

Ю.Г. Осипов, И.А. Колесников, А.А. Манаев

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКАХ

G.G. Osipov, I.A. Kolesnikov, A.A. Manaev

SOME RESULTS OF ELECTRIC FIELD STRENGTH IN CUMULUS CLOUDS CALCULATIONS

В данной работе на основе методики расчета НЭП для цилиндрической и сферической модели объемного заряда (облака) [1] предложена схема расчета напряженности электрического поля (НЭП) в кучево-дождевом облаке. Выполнены расчеты напряженности электрического поля в кучево-дождевых облаках по радиолокационным данным, полученным с помощью метеорологического радиолокатора МРВК, установленного в аэропорту Пулково в Санкт-Петербурге. Результаты расчетов хорошо согласуются с полученными ранее экспериментальными данными НЭП в кучево-дождевых облаках [2–7].

Ключевые слова: кучево-дождевые облака, цилиндрическая и сферическая модель, напряженность электрического поля, радиолокационная отражаемость.

In this work the order of volume charge in cumulus clouds calculations is suggested. The calculations are based on cylinder and spherical model of electric field strength. The calculations are made for cumulus clouds with using of radiolocation results in Pulkovo Airport in Saint-Petersburg. The results of calculations are in good coordination with experimental data of electric field strength made before [2–5].

Key words: volume charge, cylinder and spherical model, electric field strength, radiolocation results.

Введение

Измерение напряженности электрических полей в грозовых облаках — сложная задача, и только небольшое количество реальных самолетных наблюдений дают представление об электрических полях кучево-дождевых облаков. Это позволяет говорить о важности и актуальности задачи, представленной в данной работе.

В данной работе на основе методики расчета НЭП для цилиндрической и сферической модели объемного заряда (облака) [1] предложена схема расчета напряженности электрического поля (НЭП) в кучево-дождевом облаке. Выполнены расчеты вертикального профиля НЭП в кучево-дождевых облаках с использованием радиолокационных данных, полученных с АМРК «МЕТЕОР 500С», установленного в аэропорту Пулково в Санкт-Петербурге. Результаты расчетов хорошо согласуются с полученными ранее экспериментальными данными НЭП в кучево-дождевых облаках [2–7].

Анализ результатов расчёта напряженности электрического поля по сферической и цилиндрической модели показал на незначительное различие в полученных данных и

позволил сделать вывод о возможности выполнения расчетов НЭП в кучево-дождевом облаке, как по цилиндрической, так и по сферической модели.

Выполнены расчёты максимальной напряженности электрического поля. Уточнена связь между радиолокационной отражаемостью, максимальной напряженностью электрического поля в кучево-дождевом облаке и опасными метеорологическими явлениями, наблюдаемыми в данный момент в облаке. Полученные результаты хорошо согласуются с аналогичными результатами, представленными в работе [1].

Предложенная в данной работе схема расчета НЭП в кучево-дождевом облаке позволяет получить вертикальные профили электрической напряженности в облаке и идентифицировать по значениям полученной максимальной НЭП опасные метеоявления в облаках.

Схема расчета НЭП в кучево-дождевом облаке для цилиндрического заряда

В работе рассмотрено кучево-дождевое облако, в котором объемные заряды распределены таким образом, что один из зарядов (положительный) находится в его верхней части, другой (отрицательный) — в нижней части [3–4, 7].

Каждый из зарядов занимает объем, который может быть аппроксимирован цилиндром высотой h , радиусом R и плотностью объемных зарядов $\rho(r, z)$. R и z — горизонтальная и вертикальная координаты. Высота нижней границы объемного заряда — z_1 , верхней — z_2 . При этом $h = z_2 - z_1$. В общем случае высота верхней границы нижнего заряда не обязательно совпадает с нижней границей верхнего заряда. Каждый из зарядов индуцирует противоположные по знаку заряды на поверхности земли и в ионосфере. Суммарная НЭП вычисляется как суперпозиция двух основных и четырех наведенных зарядов.

Рассмотрим сначала НЭП на оси цилиндра с положительным объемным зарядом. Выберем на его оси точку A на высоте z_A . При этом $z_1 \leq z_A \leq z_2$. Тогда положительно направленная составляющая напряженности $E_z^\uparrow(z_A)$ создается той частью положительного заряда, которая расположена ниже точки A . Часть заряда, находящаяся выше точки A , создает составляющую поля $E_z^\downarrow(z_A)$. Таким образом, в точке A суммарная напряженность

$$E_z(z_A) = E_z^\uparrow(z_A) + E_z^\downarrow(z_A). \tag{1}$$

Здесь и далее приводятся формулы, подробно изложенные в работе [1].

Согласно работе [1], составляющая $E_z^\uparrow(z_A)$ определяется из выражения

$$E_z^\uparrow(z_A) = \frac{\bar{\rho}}{2\epsilon\epsilon_0} \left(z_A - z_1 + R - \sqrt{(z_A - z_1)^2 + R^2} \right), \tag{2}$$

составляющая $E_z^\downarrow(z_A)$

$$E_z^\downarrow(z_A) = -\frac{\bar{\rho}}{2\epsilon\epsilon_0} \left(z_2 - z_A + R - \sqrt{(z_2 - z_A)^2 + R^2} \right), \tag{3}$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 — электрическая постоянная; $\bar{\rho}$ — объемная плотность заряда при условии $\rho(z) = \text{const}(z) = \bar{\rho}$.

Суммируя выражения (2) и (3), получаем

$$E_z(z_A) = \frac{\bar{\rho}}{2\varepsilon\varepsilon_0} \left(2(z_A - z_1) - h - \sqrt{(z_A - z_1)^2 + R^2} + \sqrt{(z_2 - z_A)^2 + R^2} \right), \quad z_1 \leq z_A \leq z_2. \quad (4)$$

Выражение (4) получено для интервала высот $z_1 \leq z_A \leq z_2$.

Если $z_A > z_2$, то $E_z(z_A) \equiv E_z^+(z_A)$.

$$E_z(z_A) = \frac{\bar{\rho}}{2\varepsilon\varepsilon_0} \left(h + \sqrt{(z_A - z_2)^2 + R^2} - \sqrt{(z_A - z_1)^2 + R^2} \right), \quad z_A > z_2. \quad (5)$$

Аналогично, для интервала высот $0 \leq z_A \leq z_1$ справедливо тождество $E_z(z_A) \equiv E_z^-(z_A)$.

$$E_z(z_A) = \frac{\bar{\rho}}{2\varepsilon\varepsilon_0} \left(-h + \sqrt{(z_2 - z_A)^2 + R^2} - \sqrt{(z_1 - z_A)^2 + R^2} \right), \quad 0 \leq z_A \leq z_1. \quad (6)$$

Для индуцированных зарядов зависимости могут быть рассчитаны по формулам, аналогичным выражениям (5) и (6).

Составляющая НЭП, создаваемая зарядом, индуцированным на земной поверхности, определяется выражением

$$E_z^*(z_A) = -\frac{\bar{\rho}}{2\varepsilon\varepsilon_0} \left(1 - \frac{z_0}{H} \right) \left(h + \sqrt{(z_1 + z_A)^2 + R^2} - \sqrt{(z_2 + z_A)^2 + R^2} \right), \quad (7)$$

где середины слоя заряда $z_0 = (z_2 + z_1)/2$; H — высота ионосферы.

Для заряда, индуцированного в ионосфере,

$$E_z^{**}(z_A) = -\frac{\bar{\rho}}{2\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{z_0}{H} \cdot \left(-h + \sqrt{(2H - z_1 - z_A)^2 + R^2} - \sqrt{(2H - z_2 - z_A)^2 + R^2} \right). \quad (8)$$

Полная вертикальная составляющая напряженности электрического поля, создаваемая положительным объемным зарядом, определяется суммой уравнений (7), (8) и, в зависимости от соотношений между z_A и z_1, z_2 , выражениями (4)–(6).

Аналогично рассчитывается полная составляющая НЭП, определяемая отрицательным зарядом.

Схема расчета НЭП кучево-дождевом облаке для сферического объемного заряда

Модель для сферически изотропного объемного заряда нашла широкое применение при расчетах электрических характеристик отдельных ячеек грозовых облаков. Для заряда в облаке $q(r)$ используют выражение

$$q(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \rho(r') dr', \quad (9)$$

где r' — текущая координата.

Соответственно, напряженность электрического поля будет определяться как

$$\vec{E}(r) = \frac{\int_0^r 4\pi r'^2 \rho(r') dr'}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}. \quad (10)$$

Зададим сферический объем радиусом R_c с постоянным по его сечению объемным зарядом $\rho(r) = \rho_0 = \text{const}(r)$. Тогда интеграл в числителе уравнения (9) при $r \leq R_c$ равен $q_r = 4/3 \pi \rho_0 r^3$, а при $r \geq R_c$ $q_R = 4/3 \pi \rho_0 R_c^3 = \text{const}(r)$.

Таким образом, решение разбивается на две части (внутри сферы и вне сферы):

$$\text{Если } [(z - z_0)^2]^{1/2} \leq R_c, \quad E_z(z) = \frac{\rho_0 (z - z_0)}{3\epsilon \epsilon_0}. \quad (11)$$

$$\text{Если } [(z - z_0)^2]^{1/2} \geq R_c, \quad E_z(z) = \frac{\rho_0 R_c^3}{3\epsilon \epsilon_0} \cdot \frac{(z - z_0)}{[(z - z_0)^2]^{3/2}}. \quad (12)$$

Для заряда, индуцированного на земной поверхности,

$$E_{z\text{изп}}(z) = -\frac{\rho_0 R_c^3}{3\epsilon \epsilon_0} \cdot \frac{\left(1 - \frac{z_0}{H_n}\right)(z + z_0)}{[(z + z_0)^2]^{3/2}}. \quad (13)$$

Для заряда, индуцированного в ионосфере,

$$E_{z\text{ин}}(z) = -\frac{\rho_0 R_c^3}{3\epsilon \epsilon_0} \cdot \frac{\frac{z_0}{H_n}(2H_n - z_0 - z)}{[(2H_n - z_0 - z)^2]^{3/2}}. \quad (14)$$

Естественно, суммарные значения составляющих напряженности, создаваемые положительным объемным зарядом, рассчитываются как

$$E_{z1}(z) = E_z(z) + E_{z\text{изп}}(z) + E_{z\text{ин}}(z). \quad (15)$$

Аналогично рассчитывается составляющая НЭП, определяемая отрицательным зарядом.

Расчет объемного заряда в облаке по данным радиолокационной отражаемости

При выводе уравнений (11)–(14) было задано условие равномерного распределения плотности объемного заряда ρ_0 по радиусу сферы (R_c).

Физически более правдоподобным и логичным является распределение, отражающее тот факт, что в центре сферы плотность объемного заряда максимальна, а уменьшение ее к периферии соответствует нормальному распределению

$$\rho(r) = \rho_0 \exp\left(-\frac{r^2}{R^2}\right), \quad (16)$$

где ρ_0 и R — параметры распределения.

Для определения этих параметров в работе [1] предлагается использовать следующие выражения:

$$R = r_2 \frac{\sqrt{\frac{20}{\ln 10}}}{\sqrt{z_0^* - z_{cp}^*}} \approx \frac{3r_2}{\sqrt{z_0^* - z_{cp}^*}}, \quad (17)$$

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{\pi^5}{\lambda^4 b}} 10^{\frac{z_0^*}{20} - 9} = \frac{B_1}{\lambda^2} \cdot 10^{\frac{z_0^*}{20}}, \quad (18)$$

где B_1 — размерный множитель, Кл·м⁻¹; z_0^* — максимальная отражаемость; $z_2^* = z_{cp}^*$, дБz; r_2 — в м.

При расчетах в [1] предлагается использовать значения $b = 4 \cdot 10^{11}$ м⁵·Кл⁻² и $B_1 = 2,8 \cdot 10^{-14}$ Кл·м⁻¹.

Для нахождения максимальной напряженности электрического поля в работе [1] приводится выражение

$$\vec{E}_{\max} \approx \frac{0,19\rho_0 R}{\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}, \quad (19)$$

где ρ_0 и R определяются из выражений (17) и (18).

Результаты расчетов электрической напряженности электрического поля в кучево-дождевом облаке

Расчеты напряженности электрического поля в кучево-дождевом облаке были выполнены по схеме расчета НЭП для цилиндрического и сферического объемного зарядов, изложенной выше.

Для расчета НЭП было выбрано кучево-дождевое облако за 12 августа 2012 г., и по мере его развития от облака без осадков до грозового облака рассчитывалась напряженность электрического поля.

Результаты расчета вертикального профиля НЭП в кучево-дождевом облаке по сферической и цилиндрической модели представлены на рис. 1 (в качестве примера для одного момента времени, когда наблюдалась гроза) и на рис. 2 — изменение

максимальной напряженности электрического поля, рассчитанные по сферической и цилиндрической модели для всего периода наблюдений. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что различия между этими способами расчетов НЭП незначительны, и расчеты напряженности электрического поля в кучево-дождевом облаке можно проводить как по сферической модели, так и по цилиндрической.

Как видно из анализа рис. 2, величина максимальной напряженности электрического поля в облаке является определяющей характеристикой метеоявлений, которые наблюдаются в облачности в данный момент времени: ливень, гроза (согласно [1], значение напряженности $E_{max} > 200 \text{ кВм}^{-1}$ свидетельствует о грозоопасности данного облака).

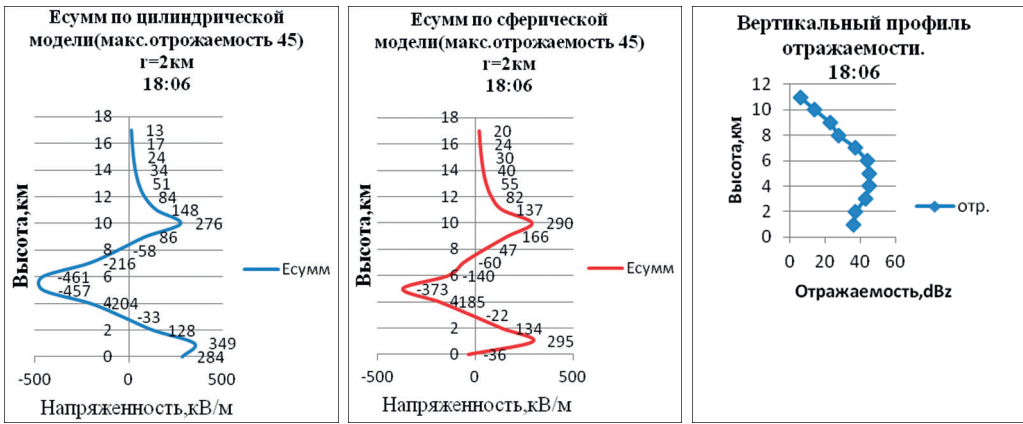


Рис. 1. Вертикальные профили суммарной НЭП за 12.09.2012 18:06.

Гроза с вероятностью более 90 % (на рис. квадратиком показано место вертикального зондирования облака). Центры положительного и отрицательного зарядов цилиндров и сфер были выбраны на одинаковых высотах: положительного — на 8 км, отрицательного — на 3 км.

Радиусы цилиндров и сфер $R(+, -) = 2 \text{ км}$; $\rho_0(+, -) = 1,76 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^3$; $H_{и} = 70 \text{ км}$

Сравнение максимальных значений напряженности электрического поля рассчитанные по разным моделям

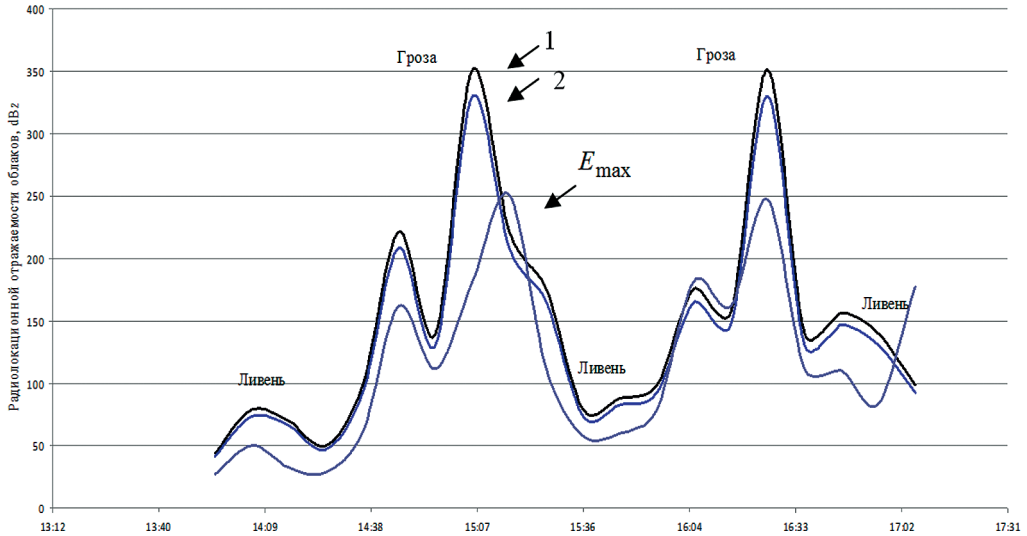


Рис. 2. Максимальные НЭП (E_{summ}) Кв/м, рассчитанные по цилиндрической (1), сферической (2) моделям и по формуле (19) для всего периода наблюдений

Связь между максимальной напряженностью электрического поля в кучево-дождевых облаках и радиолокационной отражаемостью

В работе [1] приводится зависимость между максимальной напряженностью электрического поля E_{max} в кучево-дождевом облаке (грозовом) и максимальной радиолокационной отражаемостью z_{max}^* .

В данной работе сделана попытка проанализировать такую зависимость по результатам расчетов максимальной НЭП в кучево-дождевых облаках и максимальной радиолокационной отражаемостью, полученной для этих случаев по данным АРМК.

На рис. 3 представлена зависимость между E_{max} и z_{max}^* по данным [1] (черным цветом) и по результатам расчетов, выполненных в настоящей работе (серым цветом). Как видно из рис. 3, зависимость между E_{max} и z_{max}^* получилась аналогично той, которая была получена в работе [1]. В работе [1] расчеты выполнялись для $b = 4 \cdot 10^{11} \text{ м}^5 \cdot \text{Кл}^{-2}$ и произвольных $R(1, 3, 5 \text{ км})$, в данной работе R и ρ_0 рассчитывались по формулам (17) и (18) соответственно. При этом расчеты ρ_0 выполнялись для двух значений b : $b_1 = 4 \cdot 10^{11} \text{ м}^5 \cdot \text{Кл}^{-2}$ — кривая a и $b_1 = 1 \cdot 10^{11} \text{ м}^5 \cdot \text{Кл}^{-2}$ — кривая b . Облака в случаях a и b отличались по мощности.

Продолжив работы по исследованию связи между E_{max} и z_{max}^* и грозоопасностью облака в зависимости от стадии развития облака можно будет, видимо, уточнить величину b и более определенно рассчитывать вертикальные профили напряженности электрического поля в кучево-дождевых облаках на различных стадиях их развития.

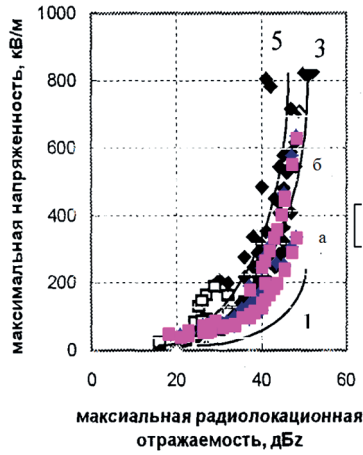


Рис. 3. Связь между z_{\max}^* и E_{\max}^* :

□ — отсутствие грозы, ◆ — гроза по наземным данным, кривые 1, 3 и 5 для $R = 1, 3$ и 5 км, соответственно — по данным [1], серые квадратики — результаты расчета, выполненные в данной работе, a — расчеты выполнялись при $b = 4 \cdot 10^{11} \text{ м}^5 \cdot \text{Кл}^{-2}$; b — при $b = 1 \cdot 10^{11} \text{ м}^5 \cdot \text{Кл}^{-2}$

Заключение

В данной работе на основе методики расчета НЭП для цилиндрической и сферической моделей объемного заряда (облака) [1] предложена схема расчета напряженности электрического поля (НЭП) в кучево-дождевом облаке.

Выполнены расчёты вертикального профиля напряженности электрического поля по сферической и цилиндрической моделям в кучево-дождевом облаке на разных стадиях его развития с использованием данных радиолокационной отражаемости с доплеровского МРЛ.

Результаты сравнения расчетов НЭП показали на незначительные различия в расчетах, выполненных по сферической и цилиндрической моделям для кучево-дождевого облака. Это позволило сделать вывод о возможности расчета НЭП для кучево-дождевого облака, как по цилиндрической, так и по сферической модели.

Уточнена связь между радиолокационной отражаемостью, максимальной напряженностью электрического поля кучево-дождевого облака и опасными метеорологическими явлениями, наблюдаемыми в данный момент в облаке. Показана сильная зависимость параметра b от мощности процессов развития кучево-дождевой облачности и тем самым появления опасных метеоявлений в облаке (гроза, град).

Схема расчета НЭП, предложенная в данной работе, позволяет получать вертикальные профили электрической напряженности в кучево-дождевом облаке и идентифицировать по значениям полученной НЭП опасные метеоявления в облаках. Дальнейшее совершенствование модели может быть использовано в оперативной работе для определения электрического состояния кучево-дождевых облаков и уточнения идентификации опасных явлений по НЭП.

Литература

1. *Бекряев В.И.* Молнии, спрайты и джеты. — СПб.: РГГМУ, 2009. — 96 с.
2. *Воскоян К.А., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Солонин А.С.* К вопросу о методике радиолокационных измерений интенсивности атмосферных осадков // Учёные записки РГГМУ, 2007, № 4, с. 63–70.
3. *Имянитов И.М., Чубарина Е.В.* Электричество свободной атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1965. — 240 с.
4. *Имянитов И.М.* Строение и условия развития грозовых облаков // Метеорология и гидрология, 1981, № 3, с. 4–17.
5. *Камалдина И.И.* Об изменении электрической структуры кучево-дождевых облаков в процессе их развития // Труды ГГО, 1968, вып. 225, с. 85–91.
6. *Кашилева Л.В.* Атмосферное электричество. — СПб.: РГГМУ, 2008. — 116 с.
7. *Облака и облачная атмосфера: Справочник / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана.* — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 647 с.