



Мониторинг состояния почвы, воздуха, воды

УДК 551.594:504.3.054

DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28009

Зависимость оценок аэрозольного загрязнения мегаполиса на базе напряженности атмосферного электрического поля от невозмущенного профиля проводимости

А. В. Крашенинников¹✉, Д. Н. Локтев¹, С. П. Соловьев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия
e-mail: pranfo@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.04.2025 г.; после доработки: 25.05.2025 г.; принята в печать: 26.05.2025 г.

Аннотация – Взвешенные ультрадисперсные частицы представляют собой большую опасность для здоровья людей, поэтому крайне важно развитие опосредованных методов оценки концентрации аэрозольных частиц размерами до 0,1 мкм. Связь аэрозольных частиц с напряженностью электрического поля атмосферы позволяет использовать его для таких оценок. Значительная сложность проведения измерений высотных зависимостей параметров атмосферы в пунктах наблюдений, в особенности, для функции проводимости, требует проведения исследования по зависимости получаемых результатов от взятого конкретного модельного профиля проводимости. В данном исследовании проанализирована связь параметров модели оценки концентрации аэрозолей в воздухе на базе значений напряженности электрического поля для трех профилей проводимости атмосферы: а) профиля, состоящего из единой экспоненты, б) из трех экспонент и в) для профиля, хорошо отражающего характеристики, влияющие на электрическое поле атмосферы приземного слоя. Показано, что использование близких профилей, отражающих высотную неоднородность профиля проводимости, дает почти одинаковый результат, однако, сильно отличающийся от них профиль значительно изменяет получаемые оценки – концентрация частиц в мегаполисе отличается почти на порядок от наблюдаемых значений.

Ключевые слова: атмосферное электричество, загрязнение атмосферы, мегаполис

Monitoring soil, air, water status

UDC 551.594:504.3.054

DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28009

Dependence of megacity aerosol pollution estimates based on the atmospheric electric field strength on the unperturbed conductivity profile

Alexey V. Krasheninnikov¹✉, Dmitry N. Loktev¹, and Sergey P. Soloviev¹

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
e-mail: pranfo@gmail.com

Received: May 15, 2025; Revised: May 25, 2025; Accepted: May 26, 2025

Abstract – Ultrafine particles are very harmful to human health, so it is extremely important to develop indirect methods for estimating the concentration of aerosol particles with sizes up to 0.1 μm in diameter in atmosphere. Aerosol particles and the atmospheric electric field strength are tightly related with each other what allows the electric field usage for such estimates. The impossibility of in situ measurements of altitude dependencies, especially for the conductivity function, necessitates a study on the dependence of the results obtained on the specific profile taken. In this study, numerical estimates of the parameters of the model for estimating aerosol concentration in the air on the basis of electric field strength values for three conductivity profiles proposed from literature sources are used: a profile consisting of a single exponent, a profile consisting of three exponents, and a profile that well reflects the characteristics affecting the electric field of the surface layer atmosphere. It is shown that the use of two close profiles reflecting the altitudinal inhomogeneity of the conductivity profile gives almost indistinguishable results, however, a very different profile strongly changes the obtained estimates (the particle concentration in a megacity changes by almost an order of magnitude).

Keywords: atmospheric electricity, atmospheric pollution, megacity.

ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире у жителей крупных мегаполисов вызывает сильное беспокойство ухудшение качества атмосферного воздуха, которое обусловлено высокой концентрацией антропогенных и техногенных факторов.

Чтобы оценить качество атмосферного воздуха, концентрация взвешенных частиц (РМ – particulate matter) различного происхождения (пыль, пыльца, сажа, дым, химикаты, сульфаты, минеральная пыль и т.д.), контролируется на пунктах наблюдения. Вдыхание взвешенных частиц вредит здоровью человека и чем меньше размер частиц, тем они опаснее [1]. Классификация РМ основана на их размерах. Цифра после букв РМ означает их размер в мкм. Наиболее распространенными являются РМ₁₀, РМ_{2,5}, РМ₁ и РМ_{0,1}.

РМ_{0,1} относятся к ультрадисперсным частицам (УДЧ), их размер менее 0,1 мкм, и они присутствуют в атмосфере в большом количестве. В сельской местности счётная концентрация частиц менее 0,1 мкм составляет $(1-5) \cdot 10^9/\text{м}^3$, а в воздухе городов – $(1-10) \cdot 10^{10}/\text{м}^3$ [1–3]. Согласно данным за 2006–2009 гг. Центральной Аэрологической Обсерватории концентрация частиц диапазона 0,01–0,1 мкм находится в пределах $(1-4) \cdot 10^{10}/\text{м}^3$ в зависимости от сезона [4].

Недостаточное количество пунктов наблюдений за концентрацией УДЧ приводит к необходимости разработки опосредованных методов ее оценки. Для определения наиболее тесно связанных с аэрозольным загрязнением атмосферы факторов в Центре геофизического мониторинга города Москвы ИДГ РАН проводятся совместные систематические наблюдения за целым рядом параметров [5]. Во время многих экстремальных событий возникают вариации в различных геополях [6–7], одним из которых является атмосферное электрическое поле. Согласно исследованиям [8] атмосферное электрическое поле наиболее чувствительно к частицам размерами 0,01–0,2 мкм. Учитывая такую взаимосвязь, можно рассматривать напряжённость электрического поля

для проведения оценок общего загрязнения атмосферы ультрадисперсными частицами.

Проводимость атмосферы во многом определяется подвижностью лёгких ионов. Свободно движущиеся в атмосфере лёгкие ионы при появлении аэрозольных частиц присоединяются к ним, формируя тяжёлые ионы с пониженной подвижностью, что в конечном итоге снижает общую электропроводность атмосферы. При неизменной плотности тока, текущего между ионосферой и поверхностью Земли, снижение её электропроводности ведёт к усилению электрического поля в данной точке. Связь электрических параметров атмосферы с аэрозольными частицами отмечается и при проведении натурных наблюдений. В измерениях напряжённости электрического поля и концентрации частиц разного размера, принесенных пожаром, могут быть отчетливо видны сильные синхронные вариации [9]. На станциях, расположенных в крупных городах или рядом с предприятиями, величина напряжённости электрического поля в рабочие дни сильно отличается от выходных дней, причём в сельской местности такой эффект практически не проявляется [10]. Ветер, дующий со стороны города и промышленных предприятий, приносит с собой аэрозольные частицы техногенного происхождения, повышая напряжённость электрического поля [11, 12].

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ

Цикл предшествующих работ [13–15] посвящён разработке модели антропогенной нагрузки на атмосферу мегаполиса на базе изменений напряжённости атмосферного электрического поля. Данная модель предназначена для оценки концентрации однозарядного монодисперсного аэрозоля в городской среде. Она основана на предположении о его распределении по высоте и зависимости от разницы в напряжённости электрического поля в приземном слое города, при наличии антропогенного влияния, и вне города при его отсутствии.

Рассматривается уравнение ионно-рекомбинационного равновесия для однозарядного монодисперсного аэрозоля без учёта знака в стационарных условиях $q = \alpha n^2 + \beta nZ$ [16–18], где n – концентрация лёгких ионов, q – интенсивность ионообразования, α – коэффициент рекомбинации лёгких ионов, β – коэффициент присоединения лёгких ионов к аэрозольным частицам, Z – число аэрозольных частиц в единице объёма. Использовались следующие значения коэффициентов, взятые из литературных источников: $q = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$, $\beta = 1,65 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ [14–20].

Рассмотрение аналогичных величин в двух пунктах – одном, подверженном воздействию мегаполиса, а другом – вне зоны его влияния, позволяет использовать отношение этих величин в качестве параметров модели. Одним из таких параметров является отношение концентрации лёгких ионов в городе к концентрации лёгких ионов в пригороде, где нет добавочного аэрозоля, связанного с жизнью в мегаполисе: ν , изменения которого происходят между 0 и 1. По этому параметру и концентрации фонового аэрозоля в

пригороде F , можно оценить концентрацию аэрозольных частиц в мегаполисе, M :

$$M = \frac{2q\alpha - v^2(\beta^2 F^2 + 2q\alpha - \beta F \sqrt{\beta^2 F^2 + 4q\alpha})}{v\beta(\sqrt{\beta^2 F^2 + 4q\alpha} - \beta F)}.$$

Для каждого пункта наблюдения рассматривалась одномерная ситуация, где координаты меняются вдоль оси Oz , при этом предполагалось, что параметры вблизи каждого пункта наблюдения остаются неизменными в горизонтальном направлении. Стационарность позволяет сосредоточиться на установившемся состоянии и использовать усреднённые значения. В рамках модели не рассматриваются горизонтальный перенос и турбулентность, которые могут исказить наблюдаемый эффект. Также исследование ограничивается только условиями, так называемой хорошей погоды (или близкими к ним), которые определяются отсутствием сильных погодных возмущений.

В этих условиях в каждом из пунктов наблюдений можно записать выражение $E_z = -\varphi_\infty / \left(\sigma(0) \int_0^H \frac{dz}{\sigma(z)} \right)$, где E_z — напряженность электрического поля, σ — высотная функция проводимости атмосферы, $\sigma(0)$ — значение проводимости у поверхности, H — высота ионосферы, φ_∞ — потенциал ионосферы.

Пусть аэрозоль распределён в приземном слое от поверхности земли до высоты h , причём функция электропроводности в этом слое имеет вид $\sigma^a(z) = g(z)\sigma(z) = v\nu^{-z/h}\sigma(z)$, а выше него остаётся неизменной и равной $\sigma(z)$. Приравнивая потенциал ионосферы над каждым пунктом друг к другу, получаем формулу:

$$d := \frac{E_z}{E_z^a} = \frac{\sigma^a(0) \int_0^H \frac{dz}{\sigma^a(z)}}{\sigma(0) \int_0^H \frac{dz}{\sigma(z)}}.$$

Формулы, связывающие параметры модели, имеют вид:

$$\nu(J + U) = d(1 + U - e^{-\alpha_0 h}),$$

$$J = \alpha_0 \int_0^h \frac{\nu^{z/h} \sigma(0) dz}{\nu \sigma(z)}, \quad U = \alpha_0 \int_h^H \frac{\sigma(0) dz}{\sigma(z)}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данном исследовании рассматривались 3 высотных профиля функции проводимости $\sigma(z)$, задаваемых с помощью экспонент (рис. 1). Первый профиль, который больше подходит для описания верхней части тропосферы, стратосферы и выше, задаётся одной экспонентой $\sigma(z) = \sigma_0 e^{\theta z}$, где $\theta = 1/6, 4$ [2] или $\theta = 0, 2-0, 3$ [17]. Для определенности было выбрано конкретное значение $\theta = 0, 3$. При модельных расчётах он используется для удобства, являя собой одну простую непрерывно-дифференцируемую функцию. Второй профиль взят из

статьи [19]. Он наиболее точно из всех рассматриваемых в работе профилей учитывает происходящие в приземном слое процессы, включая изменяющийся с высотой профиль ионизации атмосферы и содержание аэрозольных частиц. После подстановки параметров для чистого воздуха в приземном слое получится следующая формула:

$$\sigma(z) = 9,6 \cdot e^{\frac{z}{8} - 20z} \left(\sqrt{1 + 0,1e^{40z} \left(2e^{\frac{z}{0,46}} + 6e^{-\frac{z}{1,1}} \right)} - 1 \right).$$

Третий профиль отражает неоднородность изменения проводимости с высотой и представляет собой склеенные вместе три экспоненциальных зависимости для разных диапазонов высот [2]:

$$\sigma(z) = \begin{cases} \sigma_0 e^{\alpha_0 z}, & z \in [0; H_0] \\ \sigma_1 e^{\alpha_1 z}, & z \in [H_0; H_1] \\ \sigma_2 e^{\alpha_2 z}, & z \in [H_1; H] \end{cases} = \begin{cases} \sigma_0 \exp\left(\frac{z}{0,82}\right), & z \in [0; 3,6] \text{ км}, \\ \sigma_1 \exp\left(\frac{z}{4,1}\right), & z \in [3,6; 17,7] \text{ км}, \\ \sigma_2 \exp\left(\frac{z}{7,0}\right), & z \in [17,7; 70] \text{ км}, \end{cases}$$

где $H_0=3,6$ км, $H_1=17,7$ км, $H=70$ км, $\alpha_0=1/0,82$, $\alpha_1=1/4,1$, $\alpha_2=1/7$, а коэффициенты σ_1 и σ_2 выбирались согласно представлению $\sigma_1 = \sigma_0 e^{\alpha_0 H_0 - \alpha_1 H_0}$; $\sigma_2 = \sigma_0 e^{\alpha_0 H_0 - \alpha_1 H_0 + \alpha_1 H_1 - \alpha_2 H_1}$, чтобы обеспечить непрерывность функции проводимости. Так как в уравнениях модели значение σ_0 сокращается, то оно не приводится для профилей № 1 и 3.

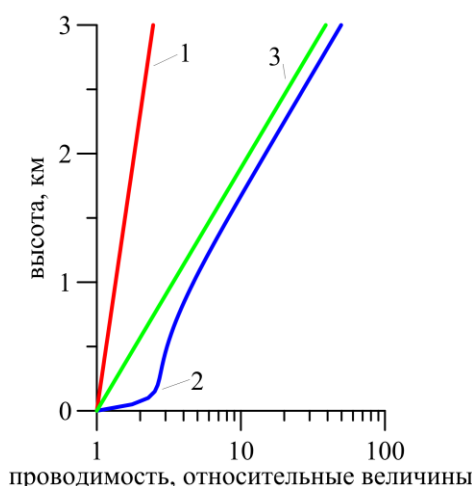


Рис. 1. Нормированные на значение при $z=0$ профили проводимости. 1 — профиль с одной экспонентой, 2 — профиль из статьи [19], 3 — профиль с тремя экспонентами

Fig. 1. Conductivity profiles normalized to the value at $z=0$. 1 — profile with one exponent, 2 — profile from the article [19], 3 — profile with three exponents

В таблицах 1–3 приведено сравнение рассчитанных величин параметра модели ν для трёх указанных профилей проводимости и экспоненциального профиля распределения аэрозолей. Эти значения были найдены с помощью численного метода приближенного интегрирования. Рассматриваемые значения параметра d соответствуют полученным значениям при изучении натуральных наблюдений в результате проведенного предварительного анализа. За период с

2014 по 2019 гг. эти значения менялись в диапазоне от 0,3 до 0,9, со средним значением около 0,7. Поведение параметров соответствует предполагаемому эффекту: уменьшение параметра d сопровождается снижением параметра ν , что соответствует увеличению оцениваемой концентрации частиц в городе, которое привело к данному эффекту. Считая, что вариации d составили 0,3–0,9, получается при предположении о фоновой концентрации $F=5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ и для высоты аэрозольного слоя $h=1 \text{ км}$ для профиля № 1 концентрация в Москве варьируется в пределах $1,1 \cdot 10^{10}$ – $2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, а для профилей № 2 и 3 в пределах $7 \cdot 10^9$ – $5,4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Сравнивая с данными Центральной Аэрологической Обсерватории, в Московском регионе концентрация частиц диапазона 0,01–0,1 мкм составляет около $(1\text{--}4) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, что ближе к оценкам, полученным по 2 и 3 профилям.

Таблица 1. Сравнение получающихся значений параметра ν для разных профилей проводимости невозмущенной атмосферы, случай толщины слоя аэрозольных частиц $h=1 \text{ км}$

Table 1. Comparison of the parameter ν resulting values for different unperturbed atmosphere conductivity profiles, the case of aerosol particle layer thicknesses $h=1 \text{ km}$

№ профиля	$d=0,3$	$d=0,5$	$d=0,7$	$d=0,9$
1	0,03	0,08	0,19	0,52
2	0,1	0,23	0,44	0,77
3	0,11	0,24	0,45	0,78

Таблица 2. Сравнение получающихся значений ν для разных профилей проводимости невозмущенной атмосферы, случай толщины слоя аэрозольных частиц $h=1,5 \text{ км}$

Table 2. Comparison of the parameter ν resulting values for different unperturbed atmosphere conductivity profiles, the case of aerosol particle layer thicknesses $h=1,5 \text{ km}$

№ профиля	$d=0,3$	$d=0,5$	$d=0,7$	$d=0,9$
1	0,05	0,12	0,27	0,62
2	0,14	0,29	0,51	0,81
3	0,14	0,3	0,52	0,82

Таблица 3. Сравнение получающихся значений ν для разных профилей проводимости невозмущенной атмосферы, случай толщины слоя аэрозольных частиц $h=2 \text{ км}$

Table 3. Comparison of the parameter ν resulting values for different unperturbed atmosphere conductivity profiles, the case of aerosol particle layer thicknesses $h=2 \text{ km}$

№ профиля	$d=0,3$	$d=0,5$	$d=0,7$	$d=0,9$
1	0,06	0,15	0,33	0,68
2	0,16	0,34	0,56	0,84
3	0,17	0,34	0,57	0,84

Стоит отметить, что профили № 2 и 3 дают весьма близкие величины. Профиль № 1, в свою очередь, сильно отличается от двух других, что предположительно можно обосновать тем, что профили № 2 и 3 лучше отражают происходящие в приземном слое процессы. Аккуратное задание проводимости в приземном слое до высот нескольких км наиболее важно, потому что именно он вносит определяющий вклад в сопротивление единичного столба атмосферы. При этом эффект не изменится при небольшом изменении параметра θ , так, при его уменьшении относительно рассмотренного значения произойдёт увеличение отрыва получаемых значений от значений для других профилей. Поэтому целесообразно использование в данной модели профиля № 2 (использованный в [13–15]), который сочетает в себе точность проводимых оценок и более простой вид.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы было проведено исследование влияния изменения профиля проводимости атмосферы на получаемый результат моделирования концентрации аэрозолей в городе. Проведённый анализ позволяет сделать вывод, что для профилей, более аккуратно отражающих состояние приземной (до высот нескольких километров) атмосферы, различие в получаемых оценках незначительно, что даёт возможность использовать любой из представленных профилей. Отличающийся от них профиль (на рис. 1, профиль – 1), более подходит для описания проводимости на больших высотах. Однако, идентичное поведение данного профиля с профилем из трёх экспонент на высотах от 17,7 км и выше (при $\theta=1/7\approx 0,14$) не даёт совпадения в получаемых оценках концентрации аэрозолей, что связано с разным вкладом в сопротивление единичного столба атмосферы разных высот.

Работа выполнена в рамках госзадания № 125012700798-8.

ACKNOWLEDGEMENT

The work was performed within the state assignment framework № 125012700798-8.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Schraufnagel, D.E. (2020). The health effects of ultrafine particles. *Exp. Mol. Med.*, 52, 311–317. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3>.
2. Атмосфера. Справочник. Под ред. Ю. С. Седунова. (1991). Л.: Гидрометеиздат, С. 508.
3. Morawska L., Ristovski Z., Jayaratne R., Keogh D.U., Ling X. (2008). Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: characteristics, ambient processing and

implications on human exposure. *Atmos. Environ.* 42, 8113–8138.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.050>.

4. Плауде Н.О., Стулов Е.А., Паршуткина И.П., Сосникова Е.В., Монахова Н.А. (2013). Характеристики атмосферного аэрозоля в московском регионе. М.: Науч. мир, С. 80.
5. Рыбнов С.Ю., Крашенинников А.В., Соловьев С.П., Рыбнов Ю.С. (2024). Мониторинг термодинамического режима атмосферной турбулентности. *Динамические процессы в геосферах*, 16(1), 43–51. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_1_43.
6. Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Крашенинников В.А., Рыбнов С.Ю. (2023). Вариации геофизических полей при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. *Динамические процессы в геосферах*, 15(1), 63–72. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_63.
7. Спивак А.А., Гаврилов Б.Г., Рябова С.А., Тихонова А.В. (2024). О возможности формулировки прогностических признаков опасных атмосферных явлений на основе анализа вариаций геофизических полей. *Динамические процессы в геосферах*, 16(4), 54–63. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_4_54.
8. Шварц Я.М., Огуряева Л. В. (1987). Анализ многолетнего хода величин атмосферного электричества в приземном слое. *Метеорология и гидрология*, 7, 59–67.
9. Jayaratne E.R., Verma T.S. (2004). Environmental aerosols and their effect on the Earth's local fair-weather electric field. *Meteorol. and Atmosph. Physics*, 86, 275–280. <https://doi.org/10.1007/s00703-003-0028-9>.
10. Sheftel V.M., Chernyshev A.K., Chernysheva S.P. (1994). Air conductivity and atmospheric electric field as an indicator of antropogenic atmospheric pollution. *J. Geophys. Res.*, 99, D5, 10793–10795. <https://doi.org/10.1029/94JD00287>.
11. Пустовалов К.Н., Нагорский П.М., Оглезнева М.В., Смирнов С.В. (2024). Влияние направления ветра на приземное электрическое поле в г. Томске. *Труды XXX Юбилейного международного симпозиума “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы”*, D125–D129.
12. Silva H.G., Matthews J.C., Conceição R., Wright M.D., Pereira S.N., Reis A.H., Shallcross D.E. (2015). Modulation of urban atmospheric electric field measurements with the wind direction in Lisbon. *J. Physics. Conference Ser.*, 646(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/646/1/012013>.
13. Krasheninnikov A.V., Loktev D.N., Soloviev S.P. (2018). Atmospheric electric field in megacity aerosol pollution conditions. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1083370. <https://doi.org/10.1117/12.2502313>.
14. Крашенинников А.В., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. (2020). Аэрозольное загрязнение мегаполиса и возмущения атмосферного электрического поля. *Геофизические процессы и биосфера*, 19(2), 5–18. <https://doi.org/10.21455/gpb2020.2-1>.
15. Крашенинников А.В., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. (2024). Оценка аэрозольного загрязнения г. Москва на базе измерений атмосферного электрического поля. *Геофизические процессы и биосфера*, 23(2), 5–11. <https://doi.org/10.21455/GPB2024.2-1>.
16. Harrison R.G., Carslaw K.S. (2003). Ion-aerosol-cloud processes in the lower atmosphere. *Rev. Geophys.*, 41(3), 1012–1037. <https://doi.org/10.1029/2002RG000114>.
17. Морозов В.Н. (2011). Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. СПб.: РГГМ. С. 253.
18. Морозов В.Н., Зайнетдинов Б.Г., Занюков В.В. (2022). Влияние аэрозольных частиц на глобальную электрическую цепь. *Системный синтез и прикладная синергетика. Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции*, 304–309. <https://doi.org/10.18522/syssyn-2022-58>.
19. Surkov, V. V. (2015). Pre-seismic variations of atmospheric radon activity as a possible reason for abnormal atmospheric effects. *Annals of Geophysics*, 58(5), A0554. <https://doi.org/10.4401/ag-6808>.

20. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. (1998). Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: ТРТУ. С. 124.

References:

1. Schraufnagel, D.E. (2020). The health effects of ultrafine particles. *Exp. Mol. Med.*, 52, 311–317. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3>.
2. Atmosphere. Handbook. Edited by Yu. S. Sedunov. (1991). L.: Hydrometeoizdat, P. 508 (in Russ.).
3. Morawska, L., Ristovski, Z., Jayaratne, R., Keogh, D.U. & Ling, X. (2008). Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmos. Environ.* 42, 8113–8138. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.050>.
4. Plaude, N.O., Stulov, Ye.A., Parshutkina, I.P., Sosnikova, Ye.V. & Mohahova, N.A. (2013). Characteristics of atmospheric aerosol in the Moscow region. M.: Nauchn. mir, P. 80 (in Russ.).
5. Rybnov, S.Yu., Krasheninnikov, A.V., Soloviev, S.P. & Rybnov, Yu.S. (2024). Monitoring of the thermodynamic regime of atmospheric turbulence. *Dynamic Processes in Geospheres*, 16(1), 43–51 (in Russ.). http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_1_43.
6. Rybnov, Yu.S., Krasheninnikov, A.V., Soloviev, S.P. & Rybnov, S.Yu. (2023). Variations of geophysical fields during the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano on January 15, 2022. *Dynamic Processes in Geospheres*, 15(1), 63–72 (in Russ.). http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_63.
7. Spivak, A.A., Gavrilov, B.G., Ryabova, S.A. & Tikhonova, A.V. (2024). On the possibility of formulating prognostic signs of dangerous atmospheric phenomena based on the analysis of variations of geophysical fields. *Dynamic Processes in Geospheres*, 16(4), 54–63 (in Russ.). https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_4_54.
8. Shvarts, Ja.M. & Oguraeva, L.V. (1987). Analysis of multiyear variations of atmospheric electricity values in the surface layer. *Meteorology and hydrology*, 7, 59–67 (in Russ.).
9. Jayaratne, E.R. & Verma, T.S. (2004). Environmental aerosols and their effect on the Earth's local fair-weather electric field. *Meteorol. and Atmosph. Physics*, 86, 275–280. <https://doi.org/10.1007/s00703-003-0028-9>.
10. Sheftel, V.M., Chernyshev, A.K. & Chernysheva, S.P. (1994). Air conductivity and atmospheric electric field as an indicator of antropogenic atmospheric pollution. *J. Geophys. Res.*, 99, D5, 10793–10795. <https://doi.org/10.1029/94JD00287>.
11. Pustovalov, K.N., Nagorskij, P.M., Oglezneva, M.V. & Smirnov, S.V. (2024). The influence of wind direction on the ground electric field in Tomsk. *Proceedings of the XXX Jubilee International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics"*, D125–D129 (in Russ.).
12. Silva, H.G., Matthews, J.C., Conceição, R., Wright, M.D., Pereira, S.N., Reis, A.H. & Shallcross, D.E. (2015). Modulation of urban atmospheric electric field measurements with the wind direction in Lisbon. *J. Physics. Conference Ser.*, 646(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/646/1/012013>.
13. Krasheninnikov, A.V., Loktev, D.N. & Soloviev, S.P. (2018). Atmospheric electric field in megacity aerosol pollution conditions. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1083370. <https://doi.org/10.1117/12.2502313>.
14. Krasheninnikov, A.V., Loktev, D.N. & Soloviev, S.P. (2020). Megacity aerosol pollution and atmospheric electric field disturbances. *Izvestiya, atmospheric and oceanic physics*, 56(8), 759–772. <https://doi.org/10.1134/S0001433820080046>.
15. Krasheninnikov, A.V., Loktev, D.N. & Soloviev, S.P. (2024). Assessment of aerosol pollution in the city of Moscow based on measurements of the atmospheric electric field. *Izvestiya*

atmospheric and oceanic physics, 60(8), 877–883.

<https://doi.org/10.1134/S0001433824701287>.

16. Harrison, R.G. & Carslaw, K.S. (2003). Ion-aerosol-cloud processes in the lower atmosphere. *Rev. Geophys.*, 41(3), 1012–1037. <https://doi.org/10.1029/2002RG000114>.
17. Morozov, V.N. (2011). Mathematical modeling of atmospheric-electrical processes taking into account the influence of aerosol particles and radioactive substances. SPb.: RGGM. P. 253 (in Russ.).
18. Morozov, V.N., Zajnetdinov, B.G., Zanutov, V.V. (2022). Influence of aerosol particles on the global electric circuit. *System synthesis and applied synergetics. Collection of scientific papers of the XI All-Russian Scientific Conference*, 304–309 (in Russ.).
<https://doi.org/10.18522/syssyn-2022-58>.
19. Surkov, V. V. (2015). Pre-seismic variations of atmospheric radon activity as a possible reason for abnormal atmospheric effects. *Annals of Geophysics*, 58(5), A0554.
<https://doi.org/10.4401/ag-6808>.
20. Kupovich, G.V., Morozov, V.N. & Shvarts Ja.M. (1998). Theory of the electrode effect in the atmosphere. Taganrog: TRTU. P. 124 (in Russ.).