

УДК 550.34.4

## Проникновение электростатического поля от приземных источников в нижние слои ионосферы

В. В. Гриимальский, Ю. Г. Рапопорт

Институт космических исследований НАНУ-НКАУ,  
03022 Киев, пр. Глушкова 40а

*Исследуется проникновение электростатического поля в ионосферу от возмущений, локализованных в атмосфере или литосфере. Численно решается задача электростатики для среды с пространственно неоднородной анизотропной проводимостью. Рассмотрены как задача о возбуждении поля токовыми источниками, локализованными в литосфере, так и о возмущении электрического поля в ионосфере при создании области с повышенной проводимостью в атмосфере. Модельные значения электрического поля способны заметно влиять на характеристики ионосферного D-слоя, но недостаточны для изменения свойств более высоких слоев.*

**ПРОНИКНЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ ВІД ПРИЗЕМНИХ ДЖЕРЕЛ В НИЖНІ ШАРИ ІОНОСФЕРИ, ГРИМАЛЬСЬКИЙ В. В., РАПОПОРТ Ю. Г. —** Досліджується проникнення електростатичного поля у іоносферу від збурень, локалізованих у атмосфері або літосфері. Чисельно розв'язується задача електростатики для середовища з просторово неоднорідною анізотропною провідністю. Розглянуто як задачу про збудження поля струмовими джерелами, локалізованими у літосфері, так і про збурення електричного поля в іоносфері при створенні області з підвищеною провідністю в атмосфері. Модельні значення електричного поля здатні помітно впливати на характеристики іоносферного D-шару, але недостатні для зміни властивостей більш високих шарів.

**PENETRATION OF ELECTROSTATIC FIELD FROM SURFACE SOURCES INTO THE LOWER IONOSPHERE, by Grimal'skiy V. V., Rapoport Yu. G. —** A penetration of an electrostatic field into the ionosphere from perturbations localized in the atmosphere or lithosphere is investigated. The electrostatic problem is solved numerically for media with inhomogeneous anisotropic conductivity. We consider both the electrostatic problem on the excitation of the field by current sources localized in the lithosphere and the problem on the perturbation of the electrostatic field in the ionosphere under the occurrence of a region with increased conductivity in the atmosphere. The results of numerical simulations show that the calculated values of electrostatic field can essentially change the characteristics of the ionospheric D-layer but they are not sufficient for changing the properties of higher layers.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно несколько наблюдений ионосферных предвестников землетрясений, в том числе связанных с изменением электростатиче-

ского поля в атмосфере и ионосфере. Перечислим их.

1. Вариации вертикального компонента приземного электрического поля на поверхности Земли до землетрясения в районе эпицентра. Характерный размер вариаций электрического поля может составлять десятки километров [3, 6]. Амплитуда возмущений электрического поля составляла 100—150 В/м при подготовке слабых землетрясений [10] и достигала 1000 В/м незадолго до сильных землетрясений [2]. Имеются данные о существенном изменении проводимости приземного слоя атмосферы до землетрясений, вызванных, в частности, выбросом радиоактивных газов [12]. Так, наблюдалось увеличение в 10 раз концентрации ионов радона до землетрясения в Кобе (Япония, 17 января 1995 г.) [12].

2. Фукс и Шубова [4] сообщали об определенном изменении сигналов ОНЧ-передатчика, которое наблюдалось сразу после аварии на ЧАЭС.

3. Гохберг и др. [8] обнаружили заметное влияние сейсмической активности на субионосферное прохождение ОНЧ-излучения. Было высказано предположение, что это явление может служить возможным предвестником землетрясений. Кроме того, японские исследователи Хаякава и Сато [9] проанализировали данные по отклонению от усредненных значений фазы ОНЧ-сигнала, который проходил по волноводу Земля — ионосфера в ночное время. Оказалось, что имеется увеличение фазового набега в период от месяца до нескольких дней до землетрясения. Для землетрясения в Кобе ( $M_s = 7.2$ ) исследовалось прохождение ОНЧ-излучения от навигационного передатчика в волноводе Земля — ионосфера на расстояние около 1000 км, измерялись фаза и амплитуда сигнала [11, 12]. Впервые установлены статистически заметные изменения характеристик данного сигнала за несколько дней до главного толчка и на протяжении нескольких недель после этого. Период колебаний был 3—10 сут. Было высказано предположение об их связи с глобальными атмосферными колебаниями (волны Россби).

4. Группа М. Парро получила экспериментальные свидетельства изменения интегральной плотности электронов до землетрясений при прохождении низковысотного спутника TOPEX-POSEIDON над сейсмоактивными районами [13]. Согласно [3, 6] при проникновении горизонтального поля с амплитудой 1 мВ/м до высот 90 км возможно результирующее изменение электронной концентрации на 10 % и более на высоте 120 км.

Можно предположить, что все указанные выше ионосферные явления могут быть связаны с изменением электростатического поля в атмосфере до землетрясений.

Расчеты эффективности проникновения электростатического поля от поверхности Земли в ионосферу были выполнены в работах [3, 6]. Однако там предполагалось, что в ионосфере на высотах около 90 км проводимость вдоль магнитного поля бесконечна, а в таком случае проникновение поля снизу на данные высоты невозможно. Другими словами, не было учтено, что на границе сред с конечной и бесконечной проводимостью возникает поверхностный заряд.

Поэтому для правильных оценок влияния приземного электрического поля на ионосферу представляет интерес расчет проникновения электростатического поля в нижние области ионосферы от земной поверхности при учете конечной проводимости ионосферы и корректных граничных условий.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМ

Рассмотрим проникновение электрического поля от литосферы в атмосферу и ионосферу. Будем решать следующую электростатическую задачу:

$$\operatorname{div} [\hat{\sigma}(B_0, \mathbf{r}) \nabla \varphi] = 0, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — электрический потенциал,  $\hat{\sigma}$  — тензор проводимости, который имеет вид

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \cos^2\Theta\sigma_1 + \sin^2\Theta\sigma_3, & \sigma_{12} &= -\sigma_{21} = \cos\Theta\sigma_H, & \sigma_{22} &= \sigma_1, \\ \sigma_{23} &= -\sigma_{32} = \cos\Theta\sigma_H, & \sigma_{13} &= \sigma_{31} = \cos\Theta\sin\Theta(\sigma_3 - \sigma_1), \\ \sigma_{33} &= \cos^2\Theta\sigma_3 + \sin^2\Theta\sigma_1.\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь  $\Theta$  — угол между нормалью к земной поверхности (ось  $Z$ ) и геомагнитным полем  $B_0$ ;  $\sigma_\alpha$  — компоненты тензора проводимости в системе координат, связанной с магнитным полем:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \varepsilon_0 \left( \frac{\omega_{pe}\nu_e}{\nu_e^2 + \omega_{He}^2} + \frac{\omega_{pi}\nu_i}{\nu_i^2 + \omega_{Hi}^2} \right), \\ \sigma_3 &= \varepsilon_0 \left( \frac{\omega_{pe}}{\nu_e} + \frac{\omega_{pi}}{\nu_i} \right), \\ \sigma_H &= \varepsilon_0 \left( \frac{\omega_{pe}\omega_{He}}{\nu_e^2 + \omega_{He}^2} + \frac{\omega_{pi}\omega_{Hi}}{\nu_i^2 + \omega_{Hi}^2} \right),\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь  $\omega_{pe,pi} = (e^2 n_0 / \varepsilon_0 m_{e,i})^{1/2}$  — плазменные частоты для электронов и ионов соответственно,  $\omega_{He,Hi} = eB_0 / m_{e,i}$  — циклотронные частоты;  $\nu_{e,i}$  — частоты столкновений,  $m_{e,i}$  — массы электронов и ионов,  $n_0$  — концентрация носителей заряда,  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная. В общем случае в (3) — сумма по всем сортам ионов.

Используются следующие граничные условия:

1) задана вертикальная составляющая электростатического поля на поверхности Земли ( $Z = 0$ ):

$$E_Z(x, y, z = 0) = f(x, y);$$

2) проводимость ионосферы на высоте  $Z = 300$  км считается бесконечной, и электрический потенциал постоянен;

3) чтобы избежать проблем, связанных с разложением по непрерывному спектру, используются периодические граничные условия на фиктивных боковых стенках. Расстояния между этими стенками  $L_x, L_y$  должны быть достаточно большими по сравнению с размерами источника  $l_x, l_y$ . В наших расчетах выбрано  $L_x, L_y = 10l_x, l_y$ , и влияние боковых стенок на электрическое поле над источником было пренебрежимо малым.

Задача электростатики решалась при помощи преобразования Фурье по поперечным координатам  $X, Y$ . Фурье-компонент потенциала  $\varphi(k_x, k_y, z)$  определяется из уравнения

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma_{33} \frac{\partial \varphi}{\partial z} + i k_x \sigma_{31} \varphi + i k_y \sigma_{32} \varphi \right) + i (k_x \sigma_{13} + k_y \sigma_{23}) \frac{\partial \varphi}{\partial z} - (k_x^2 \sigma_{11} + k_y^2 \sigma_{22}) \varphi = 0. \quad (4)$$

Учитывалось наклонное направление геомагнитного поля ( $\Theta = 30^\circ$ ) и зависимость тензора проводимости только от вертикальной координаты  $Z$ . Эта зависимость задавалась в виде непрерывного распределения тензора проводимости, шаг дискретности разностной схемы по  $Z$  — примерно 2 км [1]. Область высот  $Z = 0..50$  км рассматривается как изотропная, в области 50—300 км учитывалась анизотропия, а в области 200—300 км доминирует продольная составляющая тензора проводимости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Расчеты выполнены для  $l_x = l_y = 50$  км. Считалось, что за счет выброса радона проводимость приземного слоя  $Z \leq 10$  км увеличилась на порядок.

На рис. 1, *a* представлены зависимости продольной и поперечной проводимостей атмосферы и ионосфера от высоты, которые использовались при расчетах. Соответствующие зависимости максимального значения вертикальной составляющей электрического поля  $E_z$  от высоты представлены на рис. 1, *б*.

На рис. 2 приведено поперечное распределение вертикальной составляющей  $E_z$  на высоте  $Z = 60$  км. Результаты расчетов соответствуют следующему значению  $E_z$  на поверхности Земли:  $E_z(z = 0, x, y) = E_{z0} + \Delta E_z / \{\cosh[(x - 0.5L_x)/l_x] \cosh[(y - 0.5L_y)/l_y]\}^2$ . Для ясной погоды было взято значение поля  $E_{z0} = 100$  В/м при  $Z = 0$ ;  $\Delta E_z = 900$  В/м. Таким образом, была учтена разность потенциалов между Землей и ионосферным F-слоем (200 кВ).

На рис. 3 представлено распределение горизонтальной составляющей электрического поля  $E_r$  на высоте  $Z = 60$  км. В случае выброса радона коэффициент проникновения электрического поля на высоту  $Z = 60$  км может достигать величины 0.001. Вертикальная составляющая поля на высоте  $Z = 60$  км значительно больше (для данного источника поля), чем горизонтальная. Влияние наклона геомагнитного поля не проявляется на высоте  $Z = 60$  км. В данных расчетах для величины поля на поверхности Земли 1000 В/м, и в случае выделения радона величина поля на высоте  $Z = 60$  км равна 1 В/м. Такое поле может вызвать изменение эффективной высоты ионосферы на несколько км [7]. На высоте  $Z = 90$  км значение поля  $E_z = 2$  мВ/м. Заметим, что эффект

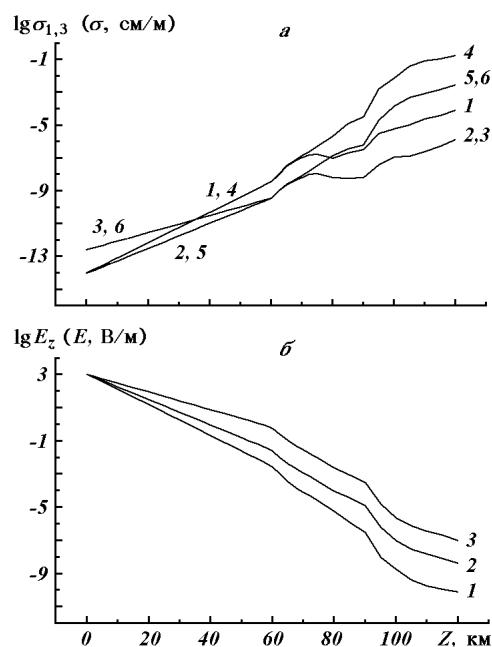


Рис. 1. Зависимость от высоты: *а* — составляющих проводимости  $\sigma_1, \sigma_3$  для дневных условий (кривые 1, 4 соответственно), ночью (2, 5) и с увеличением проводимости в приземном слое атмосферы (3, 6); *б* — вертикальной составляющей электрического поля  $E_z$  для различных условий (1 — день, 2 — ночь, 3 — при увеличении проводимости в приземном слое атмосферы)

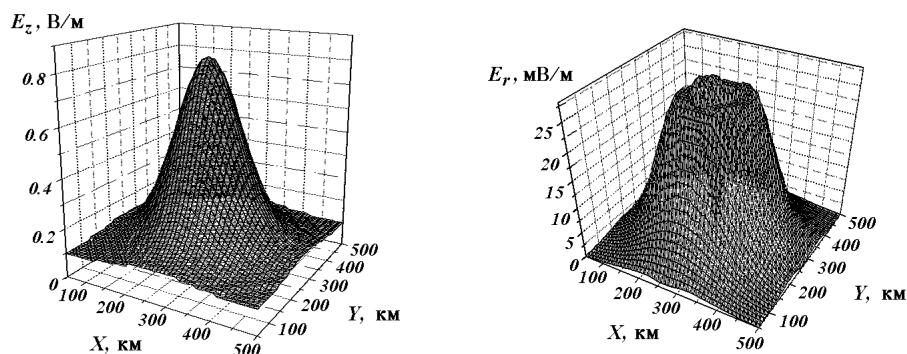


Рис. 2. Поперечное распределение составляющей поля  $E_z$  на высоте  $Z = 60$  км

Рис. 3. Поперечное распределение горизонтальной составляющей поля  $E_r$  на  $Z = 60$  км

проникновения поля в D-слой ионосферы ( $Z \geq 60$  км) наиболее выражен в ночное время. Из расчетов (рис. 1, б) следует, что даже значительное увеличение электростатического поля у поверхности Земли (1 кВ/м) не приводит к изменениям поля, способным существенно воздействовать на ионосферу на высотах более 90 км.

Таким образом, прежние результаты [3, 6] о заметном проникновении электростатического поля в ионосферные E- и F-слои связаны с некорректным граничным условием на границе D- и E-слоев ионосферы. Можно надеяться на заметное влияние приземного электростатического поля на нижние слои ионосферы лишь в случае больших полей (более 1 кВ/м) или при дополнительном эффекте увеличения приземной атмосферной проводимости (рис. 1, а, кривые 3, 6, рис. 1, б, кривая 3). Однако само изменение электростатического поля на порядок и более в нижних ионосферных слоях может служить предвестником землетрясения.

Также были проведены более точные расчеты с трехмерным непрерывным распределением атмосферной приземной проводимости:

$$\sigma = \sigma_0(z) + \sigma'(x, y, z, t).$$

Решалось нестационарное уравнение для потенциала:

$$\operatorname{div}(\sigma(x, y, z, t)\nabla\varphi) + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}(\Delta\varphi) = 0. \quad (5)$$

Уравнение (1) было дополнено граничными условиями постоянства потенциалов при  $Z = 0$  и 300 км. Разность потенциалов составляла 200 кВ (поле ясной погоды). В ионосфере анизотропная проводимость зависела только от вертикальной координаты  $Z$ .

Из (5) получается уравнение для значений потенциала  $\varphi^{p+1}$  на очередном временном слое ( $\varphi^p$ ,  $\varphi^{p-1}$  — значения потенциала на предыдущих временных слоях,  $\tau$  — шаг по времени):

$$\operatorname{div}\left[\left(1.5 + \frac{\tau}{\varepsilon_0}\sigma^{p+1}\right)\nabla\varphi^{p+1}\right] = 2\Delta\varphi^p - 0.5\Delta\varphi^{p-1}. \quad (6)$$

Уравнение (6) решалось итерационным методом с использованием дробных шагов [5]:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial u} - (\hat{A}_x + \hat{A}_y + \hat{A}_z)\varphi + f = 0. \quad (7)$$

Здесь  $u$  — итерационная переменная;

$$f = 2\Delta\varphi^p - 0.5\Delta\varphi^{p-1},$$

$$\hat{A}_x\varphi = \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(1.5 + \frac{\tau}{\varepsilon_0}\sigma^{p+1}\right)\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right],$$

(аналогично для  $\hat{A}_y$  и  $\hat{A}_z$ ).

Решение (7) сводится к следующим трем дробным шагам:

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{\tilde{u}}{2}\hat{A}_x\right)\xi^{s+1/3} &= (\hat{A}_x + \hat{A}_y + \hat{A}_z)\varphi^s + f, \\ \left(1 - \frac{\tilde{u}}{2}\hat{A}_y\right)\xi^{s+2/3} &= \xi^{s+1/3}, \\ \left(1 - \frac{\tilde{u}}{2}\hat{A}_z\right)\xi^{s+1} &= \xi^{s+2/3}, \\ \varphi^{s+1} &= \varphi^s + \tilde{u}\xi^{s+1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $\tilde{u}$  — шаг изменения  $u$ .

Границные условия на боковых стенках:

$$\begin{aligned}\xi^{s+1/3}(x = 0, L_x) &= 0, \\ \xi^{s+2/3}(y = 0, L_y) &= 0.\end{aligned}\quad (9)$$

Границное условие для Фурье-составляющей потенциала при  $z = L_a = 50$  км:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} + T(k_x, k_y)\varphi = 0, \quad (10)$$

где  $T(k_x, k_y)$  определяется из решения задачи (4) для случая зависимости проводимости ионосферы только от координаты  $Z$ . Из (10) можно получить соответствующее граничное условие для  $\xi^{s+1}$ :

$$\frac{\partial \xi^{s+1}}{\partial z} + T(0, 0)\xi^{s+1} - \frac{\partial T}{\partial k_x^2} \frac{\partial^2 \xi^{s+1}}{\partial x^2} - \frac{\partial T}{\partial k_y^2} \frac{\partial^2 \xi^{s+1}}{\partial y^2} = 0. \quad (11)$$

На высотах  $Z \geq 50$  км значения потенциала определялись из решения уравнения (4) с анизотропной проводимостью. Исследовался случай колоко-лообразной добавки к проводимости  $\sigma' = \sigma_0' \exp[-(x^2 + y^2)/r_0^2 - (z/z_0)^2]$  ( $\sigma_0' = 2.5 \cdot 10^{-12}$  См/м) с характерными масштабами  $r_0 = 60$  км по  $X$  и  $Y$  и  $z_0 = 20$  км по  $Z$ .

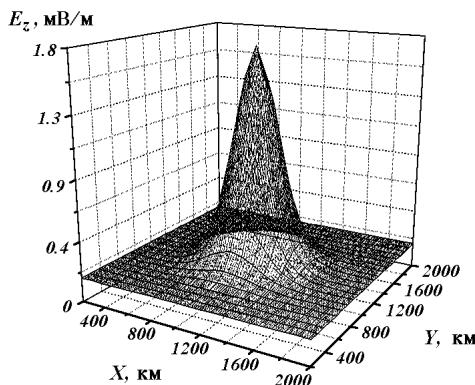


Рис. 4. Зависимость вертикальной составляющей поля  $E_z$  от горизонтальных координат  $X$ ,  $Y$  на высоте  $Z = 60$  км в случае трехмерной неоднородности проводимости в приземном слое атмосферы

На рис. 4 приведена установившаяся по времени зависимость  $E_z(x, y)$  на высоте  $Z = 60$  км, причем невозмущенные значения проводимости соответствуют дневным значениям (рис. 1, *a*, кривые 1, 4). Видно, что такое изменение проводимости ведет к существенному увеличению (на порядок и более)  $E_z$ -компоненты электрического поля на высотах  $Z = 60...90$  км даже при отсутствии дополнительных источников. Это изменение поля вряд ли само по себе может привести к модификации нижних слоев ионосферы, но легко может быть зафиксировано.

Эта работа была поддержанна Национальной академией наук Украины и Минобразования Украины по теме № 0197U015786.

1. Альперт Я. И. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. — М.: Наука, 1972.—540 с.
2. Бончковский В. Изменение градиента электрического потенциала атмосферы как один из возможных предвестников землетрясений // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР.—1954.—№ 25.—С. 192—206.
3. Ким В., Хегай В. В., Никифорова Л. И. О возможном возмущении ночной Е-области ионосферы над крупномасштабным тектоническим разломом // Физ. Земли.—1995.—

№ 7.—С. 35—39.

4. Мартыненко С. И., Фукс И. М., Шубова Р. С. Отклик нижней ионосферы на изменение проводимости приземной атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия.—1994.—34, № 2.—С. 121—129.
5. Марчук Г. И. Методы расщепления. — М.: Наука, 1988.—264 с.
6. Пулинец С. А., Хегай В. В., Боярчук К. А., Ломоносов А. М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // Успехи физ. наук.—1998.—168, № 5.—С. 582—590.
7. Fuks I. M., Shubova R. S., Martynenko S. I. Lower ionosphere response to conductivity variations of the near-earth atmosphere // J. Atmos. Solar-Terrestr. Phys.—1997.—59, N 6.—P. 961—965.
8. Gokhberg M. B., Gufeld A. A., Rozhnoy A. A., et al. Study of seismic influence on the ionosphere by super long-wave probing of the earth-ionosphere waveguide // Phys. Earth Planet. Inter.—1989.—57, N 1.—P. 64—69.
9. Hayakawa M., Sato H. Ionospheric perturbations associated with earthquakes, as detected by subionospheric VLF propagation // Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction / Eds M. Hayakawa, Y. Fujinawa. — Tokyo: Terra Sci. Pub. Comp., 1994.—P. 391—398
10. Kondo G. The variation of the atmosphere electric field at the time of earthquake // Memories of the Kakioka Magnetic Observatory.—1968.—13.—P. 11—23.
11. Molchanov O., Hayakawa M. Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes // J. Geophys. Res.—1998.—103A, N 8.—P. 17489—17504.
12. Molchanov O. A., Hayakawa M., Ondoh T., Kawai E. Precursory effects in the subionospheric VLF signals for the Kobe earthquake // Phys. Earth Planet. Inter.—1998.—105, N 2.—P. 239—244.
13. Zaslavski Y., Parrot M., Blanc E. Analysis of TEC measurements above active seismic regions // Phys. Earth Planet. Inter.—1998—105, N 2.—P. 219—230.

Поступила в редакцию 20.08.99