Г. В. Моделирование влияния загрязнений на электрические характеристики приземного слоя атмосферы // *Известия ТРТУ.* 2004. №5. С. 175–179.
- [15] Петрова Г. Г., Петров А. И., Панчишкина И. Н. Экспедиционные исследования электрических процессов в приземной атмосфере с учётом аэрозолей // *Материалы Второй Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь».* Ярославль: Филлигрань, 2015. С. 38–39.

Для цитирования: Петрова Г. Г., Панчишкина И. Н., Петров А. И., Чхетиани О. Г., Егоров Е. В., Болдырева В. А. Исследование роли аэрозолей в формировании вариаций электрического поля в приземной атмосфере // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2018. № 5(25). С. 42-54. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-42-54

For citation: Petrova G. G., Panchishkina I. N., Petrov A. I., Chkhetiani O. G., Boldyreva V. A. The studies on the role of aerosols in the electric field variations formation in the surface atmosphere, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2018, **25**: 5, 42-54. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-42-54

Поступила в редакцию / Original article submitted: 09.12.2018

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-42-54

MSC 86A10

THE STUDIES ON THE ROLE OF AEROSOLS IN THE ELECTRIC FIELD VARIATIONS FORMATION IN THE SURFACE ATMOSPHERE ¹

**G. G. Petrova¹, I. N. Panchishkina¹, A. I. Petrov¹,
O. G. Chkhetiani², E. V. Egorov¹, V. A. Boldyreva¹**

¹ Southern Federal University, 344000, Rostov-on-Don, Zorge st., 5, Russia

² A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Pyzhyovskiy pereulok, 3, Russia

E-mail: georgpu@rambler.ru, ochkheti@rssi.ru

The atmospheric-electrical measurements results obtained from 2012 to 2017 at the Laboratory of Geophysical Research of the Department of Physics of the Southern Federal University are discussed. Long-term studies allow us to typify the observed atmospheric electrical profiles. According to measurements of the potential gradient in the surface layer, the form of electric field vertical profiles indicates the presence of negative space charge layers in the lower atmosphere. A possible interpretation of their appearance is based on the fact that the volumetric charges of light ions near the earth are adsorbed by aerosols. Charge accumulation on aerosols promotes the long-term presence of charged layers in the surface atmosphere, which affect the spatial distribution of the electric field and its magnitude. Measurement of aerosols concentration of submicron and micron ranges in expeditions after 2012 supplemented the measuring complex. The results of regression and dispersion analysis of the potential gradient connection with the content of aerosols in the surface atmosphere are presented. The role of humidity in the aerosol formation and the possible indirect influence of this factor on the atmospheric electric field variations are considered.

Key words: surface layer, atmospheric electrical conductivity, atmospheric electric field, radon-222, aerosols, global electrical circuit, turbulence, field experiment.

© Petrova G. G. и др., 2018

¹The paper is performed with support of Russian Foundation for Fundamental Research Grants № 16 05 00930_a, № 17 05 41121 RGS_a