

Влияние аэрозольных частиц в приземном слое воздуха на элементы глобальной электрической цепи в атмосфере

Б.Г. Зайнетдинов[✉], В.Н. Морозов, В.В. Занюков*

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Поступила в редакцию 13.10.2022;
после доработки 11.04.2023;
принята к печати 15.05.2023

Одной из важных проблем в теории атмосферного электричества является исследование влияния аэрозольных частиц на параметры токовой цепи в атмосфере, или на глобальную токовую цепь. Представлена теоретическая модель влияния аэрозольных частиц в областях хорошей погоды на глобальную электрическую цепь (ГЭЦ) в атмосфере. Аэрозоль в приземном слое атмосферы рассматривается как слагаемое, входящее в полное сопротивление столба атмосферы. При этом генераторы электрического поля, поддерживающие ГЭЦ, не учитываются, а входят через граничное условие на верхней границе ионосферы в виде задания величины потенциала ионосферы. Также представлены результаты экспериментальных наблюдений за электрическими характеристиками атмосферы и концентрацией аэрозольных частиц. Теоретические и экспериментальные исследования дают возможность оценить концентрацию аэрозольных частиц субмикронного диапазона.

Ключевые слова: глобальная электрическая цепь, потенциал ионосферы, аэрозольное загрязнение, моделирование электрических процессов, напряженность электрического поля атмосферы, электрическая проводимость воздуха; global electrical circuit, atmospheric potential, aerosol pollution, modeling of electrical processes, electric fields in the atmosphere, air electrical conductivity.

Введение

Аэрозоль в атмосфере представлен взвешенными твердыми и жидкими частицами естественного и антропогенного происхождения. К последним относят различного рода выбросы с предприятий, а также транспортные и сельскохозяйственные выбросы. К естественным можно отнести постоянно генерируемые аэрозоли (морская соль, пыль и др.), сезонные (пыльца растений), разовые выбросы, возникающие в ходе вулканических процессов [1].

Аэрозольные частицы влияют на проводящие свойства атмосферы, в частности уменьшая концентрацию ионов в ней, что в конечном итоге приводит к изменению электрических характеристик атмосферы (ЭХА).

Электрические характеристики атмосферы, такие как напряженность электрического поля атмосферы и электрическая проводимость воздуха, — интегральные показатели как радиоактивного, так и аэрозольного загрязнения [2]. В ряде работ российских и зарубежных исследователей рассматривалось влияние выбросов в атмосферу аэрозольных частиц и радиоактивных веществ на параметры

глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [3–6]. Глобальная электрическая цепь — это система электрических токов, возникающая в атмосфере и пронизывающая магнитосферу, ионосферу и нижнюю атмосферу вплоть до земной поверхности. Основные положения теории ГЭЦ изложены в монографии [3], где эта теория была рассмотрена без учета аэрозоля, а также в ряде обзоров, отмеченных в [3].

Главная проблема, которая возникает при исследовании ГЭЦ, — это поддержание ее существования, так как вследствие малой, но конечной электропроводности нижней атмосферы электрические поля и токи должны затухать примерно за 10 мин [3]. На данный момент принято считать, что ГЭЦ существует благодаря различным токовым генераторам, включающим в том числе и грозовые облака [3]. В настоящей работе эти генераторы не рассматриваются, их действие задается через глобальную электрическую характеристику атмосферы — потенциал ионосферы [3].

Необходимо отметить некоторые ранние работы, посвященные данной проблеме. Так, к примеру, в [4–6] показано, что вклад аэрозольных частиц в характеристики ГЭЦ составляет порядка 10%. Также существует ряд экспериментальных работ [7, 8], показывающих локальное воздействие концентрации субмикронного аэрозоля на электрические параметры атмосферы.

* Булат Гаянович Зайнетдинов (bulatoss@yandex.ru);
Владимир Николаевич Морозов (vn.morozov@inbox.ru);
Владимир Владимирович Занюков (vvzov26@gmail.com).

Результаты теоретических исследований и численных оценок показывают, что достаточная концентрация аэрозольных частиц в атмосфере приводит к увеличению электрического сопротивления, как столбцового (эта величина определяется выражением $R_c = \int_{r_0}^H dr/\lambda(r)$, где r_0 — расстояние от

центра Земли до точки на земной поверхности — это радиус Земли; H — расстояние от центра Земли до нижней границы ионосферы; $\lambda(r)$ — изменение проводимости с высотой), так и глобального ($R_g = R_c/4\pi r^2$, где r — расстояние от центра Земли до заданной точки в атмосфере), а также потенциала ионосферы [3]. Экспериментальная связь между концентрацией аэрозоля и проводимостью показана в [9], где отмечается существенное влияние аэрозольных частиц размерами 0,01–0,2 мкм на параметры атмосферного электричества. Некоторые вопросы электрооптических связей в атмосфере в условиях дымового смога рассматривались в [10]. Максимальная концентрация аэрозольных частиц в основном имеет место в приземном слое атмосферы, поэтому интересным представляется рассмотреть их влияние на электрические свойства этого слоя при отсутствии генераторов электрического поля при заданной величине потенциала ионосферы.

Цель работы — оценка влияния аэрозольных частиц на потенциал и напряженность электрического поля в атмосфере через изменение электрической проводимости атмосферы в простейшем сферически-симметричном случае.

1. Математическая формулировка уравнений напряженности электрического поля в приземном слое, содержащем аэрозольные частицы

Для оценки влияния аэрозольных частиц на ЭХА через изменение электрической проводимости авторами была разработана модель глобальной токовой цепи при отсутствии источников и с учетом аэрозольной составляющей в приземном слое атмосферы. Источником электрического поля в данном случае является потенциал ионосферы.

Запишем в сферической системе координат с началом координат в центре Земли для стационарного случая уравнение, следующее из равенства $\nabla(\lambda(r)\nabla\varphi) = 0$:

$$\lambda(r) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

где λ — электрическая проводимость воздуха, обусловленная положительными и отрицательными аэроионами; φ — электрический потенциал.

Использование уравнения (1) для оценок влияния аэрозольной составляющей атмосферы на ее электрическое поле через изменение электрической проводимости предполагает отсутствие в правой части уравнения (1) токовых генераторов, поддерживающих это поле [3]. В качестве таких генерато-

ров могут выступать грозовые облака [3, 5]. В настоящей статье предполагается отсутствие в рассматриваемой области генераторов электрического поля.

Для электрической проводимости используется следующее представление:

$$\begin{aligned} \lambda(r) &= \eta \lambda_0 e^{\beta(r-r_0)}, \quad r - r_0 \in [0; H) \text{ (область I)}, \\ \lambda(r) &= \lambda_0 e^{\beta(r-r_0)}, \quad r - r_0 \in [H; H_0] \text{ (область II)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где η — коэффициент поглощения аэроионов, который характеризует уменьшение проводимости в области I за счет наличия аэрозольных частиц; λ_0 — проводимость вблизи земной поверхности; H_0 — высота нижней границы ионосферы (60–70 км); $\beta = (0,2-0,3) \text{ км}^{-1}$ — величина, определяющая рост проводимости с высотой [3]. Соотношения (2) характеризуют масштаб изменения электрической проводимости с высотой H .

Граничные условия для решения данной задачи представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi_{r-r_0=0} &= 0, \\ \varphi|_{(r-r_0)=H_0} &= \varphi_\infty, \end{aligned} \quad (3)$$

где φ_∞ — потенциал ионосферы, определяемый заданием источников поля [3].

Кроме того, при $r - r_0 = H$ необходимо использовать равенство потенциалов для решений, полученных в областях I и II, и плотности электрического тока на этой границе. Для проводимости, задаваемой соотношениями (2), уравнение (1) при $r \gg \alpha^{-1}$ сводится к следующему:

$$\frac{d}{dr} \left(\lambda \frac{d\varphi}{dr} \right) = 0. \quad (4)$$

Интегрируя это уравнение по области I, получим

$$\varphi_1(r) = -\frac{C_1}{\eta\beta\lambda_0} e^{-\beta(r-r_0)} + C_2, \quad (5)$$

где C_1, C_2 — постоянные.

Используя при $r = r_0$ граничное условие $\varphi(r_0) = 0$, получаем $C_2 = C_1/\eta\beta\lambda_0$, и

$$\varphi_1(r) = \frac{C_1}{\eta\beta\lambda_0} (1 - e^{-\beta(r-r_0)}). \quad (6)$$

Для решения в области II имеем

$$\varphi_2(r) = -\frac{C_3}{\beta\lambda_0} e^{-\beta(r-r_0)} + C_4, \quad (7)$$

где C_3, C_4 — постоянные.

Используя второе граничное условие в (3), представляем это решение в виде

$$\varphi_2(r) = \varphi_\infty + \frac{C_3}{\beta\lambda_0} (e^{-\beta H_0} - e^{-\beta(r-r_0)}). \quad (8)$$

Принимая потенциал электрического поля и плотность тока непрерывными при $r - r_0 = H$, получим

$$\varphi_1(H) = \varphi_2(H), \quad j_1(H) = j_2(H),$$

$$j_1(H) = \lambda_1(H)E_{1r}(H) = j_2(H) = \lambda_2(H)E_{2r}(H), \quad (9)$$

где j_1, j_2 — плотности электрического тока в областях I и II; E_{1r}, E_{2r} — радиальные составляющие напряженности электрического поля в соответствующих областях.

Из второго уравнения системы (9) получаем тождество $C_1 = C_3$. Тогда из первого соотношения (9)

$$C_1 = \frac{\varphi_\infty}{\left[\frac{1}{\beta\eta\lambda_0}(1 - e^{-\beta H}) + \frac{1}{\beta\lambda_0}(e^{-\beta H} - e^{-\beta H_0}) \right]}. \quad (10)$$

Радиальная составляющая напряженности электрического поля в области I

$$\begin{aligned} E_{r1}(r) &= -\frac{C_1}{\eta\lambda_0}e^{-\beta(r-r_0)} = \\ &= -\frac{\varphi_\infty e^{-\beta(r-r_0)}}{\eta\lambda_0 \left[\frac{1}{\beta\eta\lambda_0}(1 - e^{-\beta H}) + \frac{1}{\beta\lambda_0}(e^{-\beta H} - e^{-\beta H_0}) \right]} = \\ &= -\frac{\beta\varphi_\infty e^{-\beta(r-r_0)}}{1 - e^{-\beta H} + \eta(e^{-\beta H} - e^{-\beta H_0})}. \end{aligned} \quad (11)$$

В области II имеем

$$\begin{aligned} E_{r2}(r) &= -\frac{C_1}{\lambda_0}e^{-\beta(r-r_0)} = \\ &= -\frac{\varphi_\infty}{\lambda_0 \left[\frac{1}{\beta\eta\lambda_0}(1 - e^{-\beta H}) + \frac{1}{\beta\lambda_0}(e^{-\beta H} - e^{-\beta H_0}) \right]}. \end{aligned} \quad (12)$$

Как следует из работы [11], потенциал ионосферы при наличии аэрозольных частиц в атмосфере связан с потенциалом ионосферы в условиях незагрязненной атмосферы соотношением $\varphi_\infty^a = \varphi_\infty^0/\eta$, т.е. при $\eta < 1$ он возрастает.

При $H < 1/\beta$, $H_0 \rightarrow \infty$ получим выражение для напряженности электрического поля в области I:

$$E_{r1} = -\frac{\beta\varphi_\infty}{\eta}e^{-\beta(r-r_0)}. \quad (13)$$

2. Коэффициент поглощения ионов η

Коэффициент поглощения ионов η является важной величиной в нашей задаче. Он связывает концентрацию аэрозольных частиц и поглощаемых ими атмосферных ионов. Данный параметр находится из уравнения ионизационно-рекомбинационного равновесия и определяет влияние аэрозольных частиц на электрическую проводимость приземного слоя.

Из работы [11] следует выражение для η :

$$\eta = \left(\frac{(\gamma N)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\gamma N}{2\sqrt{q\alpha}}, \quad (14)$$

где γ — интегральный коэффициент присоединения ионов к аэрозольным частицам; N — концентрация аэрозольных частиц; q — интенсивность ионообразования; α — коэффициент рекомбинации легких ионов.

Вычислим эту величину, предполагая $N = 10^9 \text{ м}^{-3}$, $\gamma = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $q = 10^7 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. В результате $\eta = 0,82$. В этом случае, как следует из работы [11], потенциал ионосферы возрастает в 1,21 раза, и при $\varphi_\infty^0 = 250 \text{ кВ}$ $\varphi_\infty^a = 304 \text{ кВ}$.

Если учесть в выражении (14) зависимость β от типа ионов, то вместо него получим

$$\begin{aligned} \eta &= \left[\left(\frac{(\gamma_+ N)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\gamma_+ N}{2\sqrt{q\alpha}} \right] + \\ &+ \left[\left(\frac{(\gamma_- N)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\gamma_- N}{2\sqrt{q\alpha}} \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Это соотношение следует из уравнений ионизационно-рекомбинационного равновесия, записанных для каждого типа ионов в стационарном случае [12]:

$$\begin{aligned} 0 &= q - \alpha n_+^2 - n_+ \sum_r \gamma_+(r)N(r), \\ 0 &= q - \alpha n_-^2 - n_- \sum_r \gamma_-(r)N(r). \end{aligned} \quad (16)$$

Решение этих уравнений определяет концентрацию положительных и отрицательных легких ионов в зависимости от концентрации аэрозольных частиц. В общем случае величина η определяется выражением

$$\begin{aligned} \eta &= \left[\left(\frac{\sum_r \beta_+(r)N(r)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\sum_r \beta_+(r)N(r)}{2\sqrt{q\alpha}} \right] = \\ &= \left[\left(\frac{\sum_r \beta_-(r)N(r)^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\sum_r \beta_-(r)N(r)}{2\sqrt{q\alpha}} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

В табл. 1 представлены результаты расчетов η в зависимости от концентрации аэрозольных частиц.

Таблица 1
Зависимость коэффициента поглощения ионов от концентрации аэрозольных частиц

$N, \text{ м}^{-3}$	η
10^9	0,820
10^{10}	0,210
$5 \cdot 10^{10}$	0,021

Вычислим отношение

$$\frac{E_{r1}}{\beta\varphi_\infty} = \frac{1}{(1 - e^{-\beta(r-r_0)}) + \eta e^{-\beta(r-r_0)}}$$

в области $[r_0, r_1]$, где $\beta\varphi_\infty$ — абсолютная величина напряженности электрического поля в отсутствие аэрозоля; r_1 — расстояние от центра Земли до верхней границы приземного слоя, содержащего аэрозольные частицы.

Зависимость напряженности электрического поля от высоты верхней границы аэрозольного слоя и коэффициента поглощения ионов приведена в табл. 2.

Таблица 2
Зависимость напряженности электрического поля от высоты верхней границы аэрозольного слоя для различных значений η

η	r_1 , м		
	100	500	1000
0,82	1,21	1,18	1,15
0,20	4,46	3,22	2,45

Как видно из табл. 2, с ростом концентрации аэрозольных частиц в приземном слое напряженность электрического поля растет.

3. Данные наблюдений за концентрацией аэрозольных частиц и ЭХА

Сетевые наблюдения за ЭХА, такими как напряженность электрического поля приземного слоя атмосферы и полярная электрическая проводимость воздуха, обусловленными положительными и отрицательными аэроионами, начали проводиться на территории СССР с середины 1960-х гг. [13, 14]. С 2013 г. данный вид наблюдений ведется на ст. Тикси, которая расположена в одноименном поселке на берегу Северного Ледовитого океана. Эту станцию можно считать условно «чистой» в плане аэрозольного загрязнения. Помимо ЭХА на ст. Тикси до 2018 г. осуществлялся комплекс программ по наблюдению за концентрацией аэрозоля. Также, в качестве эксперимента, эпизодические наблюдения за концентрацией аэрозоля проводились на ст. Воейково в весенне-летний период 2017 г. [7]. В работах [15, 16] показано, что кон-

центрация аэрозоля в приземном слое часто коррелирует с аэрозольной оптической толщиной. В связи с этим имеет смысл рассмотреть, как значения ЭХА зависят от концентрации аэрозоля в ходе длительных наблюдений и на примере суточных вариаций.

На рис. 1 показан пример годового хода усредненных значений суммарной электрической проводимости воздуха ($\sum \lambda = \lambda_+ + \lambda_-$) и напряженности электрического поля (E), а также медианных значений N субмикронного диапазона (15...800 нм) по результатам наблюдений на ст. Тикси с 2014 по 2018 г. Медианные значения выбраны с точки зрения лучшей репрезентативности, поскольку концентрация аэрозоля имеет логнормальное распределение.

Изучалась счетная концентрация аэрозоля; данные о спектре распределения по размерам в настоящей работе не рассматривались. Анализируемые значения были получены при отсутствии различных метеоявлений, таких как метели различного вида, дождь, снег, туманы, грозы. Выборка часов, полностью соответствующих условиям «хорошей погоды» для данной местности, достаточно затруднительна ввиду климатических особенностей места расположения станции. Для удобства отображения данные о E представлены в декавольтах на метр (10^1 В/м).

На рис. 1 видно, что сезонные вариации $\sum \lambda$ относительно N находятся в противофазе, принимая максимальные значения в сентябре-октябре, а минимальные — в феврале-марте. Концентрация аэрозоля в те же периоды имеет обратные экстремумы. Минимум $\sum \lambda$ и максимум N в весенние месяцы обусловлены арктической дымкой, которая возникает за счет дальнего меридионального переноса аэрозолей различного происхождения из средних широт в зимне-весенний период.

Сезонная вариация E коррелирует с N в меньшей степени, при этом повторяемость колебаний проявляется только с апреля по июль. Коэффициенты корреляции составили $-0,82$ между N и $\sum \lambda$ и $0,56$ между E и N .

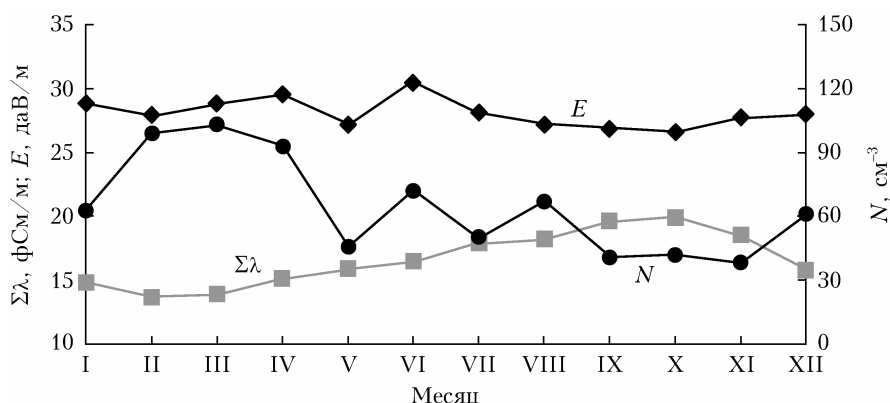


Рис. 1. Сезонный ход электрических параметров атмосферы и концентрации аэрозольных частиц в пос. Тикси

На рис. 2 приведены примеры суточного хода рассматриваемых величин для 03.05.2017 г. (рис. 2, *а*) и 16.07.2021 г. (рис. 2, *б*) на ст. Воейково, которая расположена в 9 км от восточной границы Санкт-Петербурга. Данные усреднялись по получасовым интервалам. Аэрозольные частицы измерялись в диапазоне 3...200 нм. Также для двух дат были получены данные об оптической плотности аэрозоля на длине волны 550 нм (τ) с той лишь разницей, что для 03.05.2017 г. в источнике [13] эти значения были приведены для синоптических сроков, а для 16.07.2021 г. рассчитывались каждый час.

Синоптическая ситуация в каждом из рассматриваемых случаев была разной. Так, 03.05.2017 г. пункт Воейково находился под влиянием юго-восточной части скандинавского антициклона. После прохождения активных циклонов в предыдущие дни в их тыл стала поступать глубокая арктическая воздушная масса с севера. В течение дня 03.05 преобладал легкий (2–3 м/с) северный ветер, данный сектор принято считать «чистым».

До полудня (здесь и далее время указано в формате UTC) 16.07.2021 г. пункт Воейково находился в теплом секторе небольшого циклона; преобладающая воздушная масса — южная умеренная (до этого — циркуляция в антициклоне). Во второй половине дня станцию пересек размытый

холодный фронт. До 12:50 преобладал легкий западный ветер (~3 м/с) («загрязненный» сектор), после прохождения фронта ветер сменил направление на северо-восточное и ослаб до тихого (~1 м/с), что, в свою очередь, привело к уменьшению значений N в среднем в 2 раза.

К 12:00 13.05.2017 г. в столбе атмосферы $\tau = 0,020$ –0,035 (чистый воздух), тогда как для 16.07.2021 г. $\tau = 0,060$ –0,070 (воздух загрязненный). Данные значения также подтверждают концентрации субмикронного аэрозоля в приземном слое, которые разнятся в 2–3 раза между рассматриваемыми днями. Стоит отметить, что значения оптической плотности столба атмосферы 16.07.2021 г. сильно коррелируют с концентрацией аэрозоля в приземном слое (коэффициент корреляции составил 0,79). Схожие данные были получены в работах [15, 16].

Коэффициенты корреляции 16.07.2021 г. довольно низкие как между N и E , так и между N и $\sum \lambda$ (0,7 и –0,5 соответственно). Предположительно это обусловлено дневным турбулентным перемешиванием в полдень по местному времени. Если исключить эти часы (с 9:00 до 12:00) из выборки, то коэффициенты корреляции меняются на 0,86 и –0,62 для соответствующих параметров.

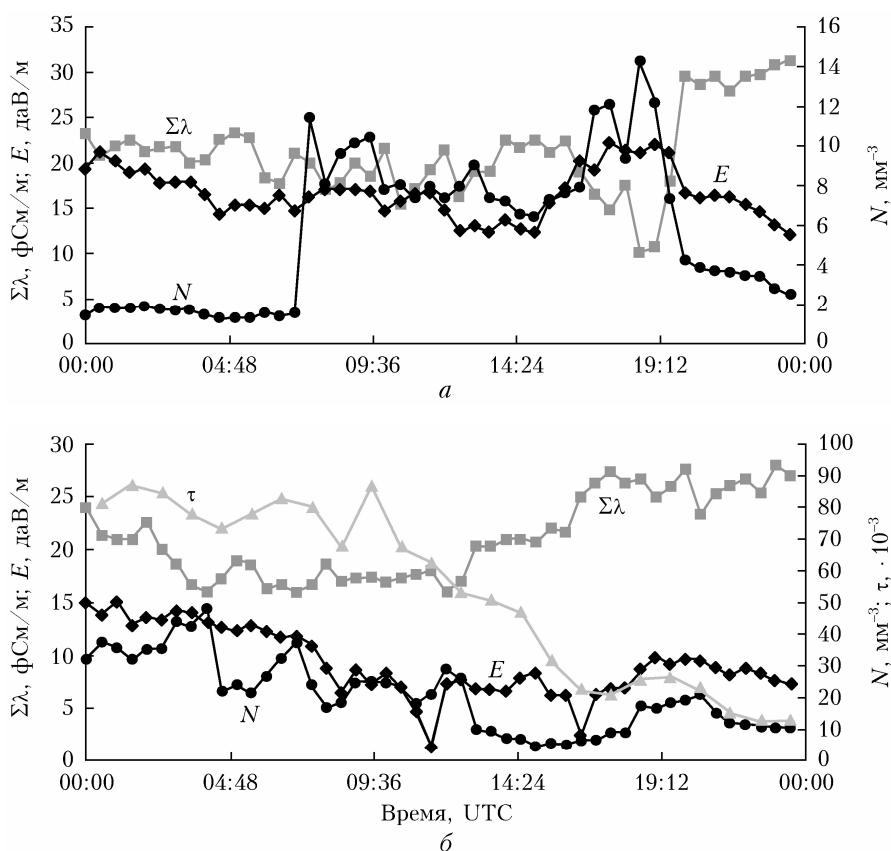


Рис. 2. Суточный ход электрических параметров атмосферы и концентрации аэрозольных частиц в пос. Воейково: 03.05.2017 г. (*а*); 16.07.2021 г. (*б*)

Заключение

Рассмотренные в работе вопросы влияния аэрозольных частиц на глобальную электрическую цепь в атмосфере являются достаточно актуальными для электроклимата и его вклада в климат Земли в целом. Показано, как аэрозольные частицы в приземном слое атмосферы влияют на радиальную составляющую напряженности электрического поля. Результаты теоретического исследования и численных оценок показывают, что достаточная концентрация аэрозольных частиц в атмосфере приводит к увеличению как столбцового, так и глобального электрического сопротивления, а также потенциала ионосферы.

Результаты совместных наблюдений за электрическими характеристиками атмосферы и концентрацией субмикронных аэрозольных частиц на сети станций Росгидромета показывают локальное влияние временных изменений концентрации аэрозоля на элементы глобальной электрической цепи и хорошо согласуются с теоретическими моделями.

Список литературы

1. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 280 с.
2. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 421 с.
3. Морозов В.Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. СПб.: РГГМУ, 2011. 253 с.
4. Makino M., Ogawa T. Responses of atmospheric electric field and air-earth current to variation of conductivity profiles // J. Atmos. Terr. Phys. 1984. V. 46, N 5. P. 431–435.
5. Ogawa T. Fair-weather electricity // J. Geophys. Res. 1985. V. 90, N D4. P. 5951–5960.
6. Sarkota B.K., Varshneya P. On the global atmospheric electrical circuit // J. Atmos. Terr. Phys. 1990. V. 52, N 1. P. 4–17.
7. Морозов В.Н., Палей А.А., Писанко Ю.В., Соколенко Л.Г., Зайнетдинов Б.Г. Экспериментальные и теоретические исследования влияния аэрозольных частиц субмикронного аэрозоля на электричество приземного слоя // Тр. ГГО. 2018. № 590. С. 27–47.
8. Зайнетдинов Б.Г., Соколенко Л.Г., Занюков В.В. Изменение электрических характеристик атмосферы в разных географических регионах в период ослабления хозяйственной деятельности весной 2020 г. // Метеорол. и гидрол. 2022. № 3. С. 47–54.
9. Огуляева Л.В. Шварц Я.М. Многолетний ход величин атмосферного электричества в приземном слое // Метеорол. и гидрол. 1987. № 7. С. 59–64.
10. Пхалатов Ю.А., Ужегов В.Н., Панченко М.В., Ипполитов И.И. Электрооптические связи в условиях дымового смога // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 10. С. 861–864.
11. Морозов В.Н. Влияние глобального распределения аэрозольных частиц на электрический потенциал ионосферы // Тр. ГГО. 2015. № 577. С. 106–112.
12. Hoppel W.A., Frick G. Ion-aerosol attachment coefficients on the steady-state charge distributions on aerosols in bipolar ion environment // Aerosol Sci. Technol. 1986. V. 5, N 1. P. 1–21.
13. Зайнетдинов Б.Г., Соколенко Л.Г. Результаты модернизации и расширения сети наблюдений за атмосферным электричеством // Тр. ГГО. 2018. № 589. С. 153–166.
14. Зайнетдинов Б.Г., Михайловский Ю.П., Соколенко Л.Г., Стерхов П.Л. Наземные и самолетные исследования электрических характеристик атмосферы в Советской и Российской Арктике. Прошлое, настоящее, будущее // Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Паулсен, 2020. С. 118–125.
15. Guo J.-P., Zhang X.-Y., Che H.-Z., Gong S.-L., An X., Cao Ch.-X., Guang J., Zhang H., Wang Y.-Q., Zhang X.-C., Xue M., Li X.-W. Correlation between PM concentrations and aerosol optical depth in eastern China // Atmos. Environ. 2009. V. 43, N 37. P. 5876–5886.
16. Shafer K., Harbusch A., Emeis S., Koepke P., Wiegner M. Correlation of aerosol mass near the ground with aerosol optical depth during two seasons in Munich // Atmos. Environ. 2008. V. 42, N 18. P. 4036–4046.

B.G. Zainetdinov, V.N. Morozov, V.V. Zaniukov. The influence of aerosol on elements of global atmospheric electrical circuit.

The influence of aerosol particles on the parameters of the global atmospheric electrical circuit is among important issues of the theory of atmospheric electricity. This paper presents a theoretical model of the effect of aerosol particles on the global atmospheric electrical circuit (GEC) under the fair weather. Surface aerosol is considered as a summand in the total atmospheric columnar resistance. Electric field generators which support the GEC are taken into account through the boundary condition as specified ionospheric potential. In addition to the theoretical model, experimental observations of electrical characteristics of the atmosphere and of the aerosol concentration are presented. The theoretical and experimental studies make it possible to estimate the concentration of submicron aerosol particles.