



УДК 551.510.535

Учет неоднородностей подсеточного масштаба в рамках численной модели глобального распределения электрических полей в ионосфере Земли

В. М. Уваров

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Уваров В. М. Учет неоднородностей подсеточного масштаба в рамках численной модели глобального распределения электрических полей в ионосфере Земли // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 600–608. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-600-608

Аннотация

Цель: Создание глобальной численной модели ионосферных электрических полей с возможностью более детального описания их мелкомасштабных особенностей в некоторых ограниченных подобластях. **Методы:** Постановка краевой задачи с учетом выделенной подобласти для описания особенностей подсеточного масштаба и ее решение современным численным методом. **Результаты:** Проведена апробация модели. В частности, получено устойчивое численное решение для случая мелкомасштабного локализованного усиления проводимости, обусловленного дополнительной ионизацией ионосферы авроральным лучом. **Практическая значимость:** Модель дает возможность уточнить картину глобального распределения ионосферных электрических полей в тех ограниченных подобластях, для которых имеется более полный набор экспериментальных данных по распределению проводимостей и продольных токов.

Ключевые слова: Ионосфера, электрические поля, электрический потенциал, ионосферная проводимость, продольные токи, численное моделирование, подсеточный масштаб, вариационно-разностный метод.

Введение

В статье 1981 г. [1] был изложен новый подход к моделированию ионосферных электрических полей. Главной отличительной чертой этого подхода был учет электродинамического взаимодействия ионосфер противоположных полушарий. Специфика этого взаимодействия такова, что ее можно учесть только в рамках описания

электрических полей на всей сферической ионосферной оболочке с выделением подобластей в виде северной и южной полярных шапок. Соответствующая краевая задача оказалась весьма сложной. Поэтому первые результаты были получены аналитически, путем задания достаточно простых моделей параметров задачи. Но даже в этом случае удалось рассмотреть весьма интерес-

ный случай межполушарной асимметрии, когда при отсутствии источников в данном полушарии электрические поля тем не менее возбуждались источниками, локализованными в противоположном полушарии [2].

Разработанные позднее две численные модели, детально описанные в [3], позволили рассчитать распределение потенциала для реальных условий. Более того, из этих двух моделей более поздняя, модифицированная версия [4], дает устойчивое численное решение даже при наличии сильных разрывов в самих проводимостях, когда терпят разрыв коэффициенты при вторых производных потенциала в эллиптических уравнениях системы [5]. Такие разрывы могут наблюдаться, например, на границах полярных сияний.

Следует отметить, что с полярными сияниями различных типов и различных пространственных масштабов связаны вполне определенные картины распределения ионосферных проводимостей и продольных токов. Характерный пространственный масштаб неоднородностей этих параметров может быть существенно меньше пространственных шагов численной глобальной модели распределения электрического потенциала.

Ниже описана модификация численной модели [4], на основе которой исследуется влияние неоднородностей проводимости и продольных токов подсеточного масштаба, локализованных в некоторой ограниченной подобласти.

Постановка задачи и метод решения

Проблема учета неоднородностей подсеточного масштаба, локализованных в ограниченной подобласти, решена следующим образом. На сетке глобальной численной модели выбрана подобласть, где предполагается сгустить сетку с целью адекватного описания мелкомасштабных неоднородностей в распределении проводимостей и продольных токов. Очевидно, что если в

выделенной подобласти пространственные шаги совпадают с шагами глобальной модели, то нет никакой необходимости в задании каких-либо граничных условий на границе такой подобласти. В случае измельчения шагов в подобласти очевидными граничными условиями являются условия сшивки по потенциалу и нормальной компоненте тока.

Система уравнений и граничные условия глобальной модели подробно описаны в [1, 3, 4]:

$$\operatorname{div}_{\theta,\varphi} J_1 = j_{1r}'' \text{ для } \Omega_1(\theta \leq \theta_1); \quad (1)$$

$$\operatorname{div}_{\theta,\varphi} J_2 = j_{2r}'' \text{ для } \Omega_2(\pi - \theta_1 \leq \theta \leq \pi); \quad (2)$$

$$\operatorname{div}_{\theta,\varphi} J_3 = j_{3r}'' \text{ для } \Omega_3^N(\theta_1 \leq \theta \leq \theta_3); \quad (3)$$

$$U_1(\theta_1, \varphi) = U_3(\theta_1, \varphi) = U_2(\theta_2, \varphi); \quad (4)$$

$$J_{1\theta}(\theta_1, \varphi) - J_{3\theta}(\theta_1, \varphi) = J_{2\theta}(\theta_2, \varphi); \quad (5)$$

$$J_{3\theta}(\theta_3, \varphi) = 0, \quad (6)$$

где U_α, J_α ($\alpha = 1, 2, 3$) — потенциалы и токи в соответствующих областях, связанные законом Ома:

$$J_\alpha = \sum_\alpha (-\operatorname{grad} U_\alpha), \quad (7)$$

где \sum — тензор интегральной проводимости:

$$\sum = \begin{bmatrix} \sum_{\theta\theta} & \sum_{\theta\varphi} \\ \sum_{\varphi\theta} & \sum_{\varphi\varphi} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\sum_{\theta\theta} = \sum_p / \sin^2 \chi$; $\sum_{\theta\varphi} = -\sum_{\varphi\theta} = \sum_H / \sin \chi$; $\sum_{\varphi\varphi} = \sum_p$; $\sin \chi = 2 \cdot \cos \theta / (1 + 3 \cdot \cos^2 \theta)^{1/2}$; χ — магнитное склонение; $\operatorname{div}_{\theta,\varphi}$ — угловая часть оператора дивергенции в сферических координатах θ, φ ; $j_{\alpha r}''$ — источники в виде радиальной составляющей продольных токов; \sum_p и \sum_H зависят от θ и φ .

Уравнения (1) — (3) описывают распределение потенциала в областях северной полярной

шапки, южной полярной шапки и области средних и низких широт соответственно. Условие (4) означает отсутствие скачка потенциала поперек границы данной шапки и между границами противоположных шапок в каждой точке границ. Условие (5) следует из неразрывности общей токовой цепи и означает, что возможные разрывы нормальной компоненты горизонтальных токов на границах северной и южной шапок взаимно компенсируют друг друга за счет продольных токов перетекания на этих границах. Условие (6) — это однородное граничное условие на нормальную компоненту тока. Оно соответствует непротеканию тока через экватор и является единственно физически обоснованным [3].

Краевая задача (1) — (6) для эллиптической системы уравнений в частных производных имеет следующие специфические особенности: а) разделение сферы на три подобласти, на границе которых ставятся краевые условия нелокального характера; б) несамосопряженность; в) вырожденность краевой задачи. Под нелокальным характером граничных условий (4) и (5) понимается наличие в них потенциалов и токов, относящихся к разным полушариям. Особенность (б) обусловлена наличием в тензоре проводимости (8) ненулевой и неоднородной внедиагональной компоненты, определяемой проводимостью Холла. Особенность (в) отражает тот факт, что при отсутствии источников задача (1) — (6) имеет нетривиальное решение $U = \text{const}$.

Параметр θ_1 , определяющий размер и границы шапок, в расчетах принимался равным 27° . Экваториальная граница выбиралась несколько выше экватора, $\theta_3 = 72^\circ$, с целью избежать особенностей в тензоре проводимости (8) ($\sin \chi = 0$ при $\theta_3 = 90^\circ$).

Мелкомасштабные неоднородности в распределении параметров задачи, характерная протяженность которых порядка или менее сеточных шагов глобальной модели, могут быть учтены различными методами.

Например, для решения данной задачи можно было бы использовать единую сетку для всей сферы, но со сгущением ее в области локализации мелкомасштабной неоднородности. Однако вне этой области покрывающая всю сферу единая сетка будет, очевидно, неравномерной, что понизит степень аппроксимации соответствующих разностных уравнений.

Ниже выбран другой метод. Выделяется содержащая мелкомасштабную неоднородность подобласть $\omega = [\theta_{\omega 1}, \theta_{\omega 2}] \cdot [\varphi_{\omega 1}, \varphi_{\omega 2}]$ (т. е. подобласть, локализованная в интервале коширот $\theta_{\omega 1} \leq \theta \leq \theta_{\omega 2}$ и интервале долгот $\varphi_{\omega 1} \leq \varphi \leq \varphi_{\omega 2}$), для которой используется отдельная равномерная сетка с шагами в 5–7 раз более мелкими по сравнению с исходной равномерной глобальной сеткой. Границу области ω обозначим Γ_ω . Ниже предполагается, что подобласть ω целиком находится в области Ω_1 (северная полярная шапка). Для подобласти ω решается свое уравнение для потенциала U_ω :

$$\text{div}_{\theta, \varphi} J_\omega = j_{\omega r}^* \text{ для } \omega = [\theta_{\omega 1}, \theta_{\omega 2}] \cdot [\varphi_{\omega 1}, \varphi_{\omega 2}], \quad (9)$$

совпадающее по структуре с уравнениями (1) — (3). На границе Γ_ω задаются классические условия сшивки решений U_ω и U_1 по потенциалу и нормальной к границе компоненте тока $J_{\omega n}$ и J_{1n} :

$$U_\omega |_{\Gamma_\omega} = U_1 |_{\Gamma_\omega}. \quad (10)$$

$$J_{\omega n} |_{\Gamma_\omega} = J_{1n} |_{\Gamma_\omega}. \quad (11)$$

Таким образом, краевая задача о глобальном распределении потенциала в ионосфере Земли с выделением подобласти для учета мелкомасштабных неоднородностей проводимости и продольного тока описывается системой уравнений для потенциала (1) — (3), (9) и системой граничных условий (4) — (6), (10), (11). Впервые такая задача была сформулирована в [6].

Для решения этой задачи система сеточных уравнений строилась следующим образом. Подо-

область ω выбирается таким образом, чтобы ее граница проходила между узлами сетки глобальной задачи. Сетка для ω строится со сдвигом на полшага, чтобы граница областей находилась между узлами более частой сетки. После решения глобальной задачи становится возможным задать граничное условие Дирихле для «подобласти возмущений» по известным значениям потенциала U в узлах крупной сетки. Значения граничного условия для мелкой сетки получаем с помощью линейной интерполяции, после чего решается соответствующая краевая задача для подобласти ω . После этого вычисляется значение нормальной компоненты электрического тока в ω , задается граничное условие на нормальную компоненту для глобальной задачи и решается глобальная задача со скорректированными граничными условиями. В итоге получается классическая схема «Дирихле — Нейман» решения разностной задачи методом декомпозиции областей.

Результаты численных расчетов

Численное решение обсуждаемой краевой задачи изображено на рис. 1, где дано двумерное распределение потенциала (в киловольтах) в интервале геомагнитных коширот от 0 до 30 градусов для северной полярной шапки (дневной меридиан сверху).

В качестве источников электрических полей выбирались продольные токи двух систем — *DPY*-системы и трехслойной *MTS*-системы [7, 8]. Обе системы наблюдаются в экстремально спокойных геомагнитных условиях. Продольные токи *DPY*-системы локализованы между дневным каспом и геомагнитным полюсом [9]. Трехслойная *MTS*-система локализована вблизи ночного меридиана [7, 8]. В Северном полушарии, для отрицательной азимутальной компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), они локализованы в послеполуночные часы с вытекающим продольным током в центральном слое и с втекающими про-

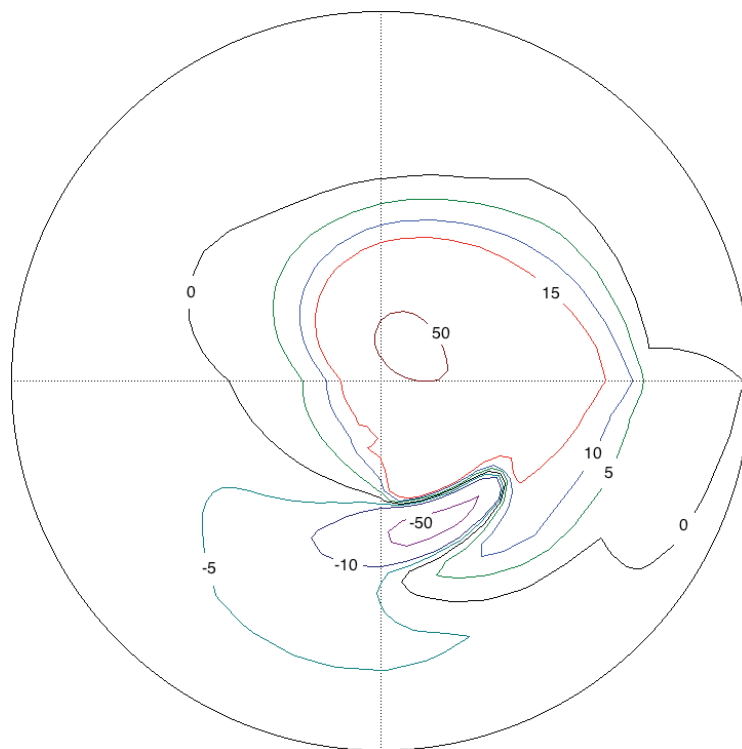


Рис. 1. Изолинии потенциала (в киловольтах) для северной полярной шапки

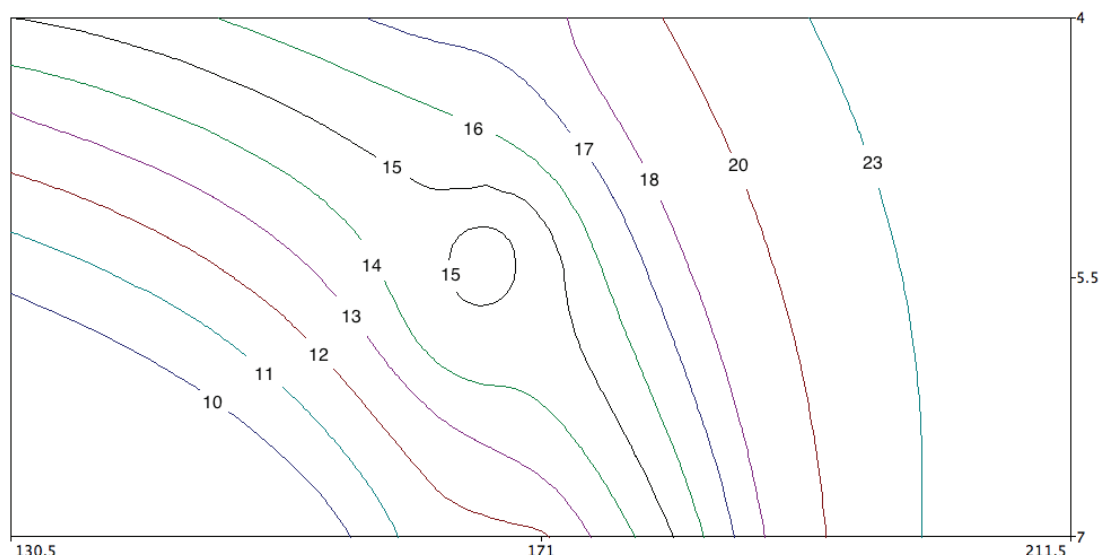


Рис. 2. Изолинии потенциала в выделенной подобласти.
Случай локального усиления проводимости

дольными токами на периферии, а для положительной азимутальной компоненты — в послеполуночные часы с обратным направлением токов во всех трех слоях. В Южном полушарии распределение *MTS* — продольных токов повторяет распределение в Северном полушарии, но для противоположного знака азимутальной компоненты.

Расчеты проведены для случая равноденствия. Рассмотрен случай отрицательной азимутальной компоненты ММП. Вклад в интегральную проводимость прямого УФ-излучения учитывалось по модели [10], электронных высыпаний — по модели [11], рассеянного УФ-излучения и звездного света — аналогично [12]. В качестве входных параметров для моделей [10, 11] выбирались низкая геомагнитная активность и средняя солнечная активность.

На рис. 1 ярко выражен излом эквипотенциалей на утренне-вечернем меридиане. Последний совпадает с границей тени, на которой происходит разрыв первой производной от холловской проводимости, что приводит к разрыву коэффициентов при первой производной от потенциала в двумерных эллиптических уравнениях (1) — (3).

На рис. 1 видно также, что эквипотенциаль 15 кВ вблизи ночного меридиана обнаруживает заметный

излом. Он обусловлен выделением здесь специальной подобласти, в которой было задано усиление проводимости в небольшом круге, ассоциируемое с дополнительной ионизацией ионосферы потоком заряженных частиц в виде аврорального луча (один из типов полярных сияний). Отмеченная выше особенность в распределении потенциала более выпукло прорисовывается на рис. 2, где дана картина эквипотенциалей в выделенной подобласти коширот от 4 до 7 градусов и азимутальных углов от 130,5 до 211,5 градусов (азимутальный угол отсчитывается от дневного меридиана против часовой стрелки). По сравнению с основными шагами глобальной модели (0,5 градуса по кошироте и 4,5 градуса по долготе) коширотный и долготный шаги в выделенной подобласти были кратно уменьшены (в ходе вычислительных экспериментов удалось достичь указанного уменьшения в 51 раз).

На рис. 3 дано распределение потенциала, аналогичное рис. 2, но для случая, когда в выделенной подобласти никаких искажений фоновой проводимости не допускалось. Соответственно, никаких искажений в картине эквипотенциалей на рис. 3 нет. Это свидетельствует в пользу успешного тестирования разработанной численной модели.

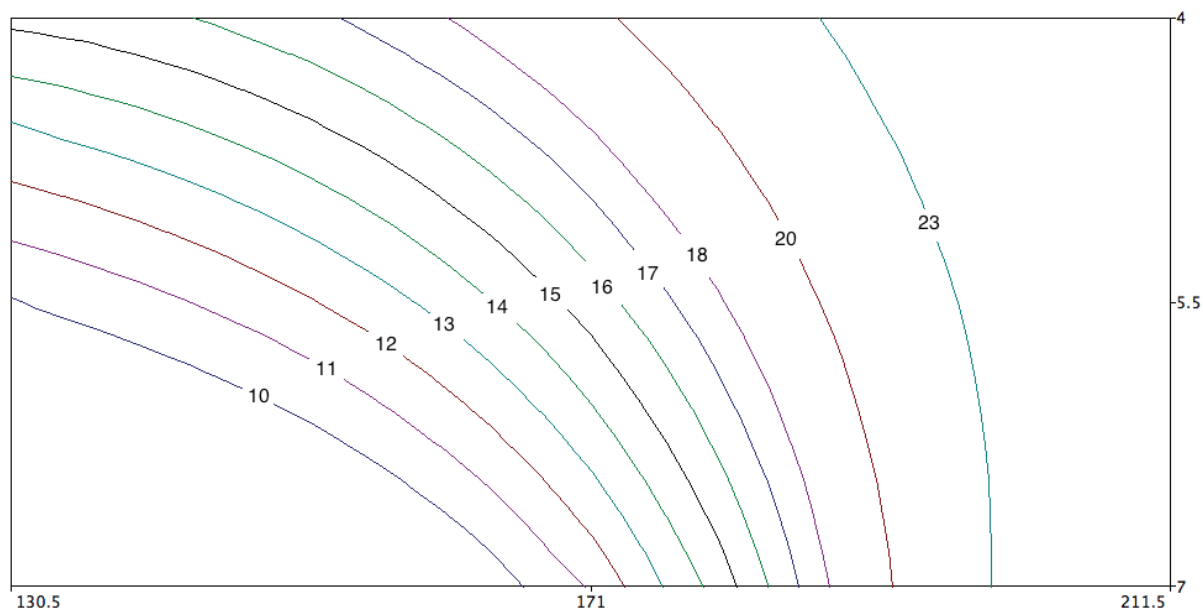


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но без искажения фоновой проводимости

Для тестирования модели особый интерес представляет случай, когда возбуждающий электрический ток (правая часть уравнения (9)) локализован исключительно в выделенной подобласти ω . Было выбрано модельное распределение плотности продольного тока, характерное для окрестности аврорального луча с разным направлением вектора плотности тока в центре луча и на периферии. При этом выполняется естественное условие компенсации (равенство полных втекающих и вытекающих токов). Устойчивое решение было получено и в данном случае. Возбуждаемые электрические поля были локализованы преимущественно в выделенной подобласти, не выходя за ее границы, что было вполне ожидаемо для заданной структуры распределения скомпенсированных продольных токов.

Заключение

Представленная в настоящей статье численная модель является развитием модели [4], в основе которой лежит постановка краевой задачи [1] о глобальном распределении электрических полей в ионосфере Земли с учетом специфики электро-

динамического взаимодействия токонесущих ионосферных оболочек противоположных полушарий. Большие вычислительные трудности при создании модели [4], обусловленные нестандартностью указанной краевой задачи, удалось преодолеть во многом благодаря многолетнему сотрудничеству с Б. А. Самокишем, известным специалистом в области вычислительной математики. Об этих трудностях красноречиво свидетельствует тот факт, что на сегодняшний день так и не появились конкурирующие модели.

Использование в модели [4] вариационно-разностного метода, основанного на концепции обобщенного решения, позволило рассчитывать глобальные распределения потенциала даже для случаев очень сильных разрывов в распределении ионосферных проводимостей [5], адекватно воспроизводя поведение полей даже в непосредственной окрестности таких разрывов. Разрывы могут возникать, например, на границах каналов проводимости, создаваемых полярными сияниями.

Отличительной особенностью модели, изложенной в настоящей статье, является возмож-

ность выделить специальную пространственную подобласть для более детального учета мелкомасштабных особенностей в распределении входных параметров модели (проводимостей и продольных токов) и адекватного воспроизведения в расчетах соответствующих особенностей в распределении электрических полей.

Своевременность разработки такой модели определяется перспективой появления экспериментальных полигонов с достаточно плотной сетью установок для измерения ионосферных параметров и электрических полей. Сопоставление результатов численного моделирования и данных измерений поможет ответить на целый ряд актуальных вопросов. Например, на вопрос о роли механизма ионосферного динамо в распределении электрических полей в окрестности различных типов полярных сияний.

Библиографический список

1. Уваров В. М. Возможный подход к проблеме возбуждения электрических полей и токов, обусловленных V_y -компонентой ММП / В. М. Уваров // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1981. — Т. 21. — № 1. — С. 114–120.
2. Уваров В. М. О распределении электрических полей, обусловленных северной компонентой ММП при отсутствии продольных токов в зимней полярной шапке / В. М. Уваров // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1984. — Т. 24. — № 1. — С. 1025–1027.
3. Уваров В. М. Электрические поля в ионосфере Земли. Численные модели / В. М. Уваров, Б. А. Самокиш. — СПб.: ПГУПС, 2009. — 63 с.
4. Кондаков А. Б. Модифицированная численная модель глобального распределения электрического потенциала. UT-эффект обращения ионосферной конвекции / А. Б. Кондаков, Б. А. Самокиш, В. М. Уваров // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1999. — Т. 39. — № 6. — С. 50–55.
5. Кондаков А. Б. Моделирование глобального распределения электрических полей в ионосфере Земли с учетом разрывов в распределении проводимости / А. Б. Кондаков // Известия петербургского университета путей сообщения. — 2013. — Вып. 4(37). — С. 123–128.
6. Уваров В. М. «Вычислительный микроскоп» для численной модели глобального распределения электрических полей в ионосфере Земли. Постановка задачи / В. М. Уваров, А. Б. Кондаков // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сборник трудов XII Санкт-Петербургского конгресса. 12–13 ноября 2018 г. — СПб. — С. 247–248.
7. Taguchi S. By-controlled field-aligned currents near midnight auroral oval during northward interplanetary magnetic field / S. Taguchi // J. Geophys. Res. — 1992. — Vol. 97. — № A8. — Pp. 12231–12243.
8. Taguchi S. By-controlled convection and field-aligned currents near midnight auroral oval for northward interplanetary magnetic field / S. Taguchi, M. Sugiura, T. Iemori et al. // J. Geophys. Res. — 1994. — Vol. 99. — № A4. — Pp. 6027–6044.
9. Araki T. The interplanetary magnetic field By-dependent field-aligned current in the dayside polar cap under quiet conditions / T. Araki, M. Yamauchi // J. Geophys. Res. — 1989. — Vol. 94. — № A3. — Pp. 2684–2690.
10. Robinson R. M. Measurements of E region ionization and conductivity produced by solar illumination at high latitudes / R. M. Robinson, R. R. Vondrak // J. Geophys. Res. — 1984. — Vol. A89. — № A6. — Pp. 3951–3956.
11. Hardy D. A. Statistical and Functional representation of the pattern of auroral energy flux, number flux and conductivity / D. A. Hardy, M. S. Gussenhoven, R. Raistrick, W. J. McNeil // J. Geophys. Res. — 1987. — Vol. A92. — № 11. — Pp. 12275–12294.
12. Rasmussen C. E. Ionospheric convection driven by NBZ currents / C. E. Rasmussen, R. W. Shunk // J. Geophys. Res. — 1987. — Vol. A92. — № 5. — Pp. 4491–4504.

Дата поступления: 20.04.2022

Решение о публикации: 28.05.2022

Контактная информация:

УВАРОВ Вячеслав Михайлович — д-р физ.-мат. наук, проф.; vmuvarov@mail.ru

Accounting for Subgrid Scale Heterogeneity in the Frames of Numerical Model for Global Distribution of Electric Fields in the Earth Ionosphere

V. M. Uvarov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Uvarov V. M. Accounting for Subgrid Scale Heterogeneity in the Frames of Numerical Model for Global Distribution of Electric Fields in the Earth Ionosphere // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 600–608. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-600-608

Summary

Purpose: Creation of a global numerical model of ionospheric electric fields with the possibility of more detailed description of their small-scale features in some limited subareas. **Methods:** Formulation of a boundary value task with accounting for underlined subdomain for to describe subgrid scale features and the task solution by modern numerical method. **Results:** Model testing was conducted. In particular, stable numerical solution was obtained for the case of small-scale localized conductivity increase due to additional ionization of the ionosphere by an auroral ray. **Practical significance:** The model will make it possible to qualify the picture of ionospheric electric field global distribution in those limited subareas which for, there is fuller set of experimental data on the distribution of conductivity and field-aligned currents.

Keywords: Ionosphere, electric fields, electric potential, ionospheric conductivity, field-aligned currents, subgrid scale, numerical modeling, variation-difference method.

References

1. Uvarov V. M. Vozmozhnyy podkhod k probleme vzbuzhdeniya elektricheskikh poley i tokov, obuslovlennykh By-komponentoy MMP [A possible approach to the problem of excitation of electric fields and currents due to the By-component of the IMF]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 1981, vol. 21, I. 1, pp. 114–120. (In Russian)
2. Uvarov V. M. O raspredelenii elektricheskikh poley, obuslovlennykh severnoy komponentoy MMP pri otsutstvii prodol'nykh tokov v zimney polyarnoy shapke [On the distribution of electric fields due to the northern component of the IMF in the absence of field-aligned currents in the winter polar cap]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 1984, vol. 24, I. 1, pp. 1025–1027. (In Russian)
3. Uvarov V. M., Samokish B. A. *Elektricheskie polya v ionosfere Zemli. Chislennyye modeli* [Electric fields in the Earth's ionosphere. Numerical models]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2009, 63 p. (In Russian)
4. Kondakov A. B., Samokish B. A., Uvarov V. M. Modifitsirovannaya chislennaya model' global'nogo raspredeleniya elektricheskogo potentsiala. UT-effekt obrashcheniya ionosfernoy konveksii [Modified Numerical Model of the Global Distribution of Electric Potential. UT-effect of reversal of ionospheric convection]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 1999, vol. 39, I. 6, pp. 50–55. (In Russian)
5. Kondakov A. B. Modelirovanie global'nogo raspredeleniya elektricheskikh poley v ionosfere Zemli s uchetom razryvov v raspredelenii provodimosti [Modeling the global distribution of electric fields in the Earth's ionosphere, taking into account discontinuities in the distribution of conductivity]. *Izvestiya peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the

St. Petersburg University of Communications]. 2013, I. 4(37), pp. 123–128. (In Russian)

6. Uvarov V. M., Kondakov A. B. «Vychislitel'nyy mikroskop» dlya chislennoy modeli global'nogo raspredeleniya elektricheskikh poley v ionosfere Zemli. Postanovka zadachi [“Computational microscope” for the numerical model of the global distribution of electric fields in the Earth’s ionosphere. Formulation of the problem]. *Professional'noe obrazovanie, nauk i innovatsii v XXI veke. Sbornik trudov XII Sankt – Peterburgskogo kongressa. 12–13 noyabrya 2018 goda* [Professional education, sciences and innovations in the XXI century. Collection of Proceedings of the XII St. Petersburg Congress. November 12–13, 2018]. St. Petersburg, pp. 247–248. (In Russian)

7. Taguchi S., Sugiura M., Iemori T. By-controlled convection and field-aligned currents near midnight auroral oval for northward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, I. A4, pp. 6027–6044.

8. Taguchi S. By-controlled field-aligned currents near midnight auroral oval during northward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, I. A8, pp. 12231–12243.

9. Araki T., Yamauchi M. The interplanetary magnetic field By-dependent field-aligned current in the dayside polar cap under quiet conditions. *J. Geophys. Res.* 1989, vol. 94, I. A3, pp. 2684–2690.

10. Robinson R. M., Vondrak R. R. Measurements of E region ionization and conductivity produced by solar illumination at high latitudes. *J. Geophys. Res.* 1984, vol. A89, I. A6, pp. 3951–3956.

11. Hardy D. A., Gussenhoven M. S., Raistric R., McNeil W.J. Statistical and Functional representation of the pattern of auroral energy flux, number flux and conductivity. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. A92, I. 11, pp. 12275–12294.

12. Rasmussen C. E., Shunk R. W. Ionospheric convection driven by NBZ currents. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. A92, I. 5, pp. 4491–4504.

Received: April 20, 2022

Accepted: May 28, 2022

Author’s information:

Vyacheslav M. UVAROV — Dr. Sci. in Physical-Mathematical Sciences; vmuvarov@mail.ru