

О ПРОНИКНОВЕНИИ В ИОНОСФЕРУ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, СВЯЗАННОГО С УРАГАНОМ «ЭМИЛИ»

В. В. Хегай, В. П. Ким, А. В. Карелин

На основе модельных расчётов исследуется проникновение в ионосферу электростатического поля, обусловленного ураганом «Эмили», который вызвал сильнейшее за всю историю наблюдений возмущение электростатического поля на высотах около 20 км. Прямые измерения на борту высотного самолёта ER-2, выполненные над ураганом «Эмили» 17 июля 2005 г., показали, что над центральной частью урагана вертикальная (направленная вверх) компонента электростатического поля в максимуме достигала ~ 8,5 кВ/м на высоте ~ 20 км, а размеры области, в которой возмущение вертикального электрического поля превышало 100 В/м, в поперечнике составляли более 30 км. Получено, однако, что величина напряжённости электрического поля, проникающего на ионосферные высоты, незначительна и не превышает 0,03 мВ/м. Такое большое ослабление сильного электростатического поля тропосферного источника (урагана «Эмили») связано с «демпфирующей» ролью ионосферной интегральной проводимости.

Ключевые слова: тропосфера, ураган «Эмили», электростатическое поле, ионосфера, интегральная проводимость ионосферы.

Введение

Одним из ярких явлений в приземной атмосфере являются мощные ураганы/тайфуны, время от времени возникающие в тропических широтах и перемещающиеся на достаточно большие расстояния. Процессы электризации, протекающие в урагане, могут приводить к возникновению интенсивных электростатических полей. Так, например, прямые измерения на борту высотного самолёта ER-2, выполненные над ураганом «Эмили» 17 июля 2005 г., показали, что над центральной частью урагана вертикальная (направленная вверх) компонента электростатического поля в максимуме достигала ~ 8,5 кВ/м на высоте ~ 20 км, а размеры области, в которой возмущение вертикального электрического поля превышало 100 В/м, в поперечнике составляли более 30 км [1]. Наблюдения проводились в ночное время в интервале 07:51 – 07:56 UT в регионе Карибского моря вблизи 18°N и 82°W. Столь сильное электрическое поле было впервые зафиксировано на высоте около 20 км за всю историю наблюдений. Можно предположить, что ещё большие электрические поля могли порождаться на этих высотах более мощными ураганами, такими как «Рита» (сентябрь 2005 г.) и «Катрина» (август 2005 г.). Представляет интерес выяснить, в какой мере такие возмущения электростатического поля на верхней границе тропосферы могут проявляться на ионосферных высотах. В данной работе предпринята попытка дать ответ на этот вопрос на основе модельных вычислений.

Постановка задачи и результаты

Зададим цилиндрическую систему координат (r, φ, z) , начало которой поместим на горизонтальной плоскости, расположенной на высоте $H = 20$ км.

Ось z направим вертикально вверх. Будем полагать, что распределение вертикальной компоненты электростатического поля E_z , обусловленного ураганом, на плоскости $H = 20$ км является азимутально симметричным и имеет следующую гауссоподобную зависимость от координаты r

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

где E_0 и D – соответственно максимальное значение E_z и радиус области возмущения поля.

Для расчёта распределения электрического потенциала воспользуемся формализмом, развитым в [2] для исследования проникновения электростатического поля грозового облака в ионосферу. Исходные уравнения, определяющие распределение электрического потенциала Φ на высотах $H \geq 20$ км в стационарном приближении, имеют вид

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

$$\mathbf{J} = \underline{\sigma} \mathbf{E}, \quad (3)$$

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

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

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

где σ_p – локальная проводимость Педерсена, а σ_0 – специфическая (продольная вдоль \mathbf{B}) проводи-

мость. Ниже 70 км электрическую проводимость будем считать изотропной ($\sigma_0 = \sigma_p$).

Уравнение (5) можно решить аналитически, если σ_0 и σ_p зависят от высоты экспоненциальным образом. В случае изотропной проводимости, когда для локальных значений проводимостей справедливо соотношение $\sigma_0 = \sigma_p = b \cdot \exp(z/h)$, где b и h – константы, решение уравнения (5) имеет вид

$$\Phi = \int_0^{\infty} J_0(kr) [A_1(k) \exp(c_1 z) + B_1(k) \exp(c_2 z)] dk, \quad (6)$$

где J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка; A и B – коэффициенты, которые определяются из граничных условий;

$$c_1 = -1/(2h) - [1/(4h^2) + k^2]^{1/2}; \quad c_2 = -1/(2h) + [1/(4h^2) + k^2]^{1/2}.$$

На высотах ионосферы выше 70 км продольная проводимость σ_0 достаточно высока и намного превосходит поперечную проводимость Педерсена σ_p , поэтому геомагнитные силовые линии можно считать эквипотенциальными. Это позволяет рассматривать ионосферную область выше 70 км как тонкий проводящий слой с интегральной по высоте проводимостью Педерсена Σ_p . Таким образом, уравнение непрерывности тока на горизонтальной плоскости $H = 70$ км можно представить в виде

$$\sigma_0 E_z = \nabla_{\perp} (2\Sigma_p \cdot \mathbf{E}_{\perp}), \quad (7)$$

где ∇_{\perp} – двумерный оператор градиента, \mathbf{E}_{\perp} – вектор горизонтального электрического поля. Множитель 2 перед Σ_p учитывает вклад в проводимость магнитосопряжённой ионосферы другого полушария. Соотношение (7) можно записать в явном виде

$$\sigma_0 \partial\Phi/\partial z = 2\Sigma_p (\partial^2\Phi/\partial r^2 + 1/r \partial\Phi/\partial r). \quad (8)$$

На высотах от 10 до 70 км мы используем кусочно-экспоненциальную модель зависимости электрической проводимости от высоты, которая представлена на рис. 1. Профиль проводимости разделён на две смежные области (от 10 до 40 км и от 40 до 70 км), в которых проводимость изотропна и зависит от высоты экспоненциально и при этом: $\sigma_{01} = \sigma_{p1} = b_1 \cdot \exp(z/h_1)$, $\sigma_{02} = \sigma_{p2} = b_2 \cdot [\exp(z-z_1)/h_2]$, где индексы 1 и 2 относятся к областям 1 и 2, а $z_1 = 40$ км. Величины $b_{1,2}$ и $h_{1,2}$ подобраны таким образом, чтобы профили проводимости приблизительно соответствовали модели атмосферной проводимости [3] в области 1 и модели проводимости [4] в области 2 для

ночных условий. Значения интегральной педерсеновской проводимости ионосферы можно найти в [5].

Конкретные расчёты распределения электрического поля были выполнены для следующих граничных условий:

1. $-\partial\Phi/\partial z = E_0 \cdot \exp[-(r/D)^2]$ при $z = 0$ км ($H = 20$ км).
2. $\sigma_0 \partial\Phi/\partial z = 2\Sigma_p (\partial^2\Phi/\partial r^2 + 1/r \partial\Phi/\partial r)$ при $z = 50$ км ($H = 70$ км).
3. Φ – непрерывная функция при $z \geq 0$.

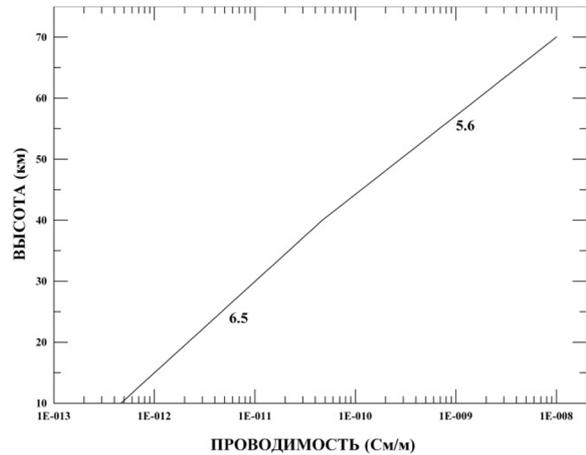


Рис. 1. Принятая модель атмосферной проводимости ($\sigma_0 = \sigma_p$) от 10 до 70 км. Цифры у прямых линий на рисунке показывают значения шкал высот h_1 и h_2 в формулах для электрической проводимости (в км)

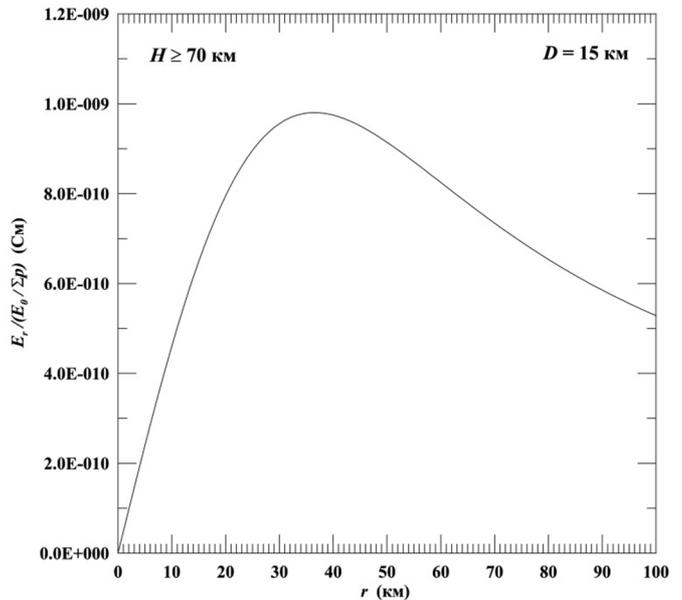


Рис. 2. Вычисленная зависимость от r величины напряжённости горизонтальной компоненты напряжённости электростатического поля урагана в ионосфере на высотах $H \geq 70$ км, нормированная на (E_0/Σ_p) , при $D = 15$ км

Результаты расчёта зависимости нормированной на отношение (E_0/Σ_p) горизонтальной компоненты электрического поля E_r от r в ионосфере на высотах более 70 км для $D = 15$ км иллюстрирует рис. 2.

Заметим, что эффективность проникновения электрического поля урагана в ионосферу днём намного меньше, чем ночью, поскольку величина интегральной проводимости Σ_p дневной ионосферы примерно на два порядка больше, чем ночной. Наиболее благоприятные условия для проникновения тропосферного поля в ионосферу реализуются в период низкой солнечной активности ночью, когда величины Σ_p существенно уменьшаются.

В случае урагана «Эмили», когда $E_0 = 8,5$ кВ/м и значение интегральной проводимости Σ_p составляло над ураганом во время наблюдений интенсивного электростатического поля, согласно [5], около 0,4 См, максимальная напряжённость горизонтального электрического поля на ионосферных высотах $H \geq 70$ км не превышает 0,03 мВ/м. Оценки показывают, что даже для более мощных ураганов «Рита» и «Катрина», которые произошли в 2005 г., в предположении, что $E_0 = 10$ кВ/м, горизонтальное электрическое поле в максимуме составляло менее 0,05 мВ/м на ионосферных высотах в районе Мексиканского залива.

Выводы

На основе модельных расчётов сделана оценка степени проникновения электростатического поля, связанного с ураганом «Эмили», когда вертикальная компонента поля превысила на высоте 20 км 8,5 кВ/м. Получено, что максимальное значение напряжённости горизонтального электрического поля на высотах ионосферы над ураганом не превышает 0,03 мВ/м. Это связано с важной ролью, которую играют в ослаблении электростатической связи между тропосферой и ионосферой высокие значения интегральной педерсеновской проводимости ионосферы.

Интегральная педерсеновская проводимость ионосферы определяется конкретным высотным профилем концентрации электронов, который зависит как от локальных, так и глобальных возмущений в ионосфере. Так, в ночной ионосфере внутри крупномасштабных плазменных пузырей (large-scale plasma bubbles) [6] Σ_p может быть менее 0,01 См [7], в таком случае величина поля в ионосфере от урагана «Эмили» возросла бы более чем в 40 раз, т. е. величина горизонтального

электрического поля на высотах ионосферы составила бы 1,2 мВ/м, что весьма существенно. Следовательно, детектирование подобного рода крупномасштабных возмущений электронной концентрации из космоса может быть полезным в задачах мониторинга чрезвычайных ситуаций, для чего необходимо создавать орбитальные группировки спутников геофизического назначения на основе специализированных космических аппаратов (см., в частности, [8]).

Работа выполнена при поддержке Программы ФНИ ГАН 16.3. Исследование солнечной активности и физических процессов в системе «Солнце – Земля» (No 0037-2014-0003).

Литература

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://science.nasa.gov/medialibrary/2006/01/09/09jan_electrichurricanes_resources/flightpath_big.jpg.
2. Park C. G., Dejnakintra 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: [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://dx.doi.org/10.1029/JA078i028p06623>.
3. 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>.
4. Swider W. Ionic mobility, mean mass, and conductivity in the middle atmosphere from near ground level to 70 km // Radio Sci. – 1988. – V. 23. – No. 3. – P. 389 – 399.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ionocond/sigcal/>.
6. 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: [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://dx.doi.org/10.1029/2007JA012307>.
7. Hegai V. V., Kim V. P., Liu J. Y. On a possible seismomagnetic effect in the topside ionosphere // Adv. Space Res. – 2015. – V. 56. – Issue 8. – P. 1707 – 1713.
8. Асташкин А. А., Буров В. А., Журавлев С. В., Карелин А. В., Лапшин В. Б., Пулинец С. А., Твердохлебова Е. М., Шувалов В. А., Яковлев А. А. Структура параметров геофизических процессов в околоземной среде. Основные принципы концепции перспективной космической системы мониторинга геофизической обстановки // Гелиогеофизические исследования. Электронный журнал. ISSN 2304-7380. – 2015. – Вып. 13. – С. 10 – 18.

Поступила в редакцию 10.02.2017

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

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

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

STUDY OF ELECTROSTATIC FIELD PENETRATED INTO THE EARTH'S IONOSPHERE CAUSED BY HURRICANE EMILY

V. V. Hegai, V. P. Kim, A. V. Karelin

The article discusses results of the study performed using model calculations to evaluate effects of electrostatic field penetration into the Earth's ionosphere resulted from the most significant registered electrostatic field perturbation at heights of about 20 km caused by Hurricane Emily. Results of direct measurements performed on-board of high-altitude aircraft ER-2 above Hurricane Emily on July 17, 2005, demonstrated that above the central area of the Hurricane vertical (upwards) component of electrostatic field achieved its maximum value of ~ 8.5 kV/m at a height of ~ 20 km, and lateral dimension of area, where vertical electrostatic field perturbation exceeded 100 V/m, was more than 30 km. However, the conducted measurements demonstrated that intensity of electric field penetrating into ionospheric heights appeared to be negligible and did not exceed 0.03 mV/m. Such significant reduction of strong electrostatic field created by a tropospheric source (Hurricane Emily) occurs due 'damping' effect of ionospheric integral conductivity.

Key words: troposphere, Hurricane Emily, electrostatic field, ionosphere, integral conductivity of ionosphere.

List of References

1. [Electronic source]. – Available at: http://science.nasa.gov/medialibrary/2006/01/09/09jan_electrichurricanes_resources/flightpath_big.jpg.
2. Park C. G., Dejnakintra M. Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magneto-sphere: 1. Middle and subauroral latitudes // J. Geophys. Res. – 1973. – V. 78. – No. 28. – P. 6623 – 6633: [Electronic source]. – Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/JA078i028p06623>.
3. 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 source] – Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/JZ070i012p02735>.
4. Swider W. Ionic mobility, mean mass, and conductivity in the middle atmosphere from near ground level to 70 km // Radio Sci. – 1988. – V. 23. – No. 3. – P. 389 – 399.
5. [Electronic source]. – Available at: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ionocond/sigcal/>.
6. 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: [Electronic source]. – Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/2007JA012307>.
7. Hegai V. V., Kim V. P., Liu J. Y. On a possible seismomagnetic effect in the topside ionosphere // Adv. Space Res. – 2015. – V. 56. – Issue 8. – P. 1707 – 1713.
8. Astashkin A. A., Burov V. A., Zhuravlev S. V., Karelin A. V., Lapshin V. B., Pulinets S. A., Tverdokhlebova E. M., Shuvalov V. A., Iakovlev A. A. Parameter system structure of geophysical processes in near-earth environment. Main principles for concept of prospective space system for monitoring of geo-physical situation // Geophysical research. Electronic journal. ISSN 2304-7380. – 2015. – Issue 13. – Pp. 10 – 18.

Valerii Varlamovich Hegai,

*Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D. (Phys.-Math.)),
Head of Department,
e-mail: hegai@izmiran.ru., tel.: (495) 851-97-80.
(IZMIRAN – Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere
and Radio Waves Propagation of the Russian Academy of Sciences).*

Vitalii Pavlovich Kim,

*Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D. (Phys.-Math.)),
Leading Researcher,
e-mail: kimvp9@gmail.com.,
tel.: (495) 851-97-80.
(IZMIRAN).*

Alexandr Vitalevich Karelin,

*Doctor of Physics and Mathematics (D.Sc. (Phys.-Math.)),
Head of Department,
e-mail: avkarelin@mail.ru.,
tel.: (495) 513-54-01.
(FGUP TSNIMASH – Federal State Unitary Enterprise
«Central Scientific Research Institute of Machine-Building Industry»).*