ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 499, № 1, с. 77–81

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.3

О КОРРЕЛЯЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ, СЛОИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ И НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В АТМОСФЕРЕ

© 2021 г. М. В. Шаталина[1,*], В. В. Клименко[1], член-корреспондент РАН Е. А. Мареев[1]

Поступило 25.02.2021 г.
После доработки 07.04.2021 г.
Принято к публикации 13.05.2021 г.

Представлены результаты наблюдений и обработки экспериментальных данных длительных (2012–2018 гг.) непрерывных измерений электрического поля, и проведено их сопоставление с метеорологическими параметрами. На основании результатов анализа данных натурных наблюдений показано, что среднесуточные значения электрического поля коррелируют со среднесуточным значением балла общей облачности независимо от сезона с коэффициентом корреляции –0.48, при этом коэффициенты корреляции между напряженностью электрического поля и температурой варьируются от –0.39 зимой до 0.41 летом. Теоретические оценки влияния слоистых облаков на электрическое поле в приземном слое подтверждают ослабление среднесуточных значений напряженности электрического поля до 70% поля хорошей погоды.

Ключевые слова: атмосферное электрическое поле, облака, глобальная электрическая цепь, ионосферный потенциал, натурные наблюдения

DOI: 10.31857/S2686739721070148

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся активные исследования взаимосвязи электрических параметров атмосферы и ее метеорологических характеристик [1–4]. Изучение взаимосвязи метеохарактеристик атмосферы с ее электрическим состоянием представляет особый интерес в связи с развитием моделей глобальной атмосферной электрической цепи (ГЭЦ). Синхронные наблюдения аэроэлектрического поля и температуры воздуха в среднеширотной геофизической обсерватории “Борок” [1] показали существенные корреляционные связи между измеряемыми параметрами на кратковременных периодах (1–100 с). Наблюдалась положительная корреляция вариаций температуры и напряженности поля в условиях неустойчивой стратификации (позднее утро–день) и отрицательная корреляция в условиях устойчивости и сильной инверсии (поздний вечер–ночь). Недавние исследования показали, что возмущения источников глобальной цепи (области грозовой активности) имеют гораздо большее влияние на основные характеристики цепи, чем изменений проводимости в нагрузочной части цепи (области хорошей и нарушенной погоды) [2–4]. Тем не менее вопрос о вкладе в ГЭЦ вклад областей, покрытых облаками, которые составляют более половины земного шара, остается недостаточно исследованным. В целом влияние регионов, занятых облаками на электрические процессы в атмосфере, представляет значительный интерес [3, 6, 7]. В прямых экспериментах в работе [8] наблюдалось снижение напряженности электрического поля в присутствии искусственного пароводяного облака. Статистический анализ большого массива данных измерений квазистатического электрического поля, проведенный в центре Карнеги (Флорида, США) [9], также показал, что сплошная облачность уменьшает напряженность электрического поля в приземном слое. Современные детальные исследования [10] роли слоистых облаков в глобальной электрической цепи подтвердили потенциальную роль облаков типа Nimbostratus в качестве генератора тока и облаков типа Stratus в качестве резисторов.

В настоящей статье представлены результаты наблюдений и обработки экспериментальных данных длительных (2012–2018 гг.) непрерывных измерений напряженности электрического поля с помощью сети электростатических флюксметров, расположенной в Нижегородском регионе, и подробно описанной в работе [11], и проведено их сопоставление с метеорологическими параметрами для периодов облачной погоды. Обширный архив метеорологических данных [12] позволил

[1] *Институт прикладной физики Российской академии наук, Н. Новгород, Россия*
**E-mail: aries@ipfran.ru*

осуществить сравнение длинных рядов среднесуточных значений электрического поля с рядами среднесуточных значений температуры и облачности в периоды, когда наблюдались облака типа Stratocumulus, Sc, Stratus, St, а также Cumulus, Cu, при этом отсутствовали мощные конвективные облака, типа Cumulonimbus, Cb, в присутствии которых наблюдаются сильные электрические поля, а также грозовые разряды, т.е. эти облака являются источниками ГЭЦ.

КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ СРЕДНЕСУТОЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ОБЛАЧНОСТИ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В результате анализа многолетних (2012–2018) наблюдений было установлено, что корреляции среднесуточных значений электрического поля со среднесуточной температурой приземного слоя атмосферы являются положительными летом и отрицательными зимой. На рис. 1 приведен пример записей вариаций среднесуточных нормированных значений напряженности атмосферного электрического поля E/E_0 (по данным наземных измерений), сопоставленных с данными нормированной температуры воздуха T (°C), и слоистой облачности C (в баллах) по данным метеорологического архива rp5.ru за 12 мес, начиная с декабря 2014 г. [12].

Коэффициент корреляции между средним электрическим полем и облачностью близок к –0.48 и не зависит от сезона. Коэффициенты корреляции между средним электрическим полем и температурой варьируются от –0.39 зимой до 0.41 летом. Это можно объяснить тем, что ясная погода связана летом с высокой температурой, а зимой – с низкой, при этом в ясную погоду амплитуда напряженности электрического поля больше, чем в облачную (за исключением периодов мощных конвективных событий). При расчете коэффициентов корреляции учитывались дни, в которых отсутствовали мощные конвективные облака типа Cumulonimbus, Cb.

Сравнение экспериментальных данных напряженности электрического поля и метеорологических параметров показывает, что ослабление среднесуточных значений электрического поля в среднем составляет около 70% в случае периодов нескольких дней, когда общая облачность состоит в основном из слоистых облаков Sc (рис. 2) и близка к 10 баллам. Такие периоды можно рассматривать в стационарном приближении. За период измерений 2012–2018 гг. наблюдалось 34 события такого типа.

Здесь также можно еще раз отметить, что схожие величины ослабления поля в присутствии облачного слоя (около 70%) наблюдались, согласно представленным данным, как по результатам анализа долгопериодных (в течение 25 лет измерений) вариаций электрического поля во Флориде [9], так и в экспериментах по исследованию влияния искусственного облака на электрическое поле [8]. Кроме того, в недавней работе [2] было подробно изучено влияние одиночного облака на амплитуду вариаций электрического поля, измеряемого в приземном слое. В предельном случае облака бесконечного радиуса оценки ослабления напряженности электрического поля совпадают с полученными в настоящей работе. Тем не менее в работах [2, 8, 9] не было расчетов величин относительного ослабления поля, поскольку приводились только абсолютные измеряемые или расчетные значения.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБЛАЧНОГО СЛОЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, ИЗМЕРЯЕМОЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Для того, чтобы оценить влияние облачного слоя на амплитуду напряженности электрического поля, измеряемой на поверхности земли, можно использовать дискретную (электротехническую) модель глобальной электрической цепи, позволяющую изучить механизмы воздействия возмущений проводимости атмосферы на процессы протекания в ней тока [13]. В моделях глобальной цепи грозовые облака рассматриваются и как источники тока [14], и как источники напряжения [15]. В настоящем исследовании рассматривается влияние элементов глобальной электрической цепи (облаков), не содержащих грозовые источники, поэтому для стационарных случаев можно сделать оценки влияния облачного слоя на электрическое поле в приближении постоянного ионосферного потенциала.

В условиях хорошей погоды сопротивление R_{fw} столба воздуха высоты H определяется как [16]:

$$R_{fw} \sim \frac{1}{\sigma_0}\int_0^H e^{z/H_0}dz, \tag{1}$$

где z – высота, $\sigma_0 = \text{const}$, H_0 – характерная высота роста проводимости (6.5 км). В присутствии облачного слоя сопротивление эквивалентной части цепи нарушенной погоды R_{dw} будет определяться по формуле:

$$R_{dw} = R_{fw1} + R_{cl} + R_{fw2} \sim$$
$$\sim \frac{1}{\sigma_0}\int_0^{h_1} e^{z/H_0}dz + \frac{1}{\sigma_c}\int_{h_1}^{h_2} e^{z/H_0}dz + \frac{1}{\sigma_0}\int_{h_2}^{H} e^{z/H_0}dz, \tag{2}$$

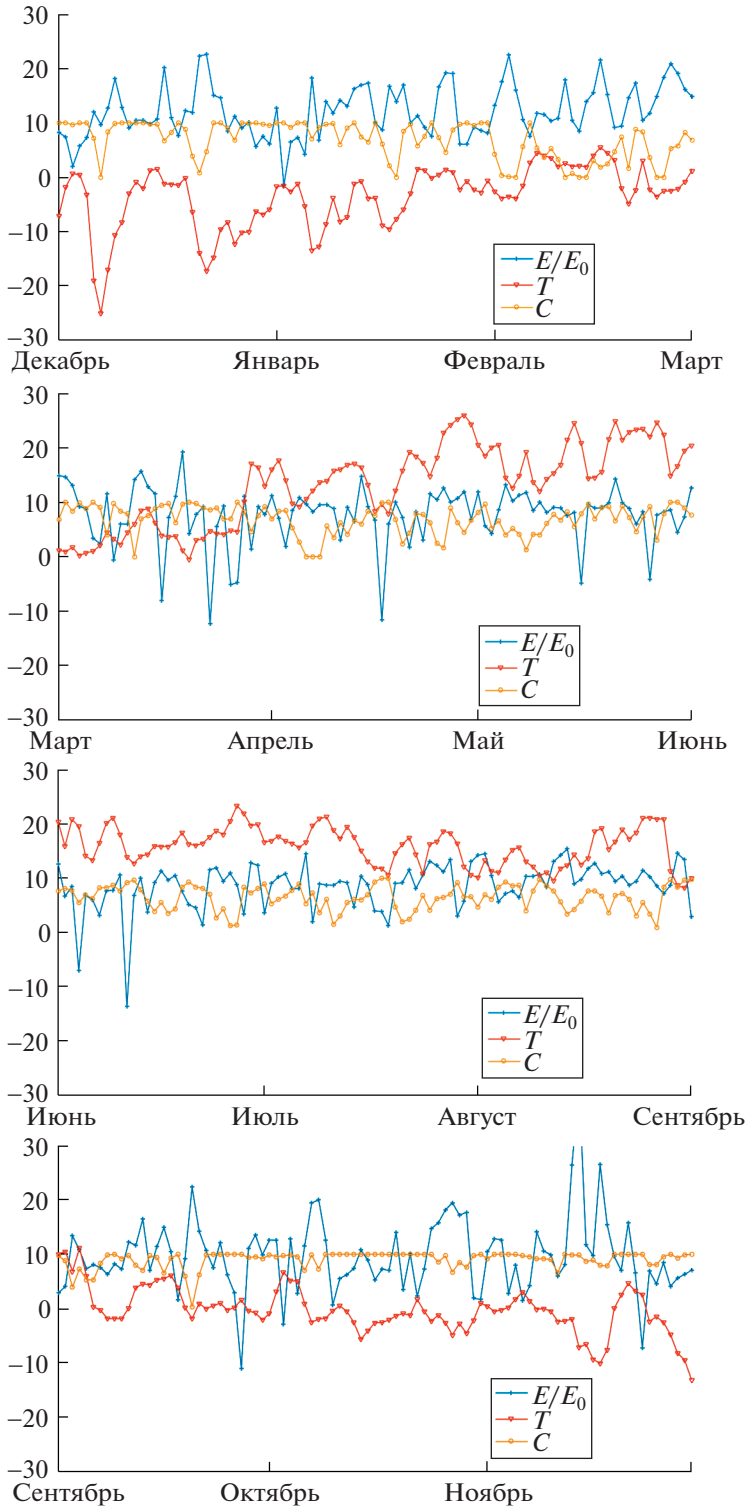

Рис. 1. Вариации среднесуточных нормированных значений напряженности электрического поля E/E_0, температуры T (°C) и облачности C (в баллах); сверху вниз: зима 2014–2015 гг., весна, лето и осень 2015 г.

где h_1 and h_2 – высота нижней и верхней границы облачного слоя соответственно, σ_c – константа проводимости облачного слоя, $\sigma_c < \sigma_0$ [15]. В приближении постоянного ионосферного потенциала $U = \text{const}$ из закона Ома с учетом того, что $\sigma E \sim I$ можно получить соотношение между электрическим полем нарушенной погоды E_{dw} и полем хорошей погоды E_{fw} в точке наблюдения:

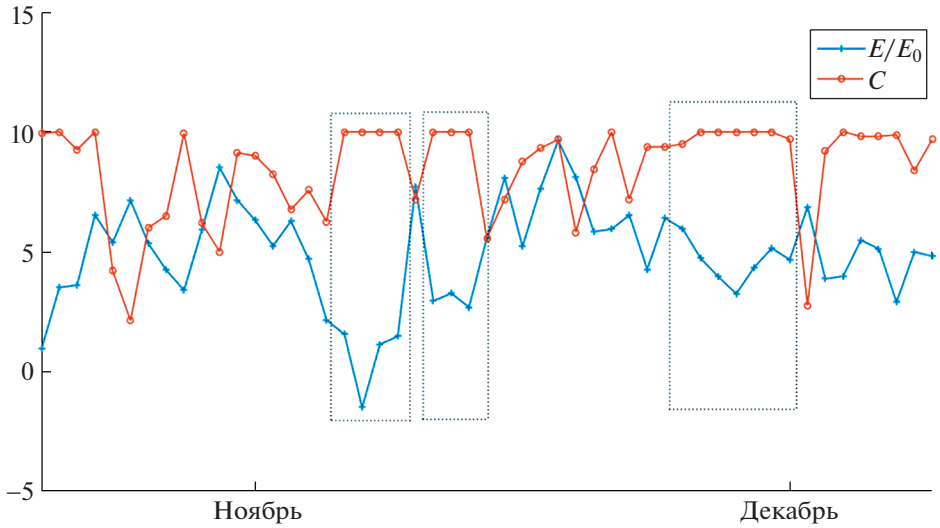

Рис. 2. Вариации нормированных среднесуточных значений напряженности электрического поля E/E_0 и облачности C (в баллах) в четвертом квартале 2014 г. Пунктирными линиями выделены периоды с облачностью около 10 баллов.

$$\frac{E_{dw}}{E_{fw}} = \left(1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_c} - 1\right) \cdot \left(\frac{e^{h_2/H_0} - e^{h_1/H_0}}{e^{H/H_0} - 1}\right)\right)^{-1}, \qquad (3)$$

т.е. ослабление поля обусловлено соотношением проводимостей внутри облака и окружающей атмосферы, а также соотношением толщины облака и атмосферного слоя. Из формулы (3) для облачного слоя толщиной 4 км, находящегося на высоте 2 км и проводимостью в 10 раз меньше чем у окружающей атмосферы (σ_c/σ_0 = 0.1), можно получить, что электрическое поле в точке наблюдения в присутствии облака будет составлять 69% от среднего значения электрического поля хорошей погоды, что близко к наблюдаемым в эксперименте характеристикам. Характерные значения для высоты облачного слоя и его проводимости приведены, например, в [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа экспериментальных данных долгосрочных непрерывных измерений электрического поля в Нижегородском регионе совместно с метеорологическими параметрами показано наличие значительной корреляции между среднесуточными значениями электрического поля, температуры и облачности. Значения коэффициента корреляции среднесуточных значений электрического поля со среднесуточной температурой приземного слоя атмосферы являются положительными летом и отрицательными зимой. Выявленная корреляция с баллом общей облачности носит противофазный характер и не зависит от сезона. Теоретические оценки влияния облачности на электрическое поле в поверхностном слое находятся в соответствии с экспериментальными результатами.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ипфран (проект № 0030-2021-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A.* Evaluation of the Atmospheric Boundary-Layer Electrical Variability // Boundary-Layer Meteorology. 2017. V. 167. № 2. P. 327–348.
2. *Harrison G., Marlton G., Aplin K.L., Nicoll K.A.* Shear-induced Electrical Changes in the Base of Thin Layer Cloud // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2019. 145 (725). P. 3667–3679.
3. *Baumgaertner A.J.G., et al.* On the Role of Clouds in the Fair-weather Part of the Global Electric Circuit // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. № 16. P. 8599–8610.
4. *Williams E., Mareev E.* Recent Progress on the Global Electrical Circuit // Atmos. Res. 2014. V. 135–136. P. 208–227.
5. *King M.D., et al.* Spatial and Temporal Distribution of Clouds Observed by MODIS Onboard the Terra and Aqua Satellites // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013. V. 51. № 7. P. 3826–3852.
6. *Odzimek A., Lester M., Kubicki M.* EGATEC: A New High-resolution Engineering Model of the Global Atmospheric Electric Circuit—Currents in the Lower Atmosphere // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. № D18. P. D18207.
7. *Harrison R.G., et al.,* Extensive Layer Clouds in the Global Electric Circuit: Their Effects on Vertical Charge Distribution and Storage / Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engi-

neering Sciences. 2020. V. 476. № 2238. P. 20190758, https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0758

8. *Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Бабаханов И.Ю.* Исследование влияния искусственного облака на атмосферное электрическое поле // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 2. С. 1–7.
9. *Lucas G.M., Thayer J.P., Deierling W.* Statistical Analysis of Spatial and Temporal Variations in Atmospheric Electric Fields from a Regional Array of Field Mills // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. V. 122. № 2. P. 1158–1174.
10. *Odzimek A., et al.* Electrical Signatures of Nimbostratus and Stratus Clouds in Ground-level Vertical Atmospheric Electric Field and Current Density at Mid-latitude Station Swider, Poland // Atmos. Res. 2018. V. 209. P. 188–203.
11. *Shatalina M.V., et al.* Experimental Study of Diurnal and Seasonal Variations in the Atmospheric Electric Field // Radiophys. Quantum Electron. 2019. V. 62. № 3. P. 183–191.
12. Архив метеорологических данных. URL: https://rp5.ru.
13. *Kalinin A.V., et al.* Stationary and Nonstationary Models of the Global Electric Circuit: Well-Posedness, Analytical Relations, and Numerical Realization // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 3. С. 355–364.
14. *Holzer R.E., Saxon D.S.* Distribution Electrical Conduction Currents in the Vicinity of Thunderstorms // J. Geophys. Res. 1952. V. 57. № 2. P. 207–216.
15. *Markson R.* Solar Modulation of Atmospheric Electrification and Possible Implications for the Sun–weather Relationship // Nature. 1978. V. 273. № 5658. P. 103–109.
16. *Rycroft M.J., et al.* New Model Simulations of the Global Atmospheric Electric Circuit Driven by Thunderstorms and Electrified Shower Clouds: The Roles of Lightning and Sprites // J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. 2007. V. 69. № 17–18. P. 2485–2509.

ON CORRELATION OF TEMPERATURE, LAYERED CLOUD AND ELECTRIC FIELD STRENGTH IN THE ATMOSPHERE

M. V. Shatalina[a,#], V. V. Klimenko[a], and Corresponding Member of the RAS E. A. Mareev[a]

[a] *Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

[#]*E-mail: aries@ipfran.ru*

This paper presents the results of observations and processing of experimental data of long-term (2012–2018) continuous measurements of the electric field, and compares them with meteorological parameters. Based on the results of the analysis of field observations, it was shown that the daily mean values of the electric field correlate with the mean daily total cloudiness score regardless of the season with a correlation coefficient of –0.48, while the correlation coefficients between the mean electric field and temperature vary from –0.39 in winter to 0.41 in summer. Theoretical estimates of the effect of stratus clouds on the electric field in the surface layer confirm the weakening of the daily mean values of the electric field strength to 70% of the fair-weather field.

Keywords: atmospheric electric field, clouds, global electric circuit, ionospheric potential, field observations