

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 551.510.535

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ИОНОСФЕРУ С УЧЁТОМ АНИЗОТРОПИИ ПРОВОДИМОСТИ

В. В. Хегай, А. В. Карелин

*На основе модельных расчётов рассматривается проникновение в ионосферу электростатического поля от крупномасштабных наземных источников и исследуются влияние анизотропии проводимости и значений интегральной проводимости Педерсена на величину проникшего поля. Показано, что эффективность проникновения электростатических полей в ионосферу весьма низка, однако в случае крупномасштабных источников (характерный горизонтальный размер которых превышает 1000 км) и наличия у поверхности Земли локализованных вертикальных полей порядка кВ/м в ионосфере могут проявляться горизонтальные поля вплоть до единиц мВ/м, что достаточно для появления наблюдаемых вариаций плотности плазмы в ионосфере. При проникновении происходит преобразование вертикального поля вблизи поверхности Земли в горизонтальное на высотах ионосферы. Степень проникновения электрического поля в ионосферу определяется анизотропным характером проводимости выше 70 км и величиной интегральной проводимости Педерсена, при этом эффективность проникновения электростатического поля в ионосферу возрастает по мере уменьшения интегральной проводимости Педерсена. Благодаря анизотропии проводимости его амплитуда может достигнуть ~1 мВ/м на высотах ионосферы для крупномасштабных наземных источников.*

*Ключевые слова:* электростатическое поле, крупномасштабные источники, анизотропия проводимости, ионосфера, интегральная проводимость ионосферы.

### Введение

Вопрос о проникновении в ионосферу электрических полей от источников, локализованных в приземном слое атмосферы [0, 20 км] исторически впервые был рассмотрен в [1]. Из этой работы следует основной вывод: полной экранировки поля на высотах ионосферы не происходит, и величина проникшего в ионосферу поля может быть порядка 1 мВ/м. При этом происходит ослабление величины поля по сравнению с её значением на уровнях тропосферы в  $10^8$  раз, т. е. со 100 кВ/м до ~1 мВ/м (поле в 100 кВ/м может быть на уровнях тропосферы обусловлено гигантским грозовым облаком). С точки зрения атмосферного электричества, величина поля в 1 мВ/м означает, что она практически равна нулю. Однако для ионосферы такая величина поля уже значима и пренебречь ей нельзя. Как показали более тщательные расчёты [2], величина поля в ионосфере от гигантского грозового облака может быть ~0,3 мВ/м при заряде облака 50 кулон. Переоценка величины электрического поля в [1] обусловлена пренебрежением роли проводимости Педерсена выше 150 км. В работе [2] учитывается интегральная проводимость Педерсена (Pedersen)  $\Sigma_p$ , которая входит в верхнее граничное условие – непрерывность тока на уровне  $h = 90$  км.

В ионосфере, при обычных условиях в области хорошей погоды, величина поля, связанная с атмосферным электричеством, составляет приблизи-

тельно ~1 мкВ/м, т. е. в  $10^8$  раз меньше, чем величина обычного поля у поверхности Земли в области хорошей погоды (~100 В/м).

Однако, локализованные источники в области ниже верхней границы тропосферы ( $h \leq 20$  км), связанные с полями грозовых облаков [2], или крупномасштабные источники сейсмического происхождения [3] могут, при определенных обстоятельствах, привести к величинам поля в ионосфере от 0,2 до 1 мВ/м. Такие поля играют роль в перераспределении плазмы в ионосфере, но незначимы для области тропосферы.

Тензор проводимости атмосферного воздуха  $\hat{\sigma}$  находится в сложной зависимости от высоты, а именно: от поведения заряженных частиц на разных высотах. В нижних слоях атмосферы за счет столкновения заряженных частиц с преобладающим количеством нейтралов проводимость изотропна, но с ростом высоты изотропность тензора  $\hat{\sigma}$  исчезает. В более разряженной атмосфере, а тем более в ионосфере, количество заряженных частиц увеличивается по сравнению с нейтральной составляющей. Магнитное поле Земли приводит к упорядоченному дрейфу ионов и электронов по спирали вдоль силовых линий. Однако до определенной высоты концентрация нейтральных компонент еще значительна, и влияние последних на дрейф ионов велико. Здесь возникают, помимо продольной проводимости  $\sigma_0$ , так называемые

проводимость Педерсена  $\sigma_P = \sigma_1$  и проводимость Холла (Hall)  $\sigma_H = \sigma_2$ . В общем случае, с учетом наклона геомагнитных силовых линий, в правой декартовой системе координат с осью  $z$ , направленной вверх, и вектором геомагнитной индукции  $\mathbf{B}$ , лежащим в плоскости  $zy$ , тензор проводимости  $\hat{\sigma}$  имеет вид (см., например, [1])

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 \sin I & \sigma_2 \cos I \\ -\sigma_2 \sin I & \sigma_1 \sin^2 I + \sigma_0 \cos^2 I & (\sigma_1 - \sigma_0) \cos I \sin I \\ -\sigma_2 \cos I & (\sigma_1 - \sigma_0) \cos I \sin I & \sigma_1 \cos^2 I + \sigma_0 \sin^2 I \end{bmatrix},$$

где  $I$  – угол наклона геомагнитных силовых линий, т. е. угол между вектором  $\mathbf{B}$  и осью  $y$ .

На уровнях ионосферы проводимость вдоль геомагнитных силовых линий ( $\sigma_{\parallel}$ ) много больше, чем проводимость перпендикулярно им ( $\sigma_{\perp}$ ), и, следовательно, вектор электрического поля в ионосфере перпендикулярен геомагнитным силовым линиям. На высотах  $E$ -области ионосферы при рассмотрении различных эффектов поля наклоном геомагнитных силовых линий (в средних и высоких широтах), как правило, пренебрегают, т. е. работают в приближении вертикальных силовых линий геомагнитного поля ( $I = 90^\circ$ ). В этих условиях мы имеем только горизонтальную компоненту электрического поля. На больших высотах, например в  $F$ -области, необходимо учитывать и наклон силовых линий.

Из работы [4] (см., в частности, формулу (34) этой работы) следует, что учёт наклона магнитного поля приводит к тому, что величина компоненты  $E_r$  в ионосфере будет ослабляться на фактор  $\sin(I)$  по мере смещения источника поля на поверхности Земли от более высоких широт к экватору, т. е. величину  $E_r$ , рассчитанную в приближении вертикальных силовых линий геомагнитного поля ( $I = 90^\circ$ ), необходимо умножить на  $\sin(I)$  для получения корректных ее значений.

Таким образом, в силу анизотропии проводимости, связанной с геомагнитным полем, если на уровне поверхности Земли имеется только вертикальная компонента электрического поля ( $E_z$ ) от аксиально-симметричного локализованного источника, то на уровне ионосферы значимой будет только компонента поля, перпендикулярная геомагнитным силовым линиям ( $E_r$ ), и поле горизонтально на высотах  $E$ -области ионосферы. Тем не менее, во многих работах, рассматривающих вопросы математического моделирования атмосферно-электрических процессов, анизотропией проводимости пренебре-

гают (см., например, монографию [5]). Такой подход, вообще говоря, вполне оправдан лишь для диапазона высот от 0 до 70 км, в котором влияние магнитного поля Земли, создающего анизотропию проводимости, можно не учитывать.

В настоящей работе представлены расчеты проникновения электростатического поля на высоты ионосферы (в приближении  $I = 90^\circ$ ) от крупномасштабного наземного источника в ночных условиях при низкой активности Солнца с учетом анизотропии проводимости (выше уровня 70 км) и без ее учета и рассмотрено влияние величины интегральной проводимости Педерсена на максимальную величину проникшего в ионосферу поля.

### Постановка задачи

Зададим цилиндрическую систему координат  $(r, \varphi, z)$ , начало которой поместим на горизонтальной плоскости, расположенной на высоте  $z = h = 0$  км. Ось  $z$  направим вертикально вверх. Будем полагать, что распределение вертикальной компоненты электростатического поля  $E_z$ , обусловленного локализованным источником, на плоскости  $h = 0$  км является азимутально-симметричным и имеет следующую гауссоподобную зависимость от координаты  $r$

$$E_z = E_0 \exp[-\ln(10) \cdot (r/r_0)^2], \quad (1)$$

где  $E_0$  и  $r_0$  – соответственно максимальное значение  $E_z$  и радиус области возмущения поля, на котором исходное поле падает в 10 раз.

Для расчета распределения электрического потенциала воспользуемся формализмом, развитым в [1] для исследования проникновения электростатического поля грозового облака в ионосферу. Исходные уравнения, определяющие распределение электрического потенциала  $\Phi$  на высотах  $h \geq 0$  км в стационарном приближении, имеют вид

$$\nabla \mathbf{J} = 0; \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \hat{\sigma} \mathbf{E}; \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi, \quad (4)$$

где  $\mathbf{J}$  – плотность электрического тока;  $\hat{\sigma}$  – тензор электрической проводимости среды, а  $\mathbf{E}$  и  $\Phi$  – напряженность электростатического поля и его потенциал соответственно. Если предположить, что геомагнитное поле  $\mathbf{B}$  является вертикальным и тензор электрической проводимости  $\hat{\sigma}$  зависит только от  $z$ , то с учетом азимутальной симметрии задачи из уравнений (2) – (4) можно получить следующее уравнение для потенциала  $\Phi$ :

$$\partial^2 \Phi / \partial r^2 + (1/r) \partial \Phi / \partial r + (1/\sigma_P) \partial(\sigma_0 \partial \Phi / \partial z) / \partial z = 0, \quad (5)$$

где  $\sigma_P$  – локальная проводимость Педерсена;  $\sigma_0$  – продольная вдоль  $\mathbf{B}$  проводимость. Ниже 70 км электрическую проводимость будем считать изотропной ( $\sigma_0 = \sigma_P$ ). Решение уравнения (5) можно получить в квадратурах, если  $\sigma_0$  и  $\sigma_P$  зависят от высоты экспоненциальным образом (см., например, [3]).

На высотах ионосферы выше 90 км продольная проводимость  $\sigma_0$  достаточно высока и намного превосходит поперечную проводимость Педерсена  $\sigma_P$ , поэтому геомагнитные силовые линии можно считать эквипотенциальными. Это позволяет рассматривать ионосферную область выше 90 км как тонкий проводящий слой с интегральной по высоте проводимостью Педерсена  $\Sigma_P$ . Таким образом, уравнение непрерывности тока на горизонтальной плоскости  $h = 90$  км можно представить в виде

$$\sigma_0 E_z = \nabla_{\perp} (2\Sigma_P \mathbf{E}_{\perp}), \quad (6)$$

где  $\nabla_{\perp}$  – двумерный оператор градиента;  $\mathbf{E}_{\perp}$  – вектор горизонтального электрического поля, а  $\Sigma_P$  – интегральная по высоте проводимость Педерсена среды, вычисленная в высотном интервале от 90 до 1000 км. Множитель 2 перед  $\Sigma_P$  учитывает вклад в проводимость магнитосопряженной ионосферы другого полушария. Соотношение (6), которое является верхним граничным условием для уравнения (5), можно записать в явном виде

$$\sigma_0 \partial\Phi/\partial z = 2\Sigma_P (\partial^2\Phi/\partial r^2 + 1/r \partial\Phi/\partial r). \quad (7)$$

В случае, когда вертикальная компонента электрического поля  $E_z$  на верхней границе равна нулю, верхнее граничное условие (7) может быть записано в виде

$$\partial\Phi/\partial z = 0. \quad (8)$$

В качестве модельной проводимости на высотах от 0 до 90 км в работе принята представленная ниже на рис. 1 (близкая к [6] в области от 0 до 70 км, и в соответствии с [1] после 70 км) её кусочно-непрерывная экспоненциальная аналитическая аппроксимация применительно к ночным условиям.

Таким образом, конкретные расчеты распределения электрического поля были выполнены для следующих граничных условий:

- 1)  $-\partial\Phi/\partial z = E_0 \exp[-\ln(10) \cdot (r/r_0)^2]$  при  $z = 0$  км;
- 2) а)  $\sigma_0 \partial\Phi/\partial z = 2\Sigma_P (\partial^2\Phi/\partial r^2 + 1/r \partial\Phi/\partial r)$  при  $z = 90$  км;
- б)  $\partial\Phi/\partial z = 0$  при  $z = 90$  км;
- 3)  $\Phi$  – непрерывная функция при  $z \geq 0$ .

При этом рассматривались изотропный ( $\sigma_P = \sigma_0$  всюду) и анизотропный ( $\sigma_P \neq \sigma_0$  в интервале от 70 до 90 км) случаи для разных значений  $\Sigma_P$ .

### Результаты и обсуждение

Результаты расчета зависимостей нормированной на  $E_0$  горизонтальной компоненты электрического поля  $E_r$  от  $r$  в ионосфере на высотах  $h \geq 90$  км для  $r_0 = 1000$  км иллюстрирует рис. 2.

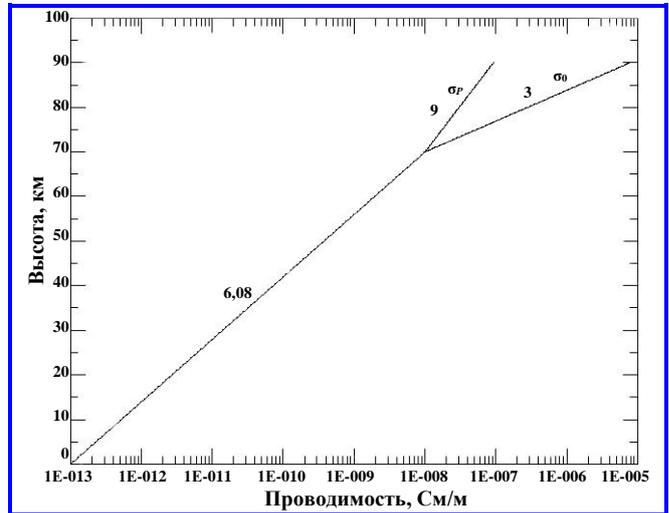


Рис. 1. Принятая в работе модель проводимости. Цифры у прямых обозначают характерный масштаб экспоненциально изменяющейся проводимости (в км) в соответствующем высотном интервале

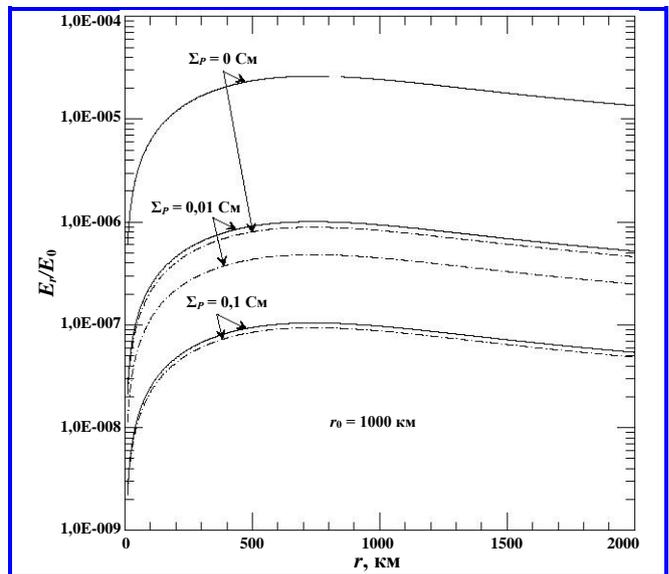
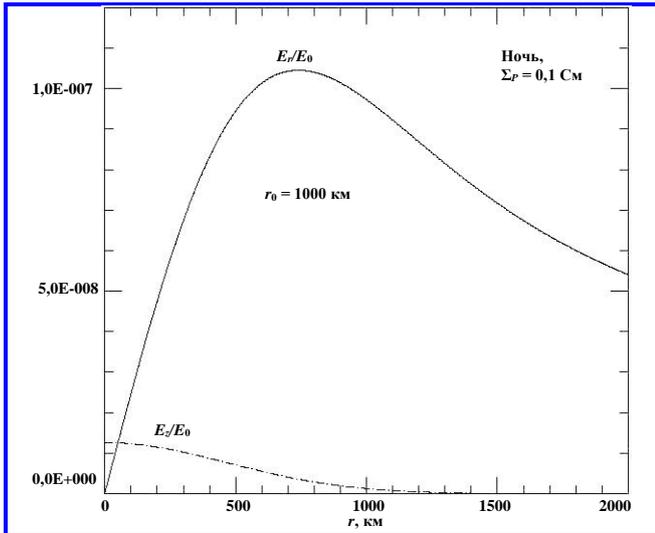
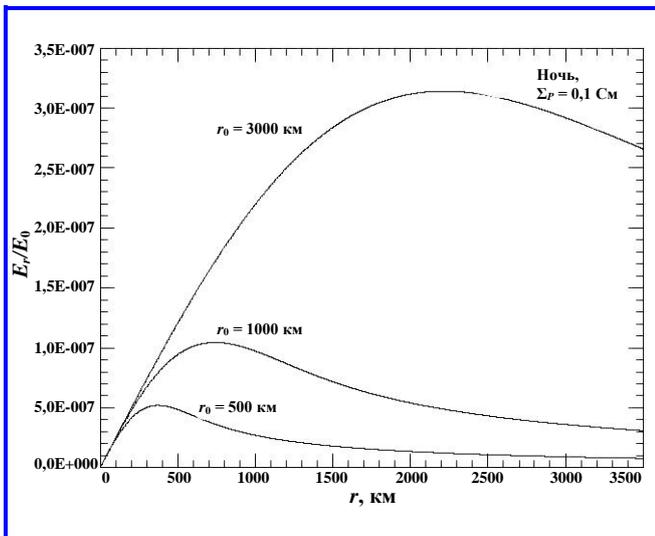


Рис. 2. Вычисленные зависимости от  $r$  величины напряжённости горизонтальной компоненты электростатического поля от крупномасштабного наземного источника ( $r_0 = 1000$  км) в ионосфере на высотах  $h \geq 90$  км, нормированные на  $E_0$ . Сплошные линии – с учетом анизотропии проводимости в интервале от 70 до 90 км, штрих-пунктир – без учёта анизотропии. Величины соответствующей интегральной проводимости Педерсена ( $\Sigma_P$ ) указаны у кривых



**Рис. 3.** Изменения с расстоянием  $r$  нормированных на  $E_0$  горизонтальной ( $E_r/E_0$ , сплошная линия) и вертикальной ( $E_z/E_0$ , штрих-пунктирная линия) компонентами электростатического поля от крупномасштабного наземного источника ( $r_0 = 1000$  км) в ионосфере на высоте  $h = 90$  км в ночных условиях при  $\Sigma_P = 0,1$  См с учетом анизотропии проводимости в высотном интервале от 70 до 90 км



**Рис. 4.** Изменения  $E_r/E_0$  по мере роста характерного масштаба  $r_0$  локализованного крупномасштабного наземного источника возмущения  $E_z$ , при одном и том же значении  $\Sigma_P = 0,1$  См

Видно, что с уменьшением  $\Sigma_P$  на порядок величины эффективность проникновения поля в ионосферу также возрастает примерно на порядок. При этом возрастает и роль анизотропии. Если при  $\Sigma_P = 0,1$  См (ночь, условия низкой солнечной активности) анизотропия увеличивает эффективность проникнове-

ния поля примерно на 11%, то при  $\Sigma_P = 0,01$  См поле возрастает более чем вдвое по сравнению с изотропным случаем (в ночной ионосфере внутри крупномасштабных плазменных пузырей [7]  $\Sigma_P$  может быть и менее 0,01 См [3]). В предельном случае, когда  $\Sigma_P = 0$ , поле возрастает более чем на порядок величины при учёте анизотропии. Укажем здесь также, что эффективность проникновения электростатического поля в ионосферу днем будет намного меньше, чем ночью, поскольку величина интегральной проводимости  $\Sigma_P$  дневной ионосферы примерно на два порядка больше, чем ночной.

Рис. 3 отражает соотношение между нормированными на  $E_0$  горизонтальной ( $E_r/E_0$ ) и вертикальной ( $E_z/E_0$ ) компонентами электростатического поля от крупномасштабного наземного источника ( $r_0 = 1000$  км) в ионосфере на высоте  $h = 90$  км в ночных условиях при  $\Sigma_P = 0,1$  См с учётом анизотропии проводимости в высотном интервале от 70 до 90 км.

Из рисунка следует, что максимальная величина горизонтальной компоненты  $E_r^{\max}$  оказывается более чем в 8 раз выше максимального значения вертикальной компоненты  $E_z^{\max}$ , а при  $\Sigma_P = 0,01$  См отношение компонент  $E_r^{\max}/E_z^{\max} \cong 83$ , т. е. возрастает на порядок. При этом  $\{E_z(\Sigma_P = 0,01 \text{ См}, r) - E_z(\Sigma_P = 0,1 \text{ См}, r)\} \cdot 100/E_z(\Sigma_P = 0,1 \text{ См}, r) \cong -3,5\%$ , т. е. величина  $E_z$  уменьшается всего на 3,5% по сравнению со случаем, когда  $\Sigma_P = 0,1$  См во всем диапазоне изменения  $r$ , откуда следует, что роль анизотропии особенно велика именно с точки зрения возрастания горизонтальной компоненты  $E_r$  по мере уменьшения  $\Sigma_P$ .

Рис. 4 иллюстрирует характер изменения  $E_r$  по мере роста характерного масштаба  $r_0$  локализованного наземного источника возмущения  $E_z$ , при одном и том же значении  $\Sigma_P = 0,1$  См.

Максимальное значение  $E_r^{\max}$  достигается на расстоянии  $r^{\max} \cong 0,739r_0$  и растёт линейно с ростом  $r_0$ . Анализ расчетных данных позволяет сделать вывод о том, что  $E_r^{\max}/E_0 \sim r_0/\Sigma_P$ , т. е. максимальная величина горизонтальной компоненты проникшего в ионосферу поля прямо пропорциональна исходной величине вертикального поля на поверхности Земли ( $E_0$ ) и характерному размеру источника ( $r_0$ ) и обратно пропорциональна величине интегральной проводимости Педерсена ( $\Sigma_P$ ).

Здесь следует отметить, что для возможных сейсмогенных источников возмущения вертикального поля  $E_z$  на поверхности Земли наблюдаются величины порядка единиц кВ/м [8, 9] и более [10], а характерный радиус зоны подготовки землетрясения  $r_D$ , определённый согласно Добровольскому [11],

составит, в зависимости от магнитуды землетрясения ( $M$ ),  $r_D(M = 6,3) \cong 512$  км,  $r_D(M = 7,0) \cong 1023$  км и  $r_D(M = 8,1) \cong 3040$  км соответственно. В таком случае при параметрах наземного источника  $E_0 = 1$  кВ/м,  $r_0 = r_D(M = 8,1) \cong 3040$  км и  $\Sigma_P = 0,1$  См в ионосфере можно ожидать  $E_r^{\max} \cong 0,3$  мВ/м.

Интересно, что интегральная проводимость Педерсена, взятая согласно [12], в соответствии с геофизическими характеристиками 28.03.1964 03 LT (местное время) в точке  $61^\circ$  с. ш. и  $148^\circ$  з. д. (что примерно соответствует положению эпицентра Аляскинского землетрясения, имевшего, по современным оценкам, магнитуду  $M = 9,3$ ), равна  $\sim 0,1$  См. В таком случае, из-за увеличения  $r_D(M = 9,3) \cong 9980$  км, возможно увеличение  $E_r^{\max}$  до 1 мВ/м, даже с учётом наклона геомагнитных линий, так как эпицентр лежит вблизи точки с  $I \cong 84^\circ$ , при этом  $\sin(84^\circ) \cong 0,99$ .

### Выводы

Эффективность проникновения квазистатических электрических полей в ионосферу весьма низка, однако в случае крупномасштабных источников ( $r_0 \geq 1000$  км) и наличия у поверхности Земли локализованных вертикальных полей ( $E_0$ ) порядка кВ/м в ионосфере могут проявляться горизонтальные поля ( $E_r$ ) до единиц мВ/м, что достаточно для появления наблюдаемых вариаций плотности плазмы в ионосфере.

При проникновении происходит преобразование вертикального поля вблизи поверхности Земли в горизонтальное на высотах ионосферы. Это связано со следующими обстоятельствами:

1) Проводимость тропосферного воздуха изотропна и много меньше проводимости Земли, поэтому в нижних слоях тропосферы в обычных условиях присутствует только вертикальное электрическое поле.

2) В ионосфере наоборот, проводимость вдоль силовых линий геомагнитного поля много больше проводимости поперёк них, поэтому в ионосфере электрическое поле поперёк силовых линий магнитного поля много больше продольной составляющей.

Степень проникновения электрического поля в ионосферу определяется величиной интегральной проводимости Педерсена (растёт по мере уменьшения  $\Sigma_P$ ) и анизотропным характером проводимости. Именно анизотропия проводимости может увеличить его амплитуду до 1 мВ/м на высотах ионосферы для крупномасштабных наземных источников.

*Работа выполнена при поддержке Программы № 28 фундаментальных исследований Президиума*

*РАН «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».*

### Литература

1. Park C. G., Dejnakarindra M. Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magnetosphere: 1. Middle and subauroral latitudes // J. Geophys. Res. – 1973. – V. 78. – № 28. – P. 6623 – 6633. – Режим доступа : <http://dx.doi.org/10.1029/JA078i028p06623>.
2. Kim V. P. etc. On the electric fields produced by dipolar coulomb charges of an individual thundercloud in the ionosphere / V. P. Kim, V. V. Hegai // J. Astron. Space Sci. – 2015. – V. 32. – № 2. – P. 141 – 144.
3. Hegai V. V. etc. On a possible seismomagnetic effect in the topside ionosphere / V. V. Hegai, V. P. Kim, J. Y. Liu // Adv. Space Res. – 2015. – V. 56. – Issue 8. – P. 1707 – 1713.
4. 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. Sol.-Terr. Phys. – 2018. – V. 179. – P. 527 – 537. – <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.09.002>.
5. Морозов В. Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ / В. Н. Морозов. – Санкт-Петербург: ООО «КРОМ», 2011. – 254 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. – № 12. – P. 2735 – 2749. – <http://dx.doi.org/10.1029/JZ070i012p02735>.
7. Huang C.-S., Foster J. C., Sahai Y. Significant depletions of the ionospheric plasma density at middle latitudes: A possible signature of equatorial spread F bubbles near the plasmapause // J. Geophys. Res. – 2007. – V. 112. – Iss. A5. – A05315. – <http://dx.doi.org/10.1029/2007JA012307>.
8. Hao J. etc. Progress in the research of atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes / J. Hao, T. M. Tang, D. R. Li // J. Earthquake Pred. Res. – 2000. – V. 8. – № 3. – P. 241 – 255.
9. Vershinin E. F. etc. Correlations of seismic activity with electromagnetic emissions and variations in Kamchatka region / E. F. Vershinin, A. V. Buzevich, K. Yumoto, K. Saita, Y. Tanaka // Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes. – Tokyo: TERRAPUB, 1999. – P. 513 – 517.
10. Zhao Y. etc. Earthquake lights: A very convincing evidence for energy transfer from earth to air / Y. Zhao, F. Qian // International Workshop on Seismo Electromagnetics. – Tokyo (Abstracts), 1997. – P. 242.
11. Dobrovolsky I. R. etc. Estimation of the size of earthquake preparation zones / I. R. Dobrovolsky, S. I. Zubkov, V. I. Myachkin // Pure Appl. Geophys. – 1979. – V. 117. – № 5. – P. 1025 – 1044.
12. Ionospheric conductivity model (height profile) [Электронный ресурс] // World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. – Режим доступа : <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ionocond/sigcal/>, свободный. – Дата обращения 01.02.2019.

Поступила в редакцию 13.03.2019

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

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

## ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF ELECTROSTATIC FIELD PENETRATION FROM LARGE SCALE GROUND SOURCES INTO THE IONOSPHERE WITH CONSIDERATION OF CONDUCTIVITY ANISOTROPY

V. V. Khagai, A. V. Karelin

*The penetration of electrostatic field from large scale ground sources to the ionosphere is considered on the basis of model analysis, and influence of conductivity anisotropy and integral Pedersen conductivity values on the magnitude of the penetrated field is analyzed. It is shown that the efficiency of penetration of electrostatic fields into the ionosphere is extremely low, however, in case that there are large scale sources (the characteristic horizontal dimension of which exceeds 1000 km) and localized vertical fields of the order of kV/m near the Earth surface, horizontal fields up to mV/m units may appear in the ionosphere, which is sufficient for occurrence of observed variations of plasma density in the ionosphere. During the penetration, the vertical field near the Earth surface is transformed into the horizontal field at the ionosphere altitudes. The degree of electric field penetration into the ionosphere is determined by the anisotropic nature of conductivity at the altitudes above 70 km and magnitude of integral Pedersen conductivity. The efficiency of electrostatic field penetration into the ionosphere enhances as the integral Pedersen conductivity decreases. Due to conductivity anisotropy its amplitude may reach ~1 mV/m at the ionosphere altitudes for large scale ground sources.*

**Key words:** electrostatic field, large scale sources, conductivity anisotropy, ionosphere, integral conductivity of the ionosphere.

### References

1. Park C. G., Dejnakarindra M. Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magnetosphere: 1. Middle and subauroral latitudes // *J. Geophys. Res.* – 1973. – V. 78. – No. 28. – P. 6623 – 6633. – Available at : <http://dx.doi.org/10.1029/JA078i028p06623>.
2. Kim V. P. etc. On the electric fields produced by dipolar coulomb charges of an individual thundercloud in the ionosphere / V. P. Kim, V. V. Hegai // *J. Astron. Space Sci.* – 2015. – V. 32. – No. 2. – P. 141 – 144.
3. Hegai V. V. etc. On a possible seismomagnetic effect in the topside ionosphere / V. V. Hegai, V. P. Kim, J. Y. Liu // *Adv. Space Res.* – 2015. – V. 56. – Issue 8. – P. 1707 – 1713.
4. 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. Sol.-Terr. Phys.* – 2018. – V. 179. – P. 527 – 537. – <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.09.002>.
5. Morozov V.N. Mathematical modeling of atmospheric electrical processes with consideration of influence of aerosol particles and radioactive substances / V. N. Morozov. – Saint-Petersburg: JSC 'KROM', 2011. – 254 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. – <http://dx.doi.org/10.1029/JZ070i012p02735>.
7. Huang C.-S., Foster J. C., Sahai Y. Significant depletions of the ionospheric plasma density at middle latitudes: A possible signature of equatorial spread F bubbles near the plasmapause // *J. Geophys. Res.* – 2007. – V. 112. – Iss. A5. – A05315. – <http://dx.doi.org/10.1029/2007JA012307>.
8. Hao J. etc. Progress in the research of atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes / J. Hao, T. M. Tang, D. R. Li // *J. Earthquake Pred. Res.* – 2000. – V. 8. – No. 3. – P. 241 – 255.
9. Vershinin E. F. etc. Correlations of seismic activity with electromagnetic emissions and variations in Kamchatka region / E. F. Vershinin, A. V. Buzevich, K. Yumoto, K. Saita, Y. Tanaka // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes.* – Tokyo: TERRAPUB, 1999. – P. 513 – 517.
10. Zhao Y. etc. Earthquake lights: A very convincing evidence for energy transfer from earth to air / Y. Zhao, F. Qian // *International Workshop on Seismo Electromagnetics.* – Tokyo (Abstracts), 1997. – P. 242.
11. Dobrovolsky I. R. etc. Estimation of the size of earthquake preparation zones / I. R. Dobrovolsky, S. I. Zubkov, V. I. Myachkin // *Pure Appl. Geophys.* – 1979. – V. 117. – No. 5. – P. 1025 – 1044.
12. Ionospheric conductivity model (height profile) [Electronic resource] // World Data Center for Geomagnetism. – Kyoto. – Available at : <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ionocond/sigcal/>, free access. – Date of access: 01.02.2019.

**Valerii Varlamovich Khagai**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Leading Researcher,  
tel.: +7 (495) 851-97-80, e-mail: [hegai@izmiran.ru](mailto:hegai@izmiran.ru).  
(Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS).

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