

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 551.515

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПОД ГРОЗОВЫМ ОБЛАКОМ В СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ И ЕГО МАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ

В. В. Хегай, В. П. Ким, А. В. Карелин

Представлены расчёты горизонтального распределения вертикального электрического тока на поверхности Земли, обусловленного электрическим взаимодействием грозового облака с поверхностью Земли в стационарных условиях, когда отсутствуют молниевые разряды. Электрическая структура грозового облака моделируется системой из двух, расположенных друг под другом, равных по абсолютной величине кулоновских зарядов разного знака с отрицательным зарядом внизу. Предполагается, что система «грозовое облако – Земля» находится в проводящей атмосфере, причём поверхность Земли является идеально проводящей. Получено, что на поверхности Земли вектор плотности вертикального электрического тока между грозовым облаком и поверхностью Земли направлен вверх в окрестности электрической оси облака с радиусом ~ 7 км. Вне этой окрестности вектор плотности вертикального электрического тока направлен вниз. Сопутствующий магнитный эффект вертикального тока на поверхности Земли максимален на расстоянии ~ 3 км от электрической оси облака, где величина магнитного возмущения составляет ~ 2 нТл при абсолютной величине зарядов грозового облака 10 Кл.

Ключевые слова: грозовое облако, электрическая цепь «грозовое облако – Земля», электрическое поле, вертикальный электрический ток, магнитный эффект вертикального тока.

Введение

Несмотря на довольно долгую историю, исследования грозового электричества по-прежнему не теряют свою актуальность и привлекают внимание исследователей [1 – 3]. Грозовые облака, Земля и окружающая их проводящая атмосфера составляют единую электрическую цепь, в которой непрерывно происходят различные физико-химические процессы, приводящие, в частности, к появлению молниевых разрядов и электрических зарядов на поверхности Земли: Земля в целом приобретает отрицательный электрический заряд величиной $\sim -5,7 \cdot 10^5$ Кл [4]. Даже в стационарных условиях, когда отсутствуют молниевые разряды различного типа, между грозовым облаком и поверхностью Земли за счёт конечной проводимости атмосферы непрерывно течёт электрический ток. Суммарное значение этого тока равно нулю, однако плотность вертикального тока на уровне поверхности Земли может иметь различные значения на разных расстояниях от электрической оси облака.

В настоящей работе на основе решения уравнения непрерывности для плотности электрического тока проведён расчёт горизонтального распределения плотности вертикального электрического тока на поверхности Земли, обусловленного электрическим взаимодействием грозового облака с Землёй в стационарных условиях, а также магнитный эффект этого тока.

Постановка задачи и расчётные формулы

В простейшей модели электрическая структура типичного грозового облака представляется двумя объёмными зарядами одинаковой величины, но

противоположного знака, с положительным зарядом в верхней части облака и отрицательным зарядом в нижней (см., например, [5]). При этом центр нижнего отрицательного заряда располагается в интервале высот $2 \div 3$ км, а центр верхнего положительного заряда – на высотах $8 \div 12$ км, а величина каждого заряда по абсолютной величине составляет $5 \div 25$ Кл.

Выберем цилиндрическую систему координат (r, φ, z) с началом координат, размещённым на поверхности Земли, и вертикальной осью z , проходящей через центры зарядов облака и являющейся электрической осью грозового облака (рис. 1).

Будем считать, что поверхность Земли является плоской и гладкой, а электрическая проводимость атмосферы σ зависит только от высоты z . В стационарном случае распределение электростатического потенциала Φ от облачных зарядов в области,

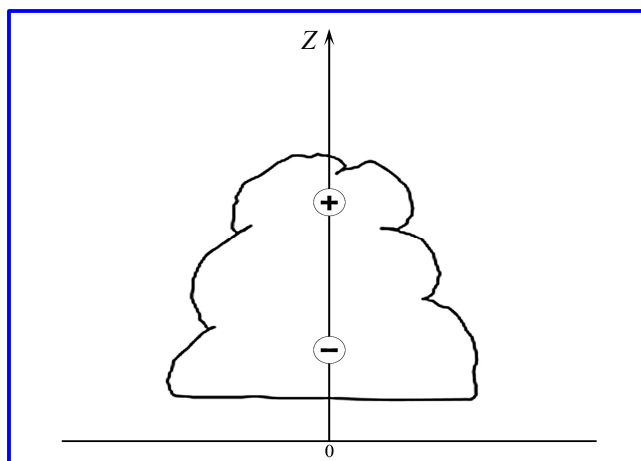


Рис. 1. Общая геометрия задачи

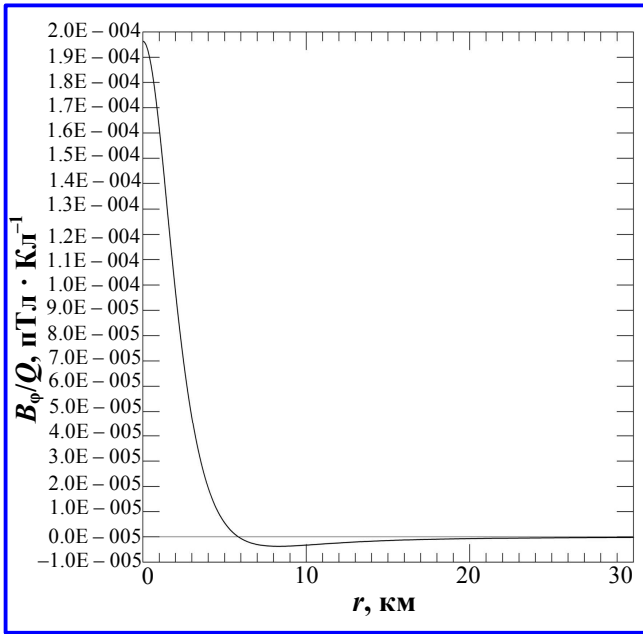


Рис. 2. Зависимость нормированной на Q плотности вертикального электрического тока на поверхности Земли от расстояния до электрической оси облака

примыкающей к его нижней границе вплоть до поверхности Земли, можно найти из уравнения непрерывности электрического тока, которое в нашем случае можно представить в виде:

$$\text{div}(\sigma \nabla \Phi) = 0. \tag{1}$$

С учётом азимутальной симметрии задачи получаем следующее уравнение для потенциала Φ :

$$\partial^2 \Phi / \partial r^2 + (1/r) \partial \Phi / \partial r + (1/\sigma) \partial(\sigma \partial \Phi / \partial z) / \partial z = 0. \tag{2}$$

Будем полагать, что проводимость атмосферы ниже облака зависит от высоты z экспоненциально и имеет вид $\sigma = b \cdot \exp(z/h)$, где $b = 1 \cdot 10^{-13}$ См/м, а $h = 6,5$ км [6]. В этом случае решение уравнения (2) имеет вид:

$$\Phi = \int_0^\infty J_0(kr) [A_1(k) \exp(c_1 z) + B_1(k) \exp(c_2 z)] dk, \tag{3}$$

где J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка; A_1 и B_1 – коэффициенты; $c_1 = -1/(2h) - [1/(4h^2) + k^2]^{1/2}$; $c_2 = -1/(2h) + [1/(4h^2) + k^2]^{1/2}$. Коэффициенты A_1 и B_1 определяются граничными условиями задачи, которые имеют вид:

1. $\Phi = (Q/4\pi\epsilon_0) [(r^2 + (h_p - z_b)^2)^{-1/2} - (r^2 + (h_n - z_b)^2)^{-1/2}]$, при $z = z_b$.
2. $\Phi = 0$ при $z = 0$.

Здесь Q – абсолютная величина зарядов облака, h_p и h_n – высоты центров положительного и отрицательного зарядов соответственно; z_b – высота плоскости, расположенной непосредственно под облаком, на которой задаётся потенциал; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Потенциал поверхности Земли принят равным нулю. В этом случае из формулы (3) сразу же следует выражение в квадратурах для вертикальной компоненты электростатического поля на поверхности Земли:

$$\begin{aligned} E_z(r, z=0) &= -\partial \Phi(r, z=0) / \partial z = \\ &= -\int_0^\infty J_0(kr) [A_1(k)c_1 + B_1(k)c_2] dk \end{aligned} \tag{4}$$

Плотность вертикального электрического тока на уровне поверхности Земли определяется формулой

$$J_z = \sigma_0 E_z(r, z=0), \tag{5}$$

где σ_0 – проводимость атмосферы, при $z = 0$. Величина вертикального тока, протекающего через круговую окрестность точки $z = 0$, зависит от радиуса r этой окрестности и имеет вид

$$I_z(r) = \sigma_0 \int_0^{2\pi} \int_0^r E_z(r', z=0) r' dr' d\phi. \tag{6}$$

Вертикальный электрический ток будет создавать вокруг оси z азимутальное магнитное поле, значение которого можно найти с помощью формулы Био – Савара – Лапласа. Применительно к рассматриваемым условиям эту формулу можно записать в виде

$$B_\phi(r) = \frac{\sigma_0 \mu_0}{2\pi r} \int_0^{2\pi} \int_0^r E_z(r', z=0) r' dr' d\phi, \tag{7}$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Результаты и обсуждение

Ниже представлены результаты конкретных расчётов, в которых были приняты следующие значения исходных параметров: $h_n = 3$ км, $h_p = 8$ км и $z_b = 2$ км. На рис. 2 показана величина нормированной на абсолютную величину зарядов грозового облака Q плотности вертикального тока J_z на поверхности Земли ($z = 0$) в зависимости от расстояния до электрической оси облака r .

Из рисунка видно, что плотность вертикального тока максимальна на электрической оси грозового облака, электрический ток вдоль которой направ-

лен вверх. На расстоянии $r_0 \sim 6$ км плотность тока обращается в ноль и направление тока меняется на обратное, оставаясь таковым при всех $r > r_0$.

На рис. 3 представлена нормированная на Q величина вертикального тока I_z на уровне поверхности Земли, вытекающего из круговой окрестности точки $r = 0$ в зависимости от радиуса этой окрестности r .

С ростом r направленный вверх вертикальный ток быстро нарастает и достигает своего максимума при $r_0 \sim 6$ км (~ 39 мА, при $Q = 10$ Кл), а затем медленно стремится к нулевому значению, т. е. полный ток между грозовым облаком и Землей равен нулю.

На рис. 4 показана нормированная на Q величина азимутального магнитного поля B_ϕ , создаваемого вертикальным током на уровне поверхности Земли, в зависимости от r .

Магнитное поле направлено по часовой стрелке, если смотреть вверх, и имеет на расстоянии $R \sim 3$ км ярко выраженный максимум, величина которого при $Q = 10$ Кл составляет около 1,9 пТл.

Таким образом, электрический ток между грозовым облаком и Землей даже в стационарных условиях может произвести магнитный эффект на поверхности Земли под облаком, несмотря на то, что общая величина этого тока равна нулю.

Выводы

На основе решения уравнения непрерывности электрического тока проведён расчёт горизонтального распределения на поверхности Земли вертикального электрического тока, обусловленного электрическим взаимодействием между грозовым облаком и Землей в стационарных условиях, когда отсутствуют молниевые разряды.

Получено, что на поверхности Земли вектор плотности вертикального электрического тока между грозовым облаком и поверхностью Земли направлен вверх в окрестности электрической оси облака с радиусом ~ 7 км. Вне этой окрестности вектор плотности вертикального электрического тока направлен вниз. Несмотря на то, что полный ток между облаком и Землей равен нулю, он вызывает конечный магнитный эффект на поверхности Земли. Магнитное возмущение азимутально симметрично относительно электрической оси грозового облака, направлено по часовой стрелке, если смотреть вверх, и на расстоянии около 3 км от оси имеет ярко выраженный максимум, величина которого может достигать около 2 пТл при абсолютной величине зарядов облака $Q = 10$ Кл.

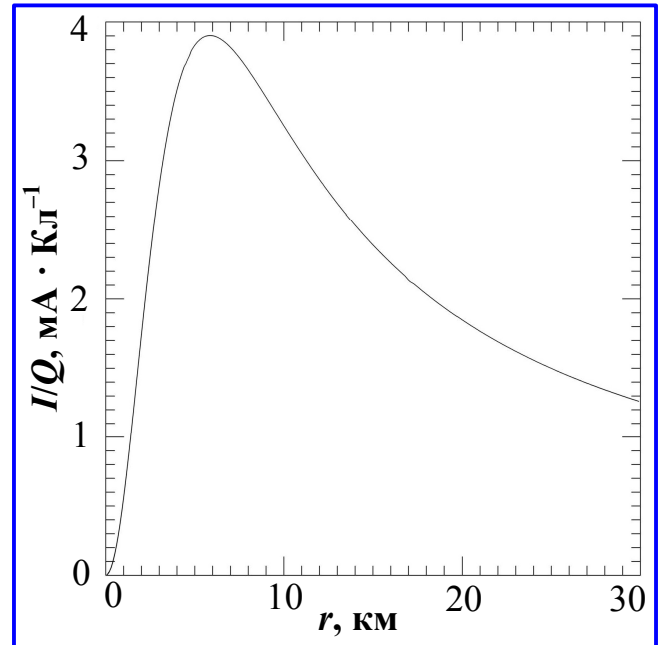


Рис. 3. Зависимость нормированной на Q величины вертикального электрического тока на поверхности Земли от расстояния до электрической оси облака

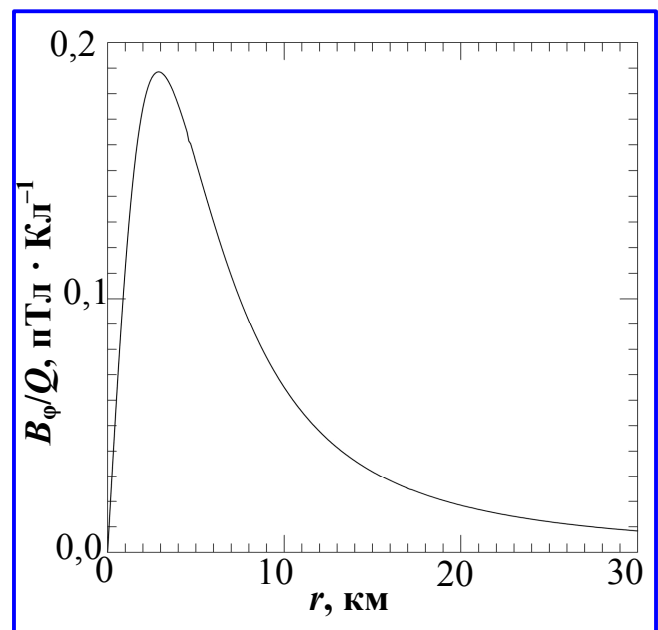


Рис. 4. Нормированная на Q величина азимутального магнитного поля, создаваемого вертикальным током на уровне поверхности Земли в зависимости от r

Работа выполнена при поддержке Программы № 28 фундаментальных исследований Президиума РАН «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

Литература

1. Боярчук К. А., Карелин А. В., Широков Р. В. Нейтральный кластер и его влияние на электромагнит-

- ные эффекты в атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 41. – № 4. – С. 537 – 549.
2. Боярчук К. А., Карелин А. В., Широков Р. В. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы / К. А. Боярчук и др. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – 204 с.
3. Карелин А. В. Механизм генерации электричества в грозовых облаках и тропических ураганах // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 118. – № 5. – С. 45 – 49.
4. Тверской П. Н. Атмосферное электричество / П. Н. Тверской. – Л. : Гидрометеиздат, 1949. – 252 с.
5. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество / Дж. А. Чалмерс. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 421 с.
6. Cole Jr. R. K., Pierce E. T. Electrification in the Earth's atmosphere for altitudes between 0 and 100 kilometers // J. Geophys. Res. – 1965. – V. 70. – No. 12. – P. 2735 – 2749: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1029/JZ070i012p02735>.

Поступила в редакцию 11.01.2018

Валерий Варламович Хегай, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, т. (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru.

Виталий Павлович Ким, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, т. (495) 851-97-80, e-mail: kimvp9@gmail.com. (ИЗМИРАН).

Александр Витальевич Карелин, доктор физико-математических наук, начальник отдела, т. (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru. (ФГУП ЦНИИМАШ).

DISTRIBUTION OF VERTICAL ELECTRIC CURRENT ON EARTH SURFACE UNDER A THUNDERSTORM CLOUD IN STEADY CONDITIONS AND MAGNETIC EFFECT OF VERTICAL CURRENT

V. V. Khagai, V. P. Kim, A. V. Karelin

The article presents the calculations of horizontal distribution of vertical electric current on the Earth surface caused by electrical interaction between a thunderstorm cloud and the Earth surface in steady conditions, when there are no lightning discharges. The electrical structure of a thunderstorm cloud is simulated using two Coulomb charges of opposite sign and equal magnitude placed one under the other (the negative charge is placed under the positive one). It is assumed that the 'thunderstorm cloud – Earth' system is in the conductive atmosphere, and the Earth surface is perfectly conducting. The obtained results show that on the Earth surface the vector of density of vertical electric current between a thunderstorm cloud and the Earth surface is directed upward in the area around the electrical axis of the cloud within a radius of ~7 km. Beyond this area the vertical electric current density vector is directed downward. The associated magnetic effect of vertical current on the Earth surface is maximal at a distance of ~3 km from the electrical axis of the cloud, where the magnetic perturbation magnitude is ~2 pT at absolute value of thunderstorm cloud charges being equal to 10 C.

Key words: thunderstorm cloud, 'thunderstorm cloud – Earth' circuit, electric field, vertical electric current, magnetic effect of vertical current.

References

1. Boyarchuk K. A., Karelin A. V., Shirokov R. V. Neutral cluster and influence thereof to electromagnetic effects in the atmosphere // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2005. – V. 41. – No. 4. – Pp. 537 – 549.
2. Boyarchuk K. A., Karelin A. V., Shirokov R. V. Baseline model of ionized atmosphere kinetics / K. A. Boyarchuk et al. – M. : FSUE 'NPP VNIIEМ', 2006. – 204 p.
3. Karelin A. V. Mechanism of electricity generation in thunderstorm clouds and tropical hurricanes // Matters of Electromechanics. VNIIEМ Proceedings. – 2010. – V. 118. – No. 5. – Pp. 45 – 49.
4. Tverskoi P. N. Atmospheric electricity / P. N. Tverskoi. – L. : Gidrometeoizdat (Hydrometeorology Publishing House), 1949. – 252 p.
5. Chalmers J. A. Atmospheric electricity / J. A. Chalmers. – L. : Gidrometeoizdat (Hydrometeorology Publishing House), 1974. – 421 p.
6. Cole Jr. R. K., Pierce E. T. Electrification in the Earth's atmosphere for altitudes between 0 and 100 kilometers // J. Geophys. Res. – 1965. – V. 70. – No. 12. – P. 2735 – 2749: [Electronic resource]. – Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/JZ070i012p02735>.

Valerii Varlamovich Khagai, Candidate of Physics and Mathematics (Ph.D.), Leading Researcher, tel.: +7 (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru.

Vitalii Pavlovich Kim, Candidate of Physics and Mathematics (Ph.D.), Leading Researcher, tel.: +7 (495) 851-97-80, e-mail: kimvp9@gmail.com.

(Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences).

Aleksandr Vitalevich Karelin, Doctor of Physics and Mathematics (D.Sc.), Head of Department, tel.: +7 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru. (FGUE TSNIIMASH).