

УДК 551.510.535

## ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ПРОНИКШЕГО В ИОНОСФЕРУ ТРОПОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, СВЯЗАННОГО С АФРИКАНСКОЙ ЗОНОЙ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. В. В. Хегай<sup>1, \*</sup>, Л. П. Корсунова<sup>1, \*\*</sup>, А. Д. Легенька<sup>1, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

\*e-mail: [hegai@izmiran.ru](mailto:hegai@izmiran.ru)

\*\*e-mail: [lpkors@rambler.ru](mailto:lpkors@rambler.ru)

\*\*\*e-mail: [leg@izmiran.ru](mailto:leg@izmiran.ru)

Поступила в редакцию 17.11.2020 г.

После доработки 14.01.2021 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

На основе расчетов исследовано проникновение в ночную ионосферу электрических полей в Африканской зоне грозовой активности. Эти поля обусловлены как кулоновскими зарядами грозовых облаков, так и электрическим током, генерируемым ими как элементами глобальной электрической цепи в рассматриваемой зоне. В первом случае электрическое поле создается суммой кулоновских полей от каждого из 600 грозовых облаков зоны, а во втором случае — направленным вверх усредненным суммарным током, величиной в 600 А (по 1 А от каждого грозового облака, когда оно рассматривается как элементарный квазистационарный точечный биполярный источник тока в рамках модели глобальной электрической цепи в Африканской зоне грозовой активности). Получено, что тропосферные кулоновские заряды создают в ионосфере незначительные электрические поля, которые по своей величине не превосходят 1 мкВ/м. Однако электрическое поле в ионосфере за счет суммарного тока от грозовых облаков в Африканской зоне грозовой активности может достигать на ионосферных высотах ~0.2 мВ/м в ночных условиях зимой в период низкой солнечной активности.

DOI: 10.31857/S0016794021040064

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Грозовое облако (ГО) является мощным источником кулоновского электрического поля и молниевых разрядов в приземной атмосфере, которые обеспечивают поддержание отрицательного электрического заряда Земли и глобального атмосферного электрического поля (см. работу [Имянитов и Шифрин, 1962]). Простейшая электрическая модель грозового облака представляет его в виде двух объемных разноименных кулоновских зарядов, расположенных по вертикали друг под другом, как это принято в исследованиях [Chalmers, 1967; Френкель, 2007]. Обычно вверху находится положительный заряд, а внизу — отрицательный. В типичном грозовом облаке центр отрицательного заряда расположен на высотах 2–4 км, а центр положительного заряда — на высотах 8–12 км согласно работам [Uman, 1969; Weisberg, 1976], но в так называемом “гигантском” грозовом облаке (ГГО) центр положительного заряда может находиться на высоте ~18 км. Абсолютная величина электрических зарядов ГО оценивается

для обычного ГО от 5 до 25 Кл, а в ГГО она может превышать 50 Кл, что следует из работ [Malan, 1963; Kazemir, 1965].

На основе модельных вычислений в работе [Park and Dejnakarindra, 1973] было показано, что электрическое поле кулоновских зарядов ГГО при определенных условиях в заметной мере проникает в ночную ионосферу высоких и средних широт и максимальная величина проникшего поля может составлять ~0.65 мВ/м. Однако, в работе [Park and Dejnakarindra, 1973] пренебрегалось ионосферной проводимостью Педерсена выше 150 км. При ее учете величина поля от ГГО на ионосферных уровнях получается более чем в 2 раза меньше, как это показано в работе [Kim and Hegai, 2015].

Одна из самых активных зон грозовой активности Земли расположена в тропической области Африки. В период зимы в северном полушарии она расположена в географическом широтно-долготном секторе приблизительно от 10° до 30° S и от 10° до 50° E и лежит достаточно далеко к югу

от магнитного экватора (магнитное наклонение поля  $I = 0$ ), см., в частности, работы [Brooks, 1925; Crichlow et al., 1971] и рис. 8 работы [Kartalev et al., 2006]. В этой зоне одновременно может находиться около 600 грозовых облаков. Представляет интерес исследовать вопрос о проникновении электрического поля такого массива грозовых облаков в ионосферу. Этот вопрос ранее был рассмотрен в рамках общей модели глобальной электрической цепи (ГЭЦ) в работе [Hays and Roble, 1979]. Авторы получили, что суммарный ток, текущий вверх от всех грозовых облаков в Африканской зоне грозовой активности (АЗГА, далее всюду – суммарный ток АЗГА), вызывает появление в ионосфере поперечного относительно геомагнитного поля электростатического электрического поля и его максимальная напряженность может достигать  $\sim 0.3$  мВ/м. Исходным (и ключевым) моментом этой модели является представление тока грозовых облаков совокупностью усредненных единичных квазистационарных источников вертикального электрического тока, определенным образом распределенных в атмосфере вокруг Земли. При этом модель вычисляет не сумму электрических полей на ионосферных высотах от всех отдельных токовых источников, а сглаженную усредненную картину суммарного тока АЗГА. Аналогичный подход используется, в частности, и в более поздней работе [Makin and Ogawa, 1984], см. также статью [Davydenko et al., 2004].

В настоящей работе выполнен расчет распределения электрического поля на ионосферных высотах, обусловленного: а) системой кулоновских зарядов всех 600 грозовых облаков, расположенных в АЗГА (в виде суммы вкладов в поле от каждого ГО), а также б) суммарным током АЗГА – усредненным модельным представлением текущего вверх суммарного тока величиной в 600 А (по 1 А от одного грозового облака, когда каждое грозовое облако рассматривается как элементарный квазистационарный точечный биполярный источник тока в рамках модели ГЭЦ в области АЗГА) для 600 грозовых облаков, одновременно находящихся в области АЗГА. При этом никакие нестационарные процессы в работе не рассматриваются, а исследование проводится в рамках электро- и токистатики (см., в частности, работу [Мареев, 2010]).

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для определения электрического поля, создаваемого в ионосфере кулоновской системой электрических зарядов массива из 600 грозовых облаков, расположенных в Африканской зоне грозовой активности, мы сначала определим электрическое поле за счет одного ГО, а затем искомое поле найдем как векторную сумму этих по-

лей от всех облаков. При этом будем считать, что все грозовые облака имеют одинаковую дипольную электрическую структуру и равномерно распределены в области их расположения, которую будем аппроксимировать прямоугольником с размерами 2000 км и 3000 км соответственно в меридиональном и зональном направлениях с центром в географической точке ( $20^\circ$  S,  $25^\circ$  E), что соответствует зимнему сезону.

В качестве системы координат для вычисления электрического поля над отдельным ГО естественно принять цилиндрическую систему координат  $(r, \varphi, z)$ , начало которой поместим на поверхности Земли в точку пересечения ее с вертикальной электрической осью ГО, вдоль которой расположены центры положительного и отрицательного зарядов грозового облака. Ось  $z$  направим вертикально вверх. В стационарных условиях распределение электростатического поля над ГО до высоты 90 км может быть определено из уравнения непрерывности для электрического тока

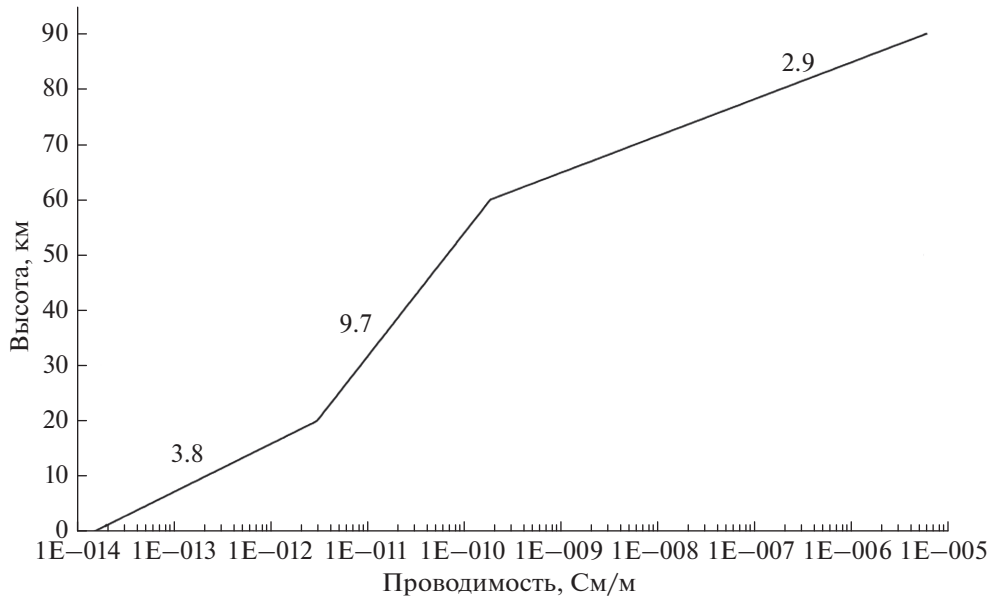
$$\operatorname{div} \mathbf{J} = 0, \quad (1)$$

при этом

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \operatorname{grad} \varphi, \quad (2)$$

где  $\mathbf{J}$  – вектор плотности электрического тока;  $\sigma$  – электрическая проводимость атмосферы;  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\varphi$  – электростатический потенциал.

Выше 90 км, в силу значительно более высокой величины проводимости ионосферы вдоль геомагнитных линий по сравнению с величиной проводимости поперек геомагнитных линий, геомагнитные силовые линии для электрических полей с характерными поперечными относительно геомагнитного поля размерами более нескольких км можно считать эквипотенциальными (см., например, статью [Farley, 1960]). Таким образом, электростатический потенциал выше уровня 90 км по высоте полностью определяется распределением потенциала на высоте 90 км. Далее мы принимаем, что геомагнитное поле  $\mathbf{B}$  является вертикальным. Учет наклона магнитного поля со срединной точкой зоны АЗГА с географическими координатами ( $20^\circ$  S,  $25^\circ$  E) в соответствии с работами [Denisenko et al., 2018; Хегай, 2020], может быть выполнен умножением полученной величины поля на фактор  $|\sin I|$ , где  $I$  – величина магнитного наклона в точке ( $20^\circ$  S,  $25^\circ$  E), равная примерно  $-60^\circ$ , и  $|\sin I| \cong 0.866$ . Более того, даже в самой северной точке границы зоны АЗГА (наиболее близкой к магнитному экватору), географические координаты которой в принятой нами модели определяются как  $8.76^\circ$  S и  $25^\circ$  E, величина  $I \cong -44^\circ$ , тогда  $|\sin I| \cong 0.7$ . Из рисунка 8 работы [Kartalev et al., 2006], на котором зеленой линией показан магнитный экватор, где  $I = 0$  и зона АЗГА



**Рис. 1.** Принятый высотный профиль атмосферной проводимости. Цифры у профиля дают значения характерного масштаба экспоненциально изменяющейся проводимости для каждой секции в км.

для рассматриваемых нами зимних условий, хорошо видно, что вся зона АЗГА лежит достаточно далеко от магнитного экватора. Таким образом, применение модели расчета в приближении вертикального геомагнитного поля с указанной последующей коррекцией в данном случае можно считать вполне правомерным (более подробно см. работу [Хегай, 2020]).

Полагая, что проводимость атмосферы  $\sigma$  изотропна и зависит только от  $z$ , можно получить из уравнения (1) с учетом азимутальной симметрии задачи следующее уравнение для потенциала  $\phi$ :

$$\partial^2\phi/\partial r^2 + (1/r)\partial\phi/\partial r + (1/\sigma)\partial/\partial z(\sigma\partial\phi/\partial z) = 0. \quad (3)$$

Для решения этого уравнения мы разделим высотный профиль проводимости от 0 до 90 км на три высотных сегмента, внутри каждого из которых аппроксимируем проводимость простой экспоненциальной функцией высоты  $z$  следующим образом (см. рис. 1):

$$\sigma_i = s_i \exp\{(z - z_{i-1})/h_i\}, \quad (4)$$

где  $0 \leq z \leq z_i$ ;  $i = 1, 2, 3$ ;  $s_1 = 1.5 \times 10^{-14}$  С/м;  $s_2 = s_1 \exp\{(z_1 - z_0)/h_1\}$ ;  $s_3 = s_2 \exp\{(z_2 - z_1)/h_2\}$ ;  $z_0 = 0$  км;  $z_1 = 20$  км;  $z_2 = 60$  км;  $z_3 = 90$  км;  $h_1 = 3.8$  км;  $h_2 = 9.7$  км;  $h_3 = 2.9$  км. Такая аппроксимация высотного профиля проводимости приблизительно соответствует модели проводимости, представленной в исследовании [Rycroft et al., 2007]. Для принятого профиля проводимости решение уравнения (3) можно получить в квадратурах

$$\phi_i(z_{i-1} \leq z \leq z_i) = \int_0^\infty J_0(kr)[A_i(k)\exp\{a_i(z - z_{i-1})\} + B_i(k)\exp\{b_i(z - z_{i-1})\}]dk, \quad (5)$$

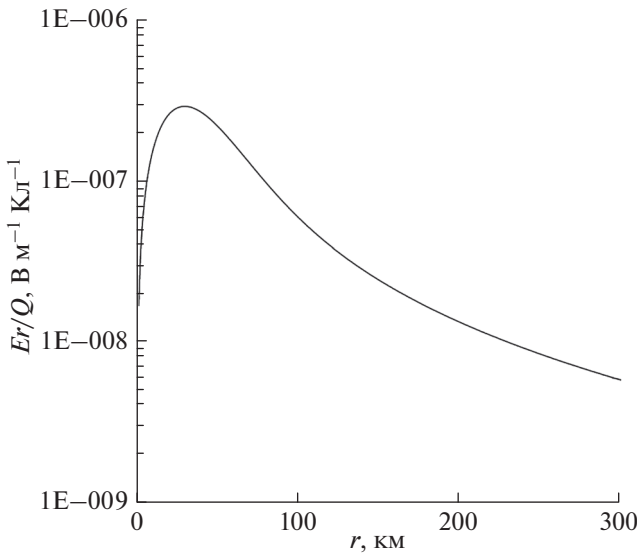
где  $J_0(kr)$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $a_i = -1/(2h_i) - [1/(4h_i^2) + k^2]^{1/2}$ ;  $b_i = -1/(2h_i) + [1/(4h_i^2) + k^2]^{1/2}$ ;  $A_i$  и  $B_i$  – коэффициенты, определяемые из граничных условий.

Эквипотенциальность геомагнитных силовых линий выше 90 км позволяет рассматривать ионосферу как тонкий проводящий слой с интегральной вдоль геомагнитной силовой линии проводимостью Педерсена  $\Sigma_p$ . При этом уравнение непрерывности для тока на высоте  $z = 90$  км можно записать в следующем виде (см. также работы [Denisenko et al., 2008; Heggai et al., 2015; Хегай, 2020]):

$$\sigma\partial\phi/\partial z = \Sigma_p[\partial^2\phi/\partial r^2 + (1/r)(\partial\phi/\partial r)]. \quad (6)$$

Для вычисления векторной суммы электрических полей, создаваемых на ионосферных высотах  $z \geq 90$  км кулоновскими зарядами всех 600 грозовых облаков, используем декартову систему координат  $(x, y, z')$ , начало которой поместим на поверхности Земли в центр прямоугольника ( $20^\circ$  S,  $25^\circ$  E), а оси  $x, y, z'$  направим соответственно на восток, на север и вертикально вверх.

Чтобы найти распределение электрического поля в ионосфере ( $z \geq 90$  км), которое обусловлено грозовыми облаками в зоне АЗГА как генераторами квазистационарного тока в качестве



**Рис. 2.** Зависимость от  $r$  нормированной на  $Q$  горизонтальной компоненты электрического поля  $Er$ , создаваемого в ночной ионосфере на высотах  $z \geq 90$  км кулоновскими зарядами типичного ГО.

составляющих элементов глобальной электрической цепи (ГЭЦ), мы примем, что средний эффективный электрический ток вверх, приходящийся на одно ГО составляет 1 А, как это указано в работах [Muhleisen, 1976; Мареев, 2010]. Тогда 600 грозовых облаков в области АЗГА обеспечивают направленный вверх ток величиной 600 А суммарно. Выберем полярную систему координат  $(r', \varphi', z'')$ , начало которой расположено на поверхности Земли в точке  $(20^\circ \text{ S}, 25^\circ \text{ E})$ , а ось  $z''$  направлена вертикально вверх. Далее мы будем полагать, что плотность направленного вверх суммарного вертикального тока на некоторой высоте над системой грозовых облаков АЗГА имеет в зависимости от  $r'$  гауссоподобное распределение следующего вида:

$$I(r') = I_0 \exp[-\ln 10 (r'/R_0)^2], \quad (7)$$

где  $I_0$  – значение плотности стационарного вертикального тока при  $r' = 0$ , а  $R_0$  – средний горизонтальный размер АЗГА ( $I_0 = 2.8 \times 10^{-10} \text{ А/м}^2$ ,  $R_0 = 1250 \text{ км}$ ).

Для определения электростатического потенциала над одним ГО из уравнения (5) наложим следующие граничные условия (см. также работу [Kim and Hegai, 2015]):

1.  $\varphi = (Q/4\pi\epsilon_0)[(r^2 + (z_b - h_p)^2)^{-1/2} - (r^2 + (z_b - h_n)^2)^{-1/2}]$  при  $z = z_b$ ,
2.  $\varphi$  – равномерно непрерывен при  $z = 20$  и  $60$  км,
3.  $\sigma \partial \varphi / \partial z = \Sigma_p [\partial^2 \varphi / \partial r^2 + (1/r)(\partial \varphi / \partial r)]$  при  $z = 90$  км,

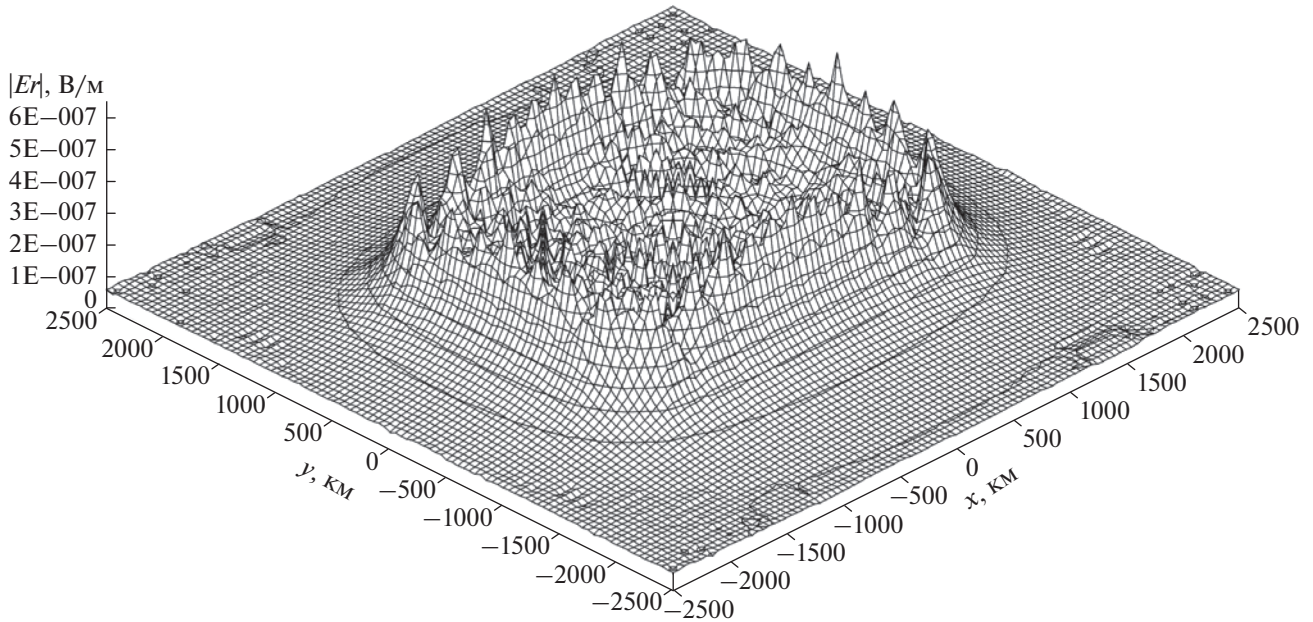
где  $Q$  – абсолютная величина кулоновских зарядов ГО;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $z_b$  – высота горизонтальной плоскости, расположенной непосредственно над ГО;  $h_p$  и  $h_n$  – высоты центров положительного и отрицательного объемных зарядов ГО соответственно. Первое граничное условие вытекает из принятой электрической модели грозового облака. Мы полагаем также, что ГО не влияет на проводимость атмосферы на высотах  $z \geq z_b$ .

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рисунок 2 показывает горизонтальную компоненту электрического поля  $Er = -\partial \varphi / \partial r$ , нормированную на  $Q$ , в зависимости от расстояния  $r$  в ночной ионосфере на высотах  $z \geq 90$  км для типичного ГО ( $h_n = 3$  км,  $h_p = 8$  км). Мы приняли, что  $z_b = 10$  км, а  $\Sigma_p = 0.4$  См (ночь, условия низкой солнечной активности). Как следует из рисунка, максимальное значение  $Er$  при  $Q = 10$  Кл в ночной ионосфере составляет  $\sim 0.3$  мкВ/м примерно в 30 км от электрической оси ГО.

Так как  $\Sigma_p$  является одним из ключевых параметров при расчетах величины электрического поля в ионосфере и ее увеличение уменьшает эффективность проникновения электростатического поля от поверхности земли или уровня тропосферы в ионосферу при прочих равных условиях (см. работы [Denisenko et al., 2008, 2018; Хегай, 2020]), остановимся на этом вопросе подробнее. В нашей постановке эта величина получается как сумма проводимостей, вычисленных для центральной точки зоны АЗГА и магнитосопряженной с ней точки, т.е.  $\Sigma_p = \Sigma_p + \Sigma_p^*$ , где  $\Sigma_p$  – интегральная проводимость Педерсена для географических координат точки  $(20^\circ \text{ S}, 25^\circ \text{ E})$ , а  $\Sigma_p^*$  – интегральная проводимость Педерсена для магнитосопряженной точки. Расчет  $\Sigma_p$  в соответствии моделями ионосферы IRI-2016 ([https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016\\_vitmo.php](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php)) и нейтральной атмосферы NRLMSIS-00 (<https://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/nrlmsise00.html>) показывает, что для условий низкой солнечной активности 2008 г. величина  $\Sigma_p(22.12.2008 \text{ г.}, 00 \text{ UT}) \cong 0.27$  См (декабрь), а  $\Sigma_p(22.07.2008 \text{ г.}, 00 \text{ UT}) \cong 0.56$  См (июль), тогда его средняя величина  $\Sigma_p \cong 0.4$  См. Отметим здесь, что проникновение квазистатического поля в ионосферу наиболее эффективно ночью в периоды низкой солнечной активности (см. работы [Hegai et al., 2015; Denisenko et al., 2018]).

Распределение напряженности горизонтального электрического поля, создаваемого в ночной ионосфере всеми 600 грозовыми облаками при  $Q = 10$  Кл, иллюстрирует рис. 3. Видно, что величина поля над внутренней частью зоны достигает всего 0.2 мкВ/м, что объясняется взаим-



**Рис. 3.** Распределение модуля напряженности горизонтального электрического поля ( $|Er| = [Ex^2 + Ey^2]^{1/2}$ ), создаваемого в ночной ионосфере кулоновскими зарядами всех 600 грозовых облаков АЗГА при  $Q = 10$  Кл. Ось  $x$  направлена на восток, а ось  $y$  — на север.

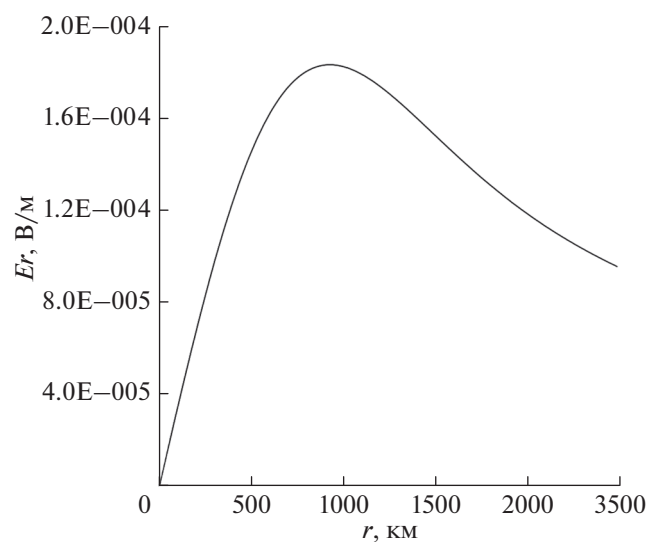
ной компенсацией полей от разных облаков. Поле максимально над границей зоны, где электрические поля от отдельных грозовых облаков складываются, образуя своеобразную корону, но по своей величине суммарное поле не превосходит  $0.65$  мкВ/м. Таким образом, кулоновские заряды всех 600 грозовых облаков АЗГА создают в ночной ионосфере незначительное электростатическое поле, величина которого менее  $1$  мкВ/м в любой точке над зоной (даже для вертикальных геомагнитных линий).

Для расчета распределения электрического поля  $Er$  в ночной ионосфере, которое обусловлено суммарным током АЗГА, соотношение (7) представляет собой нижнее граничное условие задачи при  $z = z_b$ , а остальные граничные условия остаются такими же, как в задаче для одного грозового облака. На рис. 4 показаны результаты расчета  $Er$  при  $\Sigma_p = 0.4$  См. Максимальное значение поля достигается на расстоянии  $\sim 950$  км от центра зоны и составляет  $\approx 0.18$  мВ/м.

Расчетная величина  $Er$  здесь получилась в предположении вертикальных силовых линий магнитного поля и значения  $\Sigma_p = 0.4$  См, однако учет наклона магнитного поля в точке ( $20^\circ$  S,  $25^\circ$  E) в соответствии с работами [Denisenko et al., 2018; Хегай, 2020], требует умножения полученной величины поля на фактор  $|\sin I|$ , где  $I$  — величина угла магнитного наклона в точке ( $20^\circ$  S,  $25^\circ$  E), равная примерно  $-60^\circ$ , и  $|\sin I| \cong 0.866$ . Таким образом, получаем  $Er^{\max} \cong 0.18$  мВ/м  $\times 0.866 \approx$

$\approx 0.16$  мВ/м. Это достаточно близко к полученным в работе [Haas and Roble, 1979] результатам, согласно которой максимальная величина горизонтальной компоненты поля над АЗГА может составить  $0.3$  мВ/м.

С другой стороны, в работе [Denisenko et al., 2019], посвященной математическому моделированию электрического поля в ионосфере в рамках



**Рис. 4.** Распределение электрического поля  $Er$  в ночной ионосфере над АЗГА, которое обусловлено суммарным электрическим током АЗГА.

ГЭЦ, получено, что для условий высокой солнечной активности в июле горизонтальное поле в ионосфере нигде не превосходит 10 мкВ/м для 19 UT. Полагая положение зоны АЗГА неизменным, получим (в соответствии с моделью IRI-2016) для 1989 г. высокой солнечной активности  $\Sigma_p(22.07.1989 \text{ г.}, 19 \text{ UT}) \cong 6.55 \text{ См}$  (июль). Тогда, по нашим расчетам, в зоне АЗГА для этого момента времени UT с учетом наклона геомагнитных линий  $E_r^{\max} \cong 0.011 \text{ мВ/м} \times 0.866 \approx 0.0095 \text{ мВ/м} = 9.5 \text{ мкВ/м}$ , что согласуется с представленным в работе [Denisenko et al., 2019] результатом. Величина поля в зоне АЗГА, по-видимому, в этом случае будет еще меньше, так как для летнего сезона зона АЗГА лежит значительно ближе к магнитному экватору (см. рис. 10 работы [Kartalev et al., 2006]).

Для ночных условий зимнего сезона 2008 г. низкой солнечной активности, как указано выше,  $\Sigma_p(22.12.2008 \text{ г.}, 00 \text{ UT}) \cong 0.27 \text{ См}$  (декабрь), и для вертикальных геомагнитных силовых линий  $E_r^{\max}|_{I=90^\circ} \cong 0.27 \text{ мВ/м}$ . Тогда в зоне АЗГА (за счет суммарного тока АЗГА) получим  $E_r^{\max} \cong 0.27 \text{ мВ/м} \times 0.866 \cong 0.23 \text{ мВ/м} \approx 0.2 \text{ мВ/м}$ .

## 5. ВЫВОДЫ

Проведен расчет электрических полей, создаваемых в ночной ионосфере над Африканской зоной грозовой активности (АЗГА) за счет кулоновских зарядов 600 грозовых облаков, одновременно расположенных в зоне, и суммарного тока АЗГА — усредненного модельного представления текущего вверх суммарного тока величиной в 600 А (по 1 А от каждого грозового облака, когда каждое грозовое облако рассматривается как элементарный квазистационарный точечный биполярный источник тока в рамках модели ГЭЦ в области АЗГА). Получено, что величина суммарного электрического поля, обусловленного кулоновскими зарядами грозовых облаков, очень мала и не превосходит 1 мкВ/м. В то же время электрическое поле, связанное с интегральным током АЗГА, может в максимуме достигать ~0.2 мВ/м для ночных зимних условий в период низкой активности Солнца.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— *Имянитов И.М., Шифрин К.С.* Современное состояние исследований атмосферного электричества // УФН. Т. 76. № 4. С. 593–642. 1962.  
<https://doi.org/10.3367/UFNR.0076.196204a.0593>

— *Мареєв Е.А.* Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. Т. 180. № 5. С. 527–534. 2010.  
<https://doi.org/10.3367/UFNR.0180.201005h.0527>

— *Френкель Я.И.* Теория явлений атмосферного электричества. М.: КомКнига. 160 с. 2007.

— *Хегай В.В.* Аналитическая модель сейсмогенного электрического поля по данным измерений в приземном слое атмосферы средних широт и расчет его величины на уровне ионосферы // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 60. № 4. С. 528–541. 2020.  
<https://doi.org/10.31857/S0016794020030086>

— *Brooks C.E.P.* The distribution of thunderstorms over the globe // Geophys. Mem. London. V. 3. Iss. 24. P. 147–164. 1925.

— *Chalmers J.A.* Atmospheric electricity. London: Pergamon Press. 515 p. 1967.

— *Crichlow W.Q., Davis R.C., Disney R.T., Clark M.W.* Hourly probability of world-wide thunderstorm occurrence / Telecommunications Research Report OT/ITS RR 12, U.S. Department of Commerce, Boulder, Colo., April 1971.

— *Davydenko S.S., Mareev E.A., Marshall T.C., Stolzenburg M.* On the calculation of electric fields and currents of meso-scale convective systems // J. Geophys. Res. V. 109. D11103. 2004.  
<https://doi.org/10.1029/2003JD003832>

— *Denisenko V.V., Boudjada M.Y., Horn M., Pomozov E.V., Biernat H.K., Schwingenschuh K., Lammer H., Prattes G., Cristea E.* Ionospheric conductivity effects on electrostatic field penetration into the ionosphere // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 8. Iss. 5. P. 1009–1017. 2008.  
<https://doi.org/10.5194/nhess-8-1009-2008>

— *Denisenko V.V., Nesterov S.A., Boudjada M.Y., Lammere H.* A mathematical model of quasistationary electric field penetration from ground to the ionosphere with inclined magnetic field // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 179. P. 527–537. 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.09.002>

— *Denisenko V., Rycroft M., Harrison G.* Mathematical simulation of the ionospheric electric field as a part of the Global Electric Circuit // Surv. Geophys. V. 40. Iss. 1. P. 1–35. 2019.  
<https://doi.org/10.1007/s10712-018-9499-6>

— *Farley Jr., D.T.* A theory of electrostatic fields in the ionosphere at nonpolar geomagnetic latitudes // J. Geophys. Res. V. 65. № 3. P. 869–877. 1960.  
<https://doi.org/10.1029/JZ065i003p00869>

— *Hays P.B., Roble R.G.* A quasi-static model of global atmospheric electricity. 1. The lower atmosphere // J. Geophys. Res. V. 84. № A7. P. 3291–3305. 1979.  
<https://doi.org/10.1029/JA084iA07p03291>

— *Hegai V.V., Kim V.P., Liu J.Y.* On a possible seismo-magnetic effect in the topside ionosphere // Adv. Space Res. V. 56. Iss. 8. P. 1707–1713. 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.034>

— [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016\\_vitmo.php](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php)

— <https://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/nrlmsise00.html>

— *Kartalev M.D., Rycroft M.J., Fuellekrug M., Papitashvili V.O., Keremidarska V.I.* A possible explanation for the dominant effect of South American thunderstorms on the Carnegie curve // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. Iss. 3–5. P. 457–468. 2006.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.05.012>

— *Kasemir H.W.* The thundercloud / Problems of Atmospheric and Space Electricity. Ed. *Coroniti S. C.* N.Y.: Elsevier. P. 215–235. 1965.

- *Kim V.P., Hegai V.V.* On the electric fields produced by dipolar coulomb charges of an individual thundercloud in the ionosphere // *J. Astron. Space Sci.* V. 32. № 2. P. 141–144. 2015.  
<https://doi.org/10.5140/JASS.2015.32.2.141>
- *Making M., Ogawa T.* Responses of atmospheric electric field and air-earth current to variations of conductivity profiles // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 46. Iss. 5. P. 431–445. 1984.  
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(84\)90087-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(84)90087-4)
- *Malan D.J.* *Physics of Lightning.* London: The English University Press Ltd., 176 p. 1963.
- *Muhleisen R.* The global circuit and its parameters / *Electrical Processes in Atmospheres.* Eds. Dolezalek H., Reiter R., Landsberg H. E. Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH & Co. KG., 1976. P. 467–476.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-85294-7\\_73](https://doi.org/10.1007/978-3-642-85294-7_73)
- *Park C.G., Dejnakintra M.* Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magnetosphere: 1. Middle and subauroral latitudes // *J. Geophys. Res.* V. 78. № 28. P. 6623–6633. 1973.  
<https://doi.org/10.1029/JA078i028p06623>
- *Rycroft M.J., Odzimek A., Arnold N.F., Fullekrug M., Kulak A., Neubert T.* 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-Terr. Phys.* V. 69. Iss. 17–18. P. 2485–2509. 2007.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.09.004>
- *Uman M.A.* *Lightning.* N.Y.: McGraw-Hill, 162 p. 1969.
- *Weisberg J.S.* *Meteorology: The Earth and its weather.* Boston: Houghton Mifflin. Company, 241 p. 1976.