

## УЧЕТ РЕЛЬЕФА ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО АТМОСФЕРНОГО ПРОВОДНИКА

### TAKING ACCOUNT OF TOPOGRAPHY WHEN CALCULATING THE RESISTANCE OF THE GLOBAL ATMOSPHERIC CONDUCTOR

**В.В. Денисенко**

*Институт вычислительного моделирования СО РАН,  
Красноярск, Россия, denisen@icm.krasn.ru*

**О.Э. Якубайлик**

*Институт вычислительного моделирования СО РАН,  
Красноярск, Россия*

**V.V. Denisenko**

*Institute of Computational Modelling RAS SB, Krasnoyarsk,  
Russia, denisen@icm.krasn.ru*

**O.E. Yakubailik**

*Institute of Computational Modelling RAS SB, Krasnoyarsk,  
Russia*

**Аннотация.** Проанализирована роль рельефа в формировании глобальной электрической цепи. Рельеф земной поверхности найден с помощью базы данных GLOBE, которая определяет высоту над средним уровнем моря в географических координатах с пространственным разрешением 30 угл. сек. Атмосфера рассмотрена как глобальный проводник между поверхностью Земли и ионосферой, для которых применено приближение идеальной проводимости. Используются эмпирические модели проводимости атмосферного воздуха. Для упрощения описания крупномасштабных явлений осуществлен переход к одномерному моделированию вертикальных столбов воздуха. Показано, что учет рельефа уменьшает сопротивление атмосферы в среднем на 10 %, а локальное сопротивление над большими горами — в несколько раз. Отмечается, что и в более общих моделях электропроводности атмосферы учет рельефа тоже существенен.

**Ключевые слова:** глобальная электрическая цепь, проводимость, атмосфера, рельеф, уравнение электропроводности.

**Abstract.** The role of topography in the formation of the global electric circuit is analyzed. The topography of the Earth's surface is determined using the GLOBE database providing data on height of the Earth's surface above mean sea level in geodetic coordinates with spatial resolution of 30 angular seconds. The atmosphere is considered as a global conductor between the Earth's surface and the ionosphere simulated as ideal conductors. Empirical models of air conductivity are used. To simplify the description of large-scale phenomena, the model is reduced to one-dimensional simulation of vertical columns of air. The inclusion of topography is shown to reduce the resistance of the atmosphere by 10 % and to reduce the local resistance above high mountains several times. Note that taking topography into account is also important in more general models of electrical conductivity of the atmosphere.

**Keywords:** global electric circuit, conductivity, atmosphere, topography, equation of electrical conductivity.

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с современными представлениями [Мареев, 2010] генерация токов глобальной электрической цепи происходит в грозовых облаках. Сторонний электрический ток, текущий вверх внутри облака, замыкается направленными вниз токами проводимости внутри облака и в прилегающей к облаку атмосфере, а также по глобальному проводнику. В последнем случае ток проводимости уходит выше облака в ионосферу, растекается по ионосфере, течет по всей атмосфере вниз до земной поверхности, собирается по земле до области под облаками и через нижнюю атмосферу попадает на нижнюю границу облака. При этом разность потенциалов между верхней и нижней границами отдельного грозового облака может достигать сотни мегавольт, а характерная разность потенциалов между поверхностью Земли и ионосферой равна 300 кВ.

Разность потенциалов между разными точками в ионосфере на много порядков меньше, и поэтому

для ионосферы приближенно может быть использована модель идеального проводника. Земля тоже может рассматриваться как идеальный проводник из-за своей хорошей проводимости. Полный ток проводимости  $I$  между этими идеальными проводниками определяется разностью потенциалов между ними, которую обозначим  $V_0$ . Атмосфера является проводником, заключенным между такими электродами. Ее сопротивление  $R$  определяется пространственным распределением проводимости воздуха  $\sigma$  и формой проводника.

В настоящей работе сопротивление атмосферы найдено с учетом рельефа.

## 1. ПОВЕРХНОСТЬ ЗЕМЛИ

Мы используем базу данных [Hastings et al., 1999], которая определяет высоту земной  $h$  поверхности над средним уровнем моря в географических координатах  $\vartheta, \varphi$ , где  $\vartheta$  — коширота или полярный угол,  $\varphi$  — долгота, с пространственным разрешением 30 угл. сек.

(примерно 1 км). Третьей сферической координатой является расстояние до центра Земли  $r$ .

Средний уровень моря определен в Мировой геодезической системе 1984 г. [WGS 84, 1984], основанной на эллипсоиде WGS84 — эллипсоиде вращения с большой полуосью  $a=6378137$  м и сжатием  $f=1/298.257223563$ . Соответствующую этой поверхности функцию обозначим  $R_S(\vartheta, \varphi)$ , ее среднее значение  $R_E \approx 6370$  км. Чтобы получить значение высоты  $h_g(\vartheta, \varphi)$  в произвольной точке, билинейно интерполируем ее значения из узлов сетки. Фактически эту функцию мы существенно сглаживаем, поскольку используем одномерную модель электропроводности, применимую только при горизонтальных масштабах более 50 км.

Проводимость воздуха около поверхности Земли порядка  $10^{-14}$  См/м. Она на много порядков меньше проводимости морской воды (3 См/м), влажной почвы ( $10^{-2}$  См/м) и даже такого минерала, как мрамор ( $10^{-8}$  См/м). Поэтому Земля обычно рассматривается как идеальный проводник, что соответствует постоянному значению потенциала на ее поверхности:

$$V|_{h=h_g(\vartheta, \varphi)} = -V_0, \quad (1)$$

где значение  $V_0$  определяется балансом токов, а в рамках рассматриваемой модели атмосферного проводника полагается заданным.

## 2. ПРОВОДИМОСТЬ АТМОСФЕРЫ

Для описания интересующих нас крупномасштабных процессов может быть использована стационарная модель электропроводности [Denisenko et al., 2008]. В ее рамках задача об определении пространственных распределений электрического поля и тока сводится к решению уравнения электропроводности для потенциала  $V$ :

$$-div(\sigma grad V) = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — проводимость воздуха. Пространственное распределение  $\sigma(r, \vartheta, \varphi)$  мы задаем в соответствии с эмпирической моделью [Rycroft, Odzimek, 2010], в которой  $\sigma$  зависит только от высоты. Высотное распределение  $\sigma(h)$  приведено на рис. 1.

Согласно модели [Molchanov, Nayakawa, 2008], над морем проводимость повышается до  $2 \cdot 10^{-14}$  См/м, но это различие уменьшается с высотой и исчезает на высоте около 2 км. Мы внесли только эту модификацию в модель [Rycroft, Odzimek, 2010], другие модели высотного хода атмосферной проводимости упомянем в конце статьи.

На рис. 1 также приведены вертикальные профили компонент тензора проводимости  $\sigma_r, \sigma_{\parallel}, \sigma_H$  выше 90 км, полученные для ночной среднеширотной ионосферы в нашей модели проводимости ионосферы [Denisenko et al., 2008], построенной на основе эмпирических моделей IRI, MSIS, IGRF. На высотах 50–90 км использована гладкая интерполяция значений  $\sigma_r, \sigma_{\parallel}, \sigma_H$ . Выше 50 км проводимость является тензором, но, как будет показано ниже, область выше 50 км добавляет менее 0.1 % к значению  $R$  и поэтому здесь не рассматривается. В фактически интересующей нас области ниже 50 км дневную и ночную проводимости считаем равными.

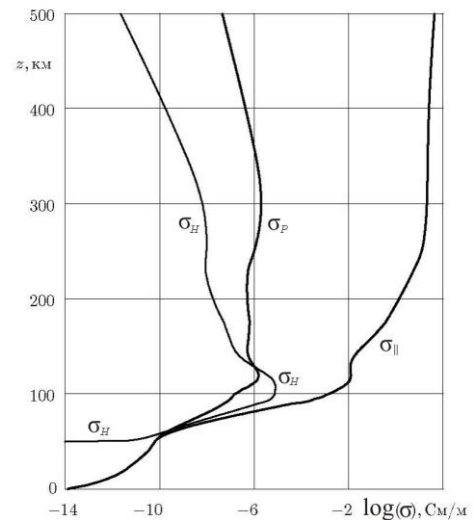


Рис. 1. Высотные распределения компонент тензора проводимости  $\sigma_r, \sigma_{\parallel}, \sigma_H$

Поскольку проводимость в ионосфере на много порядков превосходит проводимость атмосферного воздуха, ионосферу при моделировании глобальной электрической цепи [Мареев, 2010] в первом приближении считают идеальным проводником. Тогда потенциал всей ионосферы есть константа, которую полагаем нулевой на некоторой высоте  $H$  в ионосфере:

$$V|_{h=H} = 0. \quad (3)$$

Величину  $H$  подберем достаточно большой, чтобы при ее дальнейшем увеличении сопротивление атмосферы  $R$  менялось незначительно.

## 3. ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ

В работе [Ampferer et al., 2010] показано, что при горизонтальных масштабах порядка и более 100 км можно использовать одномерную модель, соответствующую вертикальности атмосферных токов. Тогда краевая задача (1)–(3) сводится к решению одномерной задачи по радиусу  $r$ :

$$\begin{aligned} -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \sigma(r) \frac{\partial V(r)}{\partial r} \right) &= 0, \\ V|_{r=R_S(\vartheta, \varphi)+H} &= 0, \\ V|_{r=R_S(\vartheta, \varphi)+h_g(\vartheta, \varphi)} &= -V_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\vartheta, \varphi$  — произвольные заданные значения координат.

Несложно показать, что учет сферичности Земли в этом уравнении вносит поправку менее 0.1 % в интересующие нас плотность тока и сопротивление. Поэтому сферичностью пренебрегаем, и одномерная задача (4) принимает вид

$$\begin{aligned} -\frac{d}{dh} \left( \sigma(h) \frac{dV(h)}{dh} \right) &= 0, \\ V|_{h=H} &= 0, \\ V|_{h=h_g(\vartheta, \varphi)} &= -V_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где, строго говоря, функция  $V(h)$  должна иметь индексы  $\vartheta, \varphi$ , поскольку она своя в каждой точке с координатами  $\vartheta, \varphi$ , но для краткости мы их не пишем.

Решение этой задачи дает напряженность вертикального электрического поля  $E(h)=-dV/dh$  и плотность тока  $j=-\sigma dV/dh$ , которая в силу уравнения (5) не меняется с высотой и, значит, является функцией только от координат  $\vartheta, \varphi$ . Последнее обстоятельство позволяет свести решение задачи (5) к интегрированию по высоте:

$$V_0 = j(\vartheta, \varphi) \int_{h_g(\vartheta, \varphi)}^H dh / \sigma(h).$$

Интеграл по вертикали от заданной функции не сложно вычислить, и из этого равенства получается значение  $j(\vartheta, \varphi)$ . Отношение

$$\Sigma(\vartheta, \varphi) = j(\vartheta, \varphi) / V_0 \tag{6}$$

имеет смысл проводимости столба атмосферы, имеющего сечение  $1 \text{ м}^2$ . В нашей модели она определяется лишь высотой поверхности Земли  $h_g(\vartheta, \varphi)$ , но имеет другое, единое значение для морских участков. Обратная величина

$$\rho(\theta, \varphi) = 1 / \Sigma(\theta, \varphi)$$

имеет смысл сопротивления вертикального столба атмосферы сечением  $1 \text{ м}^2$  от земли до ионосферы. Сопротивление убывает с увеличением высоты земной поверхности. График  $\rho$  как функции от высоты  $h$  приведен на рис. 2.

Как видим, атмосфера выше 30 км вносит вклад, незаметный в масштабе рисунка.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 представлено полученное распределение проводимости атмосферы  $\Sigma(\theta, \varphi)$ . Линии уровня приведены с шагом  $10^{-17} \text{ См/м}^2$ . В соответствии с рис. 2 над низменными участками суши  $\Sigma(\theta, \varphi) \approx 0.5 \cdot 10^{-17} \text{ См/м}^2$ . Над морем  $\Sigma(\theta, \varphi) \approx 0.64 \cdot 10^{-17} \text{ См/м}^2$ . На рис. 3 видно повышение проводимости атмосферы  $\Sigma(\theta, \varphi)$  над большими горами. Это повышение соответствует рис. 2, демонстрирующему увеличение проводимости вертикального столба атмосферы  $\Sigma(\theta, \varphi) = 1/\rho$  вчетверо, до  $\Sigma(\theta, \varphi) = 2 \cdot 10^{-17} \text{ См/м}^2$ , над горами выше 3.5 км.

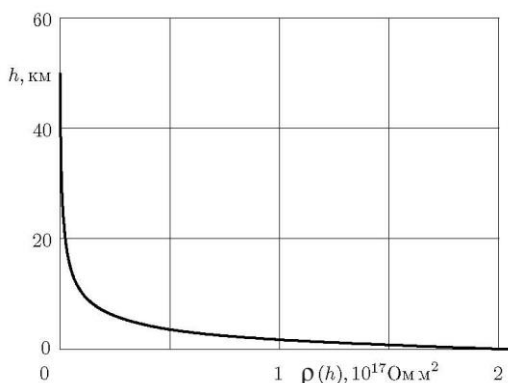


Рис. 2. Сопротивление  $\rho$  вертикального столба атмосферы сечением  $1 \text{ м}^2$  от поверхности Земли, находящейся на высоте  $h$  над уровнем моря, до ионосферы

Поскольку в используемой нами модели локальной проводимости воздуха  $\sigma$  отсутствует зависимость от физических свойств подстилающей поверхности, кроме отличия суши от моря, ледники в Гренландии и в Антарктиде описываются только высотой их поверхности и над ними тоже есть области повышенной проводимости  $\Sigma(\theta, \varphi)$ .

Полный ток сквозь атмосферу можно получить интегрированием по поверхности, соответствующей уровню моря. С погрешностью менее 0.5 % интегрирование можно проводить по сфере:

$$I = R_E^2 \int (-j) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi. \tag{7}$$

В силу линейности всех задач (5) по  $V_0$ , а значит, и их решений, полный ток  $I$  тоже пропорционален  $V_0$ . Сопротивление атмосферы как целого описывается отношением  $R = V_0/I$ , которое в силу (6), (7) может быть вычислено как

$$\frac{1}{R} = R_E^2 \int \Sigma(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi. \tag{8}$$

Знаки в (5), (7) выбраны так, что при положительном значении  $V_0$  Земля имеет отрицательный потенциал относительно ионосферы (5), электрическое поле  $E$  и ток  $j$  направлены вниз. Поэтому полный ток  $I$  и сопротивление  $R$  положительны.

В результате интегрирования (8) мы получили  $R = 292 \text{ Ом}$ . Если бы поверхность Земли проходила на уровне моря,  $h_g(\vartheta, \varphi) = 0$ , то по этим формулам получилось бы  $R = 328 \text{ Ом}$ .

Таким образом, рельеф уменьшает полное сопротивление атмосферы примерно на 10 % и значительно уменьшает локальное сопротивление вертикального столба атмосферы  $\rho = 1/\Sigma(\theta, \varphi)$  над высокими горами, например, пятикратно над горами выше 4.3 км.

#### 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настоящая модель сопротивления глобального атмосферного проводника построена на основе эмпирической модели [Rycroft, Odzimek, 2010], которая использовалась нами для описания общего для всей атмосферы высотного хода проводимости. В работе [Molchanov, Hayakawa, 2008] отмечается, что проводимость приповерхностного слоя воздуха над морем обычно вдвое выше, чем над сушей. Это повышение мы учли.

В справочнике [Шривер, 1965] приведены высотные профили проводимости, характерные для разных широт. В качестве среднего значения проводимости воздуха около поверхности Земли приведено значение  $3 \cdot 10^{-14} \text{ См/м}$  с вариациями от  $10^{-14}$  до  $10^{-13} \text{ См/м}$ . Используемые нами значения  $1.3 \cdot 10^{-14} \text{ См/м}$  над сушей из [Rycroft, Odzimek, 2010] и  $2 \cdot 10^{-14} \text{ См/м}$  над морем из [Molchanov, Hayakawa, 2008] лежат в этом диапазоне.

На фоне глобальной картины происходят локальные явления, существенно изменяющие проводимость воздуха. Проводимость в приземном слое атмосферы в несколько раз возрастает в областях выхода радона из почвы и в несколько раз уменьшается в воздухе, содержащем пыль [Harrison et al., 2010]. Последние эффекты обычно наблюдаются в слое ниже 250 м, поскольку выше и радон, и пыль быстро рассеиваются за счет турбулентной диффузии по вертикали

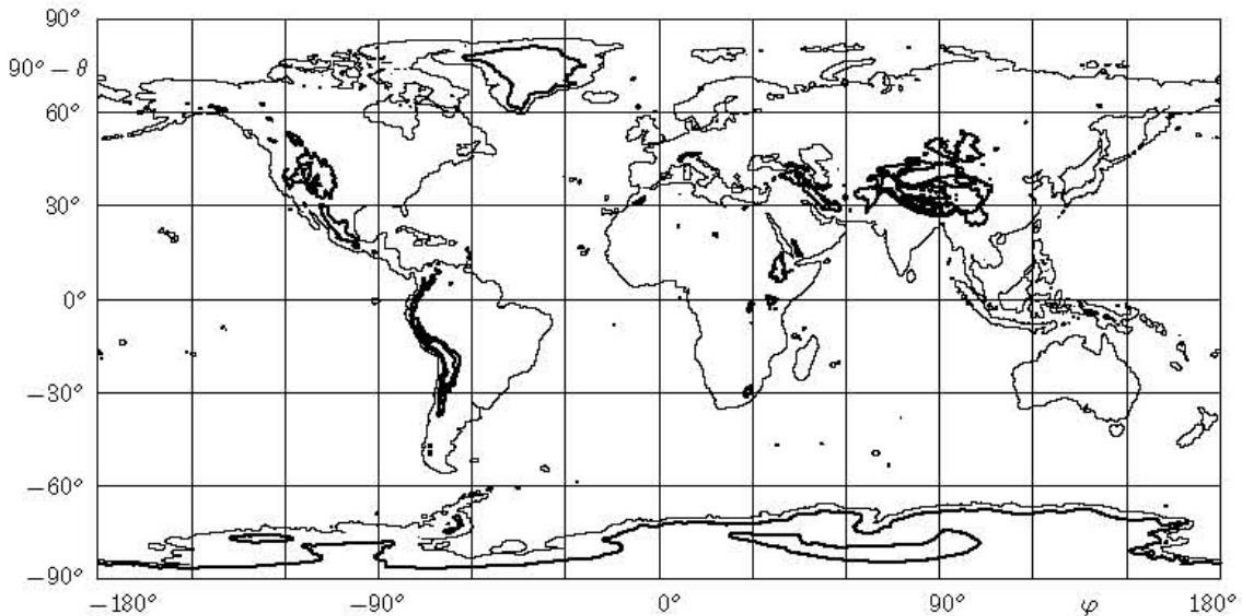


Рис. 3. Распределение проводимости атмосферы  $\Sigma(\theta, \varphi)$ . Приведены линии уровня  $\Sigma(\theta, \varphi)$  с шагом  $10^{-17}$  См/м<sup>2</sup> (жирные кривые) и береговая линия (тонкие кривые)

и за счет переноса ветром по горизонтали. Такие пограничные слои дают уменьшение или увеличение сопротивления столба атмосферы на 20 %, когда земная поверхность несильно возвышается над уровнем моря, как это было при измерениях [Harrison et al., 2010]. Для локальных возмущений атмосферного электрического поля за счет таких областей с повышенным содержанием радона или пыли построены модели [Денисенко и др., 2011].

Детальные измерения высотного хода проводимости над снеговыми поверхностями Арктики и Антарктиды, по-видимому, не проводились.

Мы нашли сопротивление с помощью одномерной модели электропроводности (4), которая становится неадекватной при горизонтальных масштабах менее 50 км [Amprfer et al., 2010]. В этом случае необходимо решать исходную трехмерную задачу (1)–(3). В работах [Денисенко и др., 2008; Денисенко, Помозов, 2010] такие расчеты проведены в более общей постановке при заданном неоднородном распределении потенциала в ионосфере. Показано, что целесообразно решать трехмерные задачи локально, для небольших подобластей диаметром порядка 500 км, и собирать единое решение для всей атмосферы в рамках метода декомпозиции области. При отличном от константы потенциале ионосферы полное сопротивление атмосферы теряет смысл, а одномерное приближение (5), которое сводится к определению проводимости  $\Sigma(\theta, \varphi)$  (6), остается актуальным.

В работе [Денисенко, 2011] предложен энергетический метод решения задачи, которая возникает при описании атмосферы и ионосферы как единого проводника.

Во всех усложненных моделях учет рельефа остается необходимым.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная нами модель нуждается в уточнении за счет использования более детальных данных о пространственном распределении локальной атмосферной проводимости. Выполненный нами учет рельефа необходим, поскольку возвышение поверхности Земли над уровнем моря может существенно уменьшать сопротивление столба воздуха, например, четверо над горами выше 3.5 км, как это видно на рис. 2, 3, а полное сопротивление атмосферы за счет рельефа уменьшается примерно на 10 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-05-00152). Авторы благодарны рецензенту за замечания, позволившие устранить имеющиеся неточности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Денисенко В.В. Энергетический метод расчета квазистационарных атмосферных электрических полей // Сибирский журнал индустриальной математики. 2011. Т. 14, № 1. С. 56–69.
- Денисенко В.В., Бычков В.В., Помозов Е.В. Расчет атмосферных электрических полей, проникающих из ионосферы // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12, т. 2. С. 281–283.
- Денисенко В.В., Бычков В.В., Помозов Е.В. Математическое моделирование проникновения электрических полей из ионосферы в атмосферу // Межгеосферные взаимодействия (Москва 26–27 сентября 2011 г.): материалы семинара-совещания / Ин-т динамики геосфер РАН. М.: ГЕОС, 2011. С. 89–96.
- Денисенко В.В., Помозов Е.В. Расчет глобальных электрических полей в земной атмосфере // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15, вып. 5. С. 34–50.
- Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т. 180, № 5. С. 527–534. DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005h.0527.

Шривер Б.А. Справочник по геофизике. М.: Наука, 1965. 572 с.

Ampferer M., Denisenko V.V., Hausleitner W., et al. Decrease of the electric field penetration into the ionosphere due to low conductivity at the near ground atmospheric layer // *Annales Geophysicae*. 2010. V. 28, N 3. P. 779–787. DOI: 10.5194/angeo-28-779-2010.

Denisenko V.V., Biernat H.K., Mezentssev A.V., et al. Modification of conductivity due to acceleration of the ionospheric medium // *Ibid.* 2008. V. 26. P. 2111–2130. DOI: 10.5194/angeo-26-2111-2008.

GLOBE Task Team and others. The Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, Boulder, 1999. Digital data base on the World Wide Web. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html> (access date 05.10.2014).

Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J. Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2010. V. 72. P. 376–381. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.12.004.

Molchanov O., Hayakawa M. Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results. Appendix 10. Atmospheric conductivity. Tokyo: Terrapub, 2008.

Rycroft M.J., Odzimek A. Effects of lightning and sprites on the ionospheric potential, and threshold effects on sprite initiation, obtained using an analog model of the global atmospheric electric circuit // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A00E37. DOI: 10.1029/2009JA014758.

World Geodetic System 1984 (WGS 84). URL: <http://earthnfo.nga.mil/GandG/wgs84> (access date 03.10.2014).

## REFERENCES

Ampferer M., Denisenko V.V., Hausleitner W., Krauss S., Stangl G., Boudjada M.Y., Biernat H.K. Decrease of the electric field penetration into the ionosphere due to low conductivity at the near ground atmospheric layer. *Annales Geophysicae*. 2010, vol. 28, no. 3, pp. 779–787. DOI: 10.5194/angeo-28-779-2010.

Denisenko V.V. The energy method for calculating quasi-stationary atmospheric electric fields. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki* [Siberian Journal of Industrial Mathematics]. 2011, vol. 14, no. 1, pp. 56–69 (in Russian).

Denisenko V.V., Biernat H.K., Mezentssev A.V., Shaidurov V.A., Zamay S.S. Modification of conductivity due to acceleration of the ionospheric medium. *Annales Geophysicae*. 2008, vol. 26, pp. 2111–2130. DOI: 10.5194/angeo-26-2111-2008.

Denisenko V.V., Bychkov V.V., Pomozov E.V. Calculation of atmospheric electric fields penetrating from the ionosphere. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2008, iss. 2, no. 2, pp. 281–283 (in Russian). *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009, vol. 49, no. 8, pp. 1275–1277 (in English).

Denisenko V.V., Bychkov V.V., Pomozov E.V. Mathematical simulation of penetration of electric fields from the

ionosphere to the atmosphere. *Mezhgeosfernye vzaimodeistviya. (Moskva, 26–27 sentyabrya 2011): Materialy seminarov soveshchaniya* [Intergeospheric Interactions (Moscow, September 26–27, 2011): Proceedings of the Workshop] / Institute of Geosphere Dynamics. Moscow, GEOS Publ., 2011, pp. 89–96 (in Russian).

Denisenko V.V., Pomozov E.V. Global electric fields calculation. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies]. 2010, vol. 15, no. 5, p. 34–50 (in Russian).

GLOBE Task Team and others / Hastings D.A., Dunbar P.K., Elphinstone G.M., Bootz M., Hiroshi Murakami, Hiroshi Maruyama, Hiroshi Masaharu, Peter Holland, Payne J., Bryant N.A., Logan T.L., Muller J.-P., Schreier G., MacDonald J.S. (eds.) The Global Land One-Kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305-3328, U.S.A., 1999. Digital data base on the World Wide Web. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>. (access date 05.10.2014)

Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J. Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2010, vol. 72, pp. 376–381. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.12.004.

Mareev E.A. Global electric circuit research: Achievements and prospects. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics–Uspekhi: Advances in Physical]. 2010, vol. 53, no. 5, pp. 527–534 (in Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005h.0527. *Phys. Usp.* 2010. vol. 53. pp. 504–511 (in English). DOI: 10.3367/UFNe.0180.201005h.0527.

Molchanov O., Hayakawa M. *Seismo-electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest Results*. Appendix 10. Atmospheric conductivity. Tokyo, Terrapub Publ., 2008.

Rycroft M.J., Odzimek A. Effects of lightning and sprites on the ionospheric potential, and threshold effects on sprite initiation, obtained using an analog model of the global atmospheric electric circuit. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A00E37. DOI: 10.1029/2009JA014758.

Shriver B.A. *Spravochnik po geofizike* [Handbook of Geophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 572 p. (in Russian).

World Geodetic System 1984 (WGS 84). Available at: <http://earth-nfo.nga.mil/GandG/wgs84> (access date 03.10.2014).