Секция С. Диагностика естественных неоднородных сред и математическое моделирование. БШФФ-2026. С. 414–416.

УДК 550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-414
ORCID: 0009-0006-5049-6122

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

А.Р. Вилутис[1,2], И.А. Носиков[2]

[1]Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия, valeksandrrr1@gmail.com
[2]Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

MODELING OF TRANSIONOSPHERIC RADIO SOUNDING

A.R. Vilutis[1,2], I.A. Nosikov[2]

[1]Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, valeksandrrr1@gmail.com
[2]West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia

Аннотация. Рост объема данных внешнего и трансионосферного зондирования требует совершенствования методов интерпретации наблюдаемых ионосферных процессов. Эффективным инструментом для решения этой задачи является имитационное моделирование радиотрасс. В данной работе представлены возможности численной модели ионосферного распространения радиоволн, разрабатываемой в Калининградском филиале ИЗМИРАН. Основной акцент сделан на расчете поглощения радиоволн при оценке дистанционно-частотных характеристик, что повышает точность воспроизведения условий прохождения сигнала и позволяет детально анализировать энергетические потери в различных слоях ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, моделирование, трансионосферное радиозондирование, поглощение.

Abstract. The growing volume of data from external and transionospheric sounding requires improvement of methods for interpreting observed ionospheric processes. An effective tool for addressing this problem is the simulation modeling of radio paths. This paper presents the capabilities of a numerical model of ionospheric radio wave propagation [Nosikov, 2025], which is being developed at the West Department of IZMIRAN. The primary focus is placed on calculating radio wave absorption when estimating distance–frequency characteristics, which enhances the accuracy of reproducing signal propagation conditions and enables us to make a detailed analysis of energy losses in various layers of the ionosphere.

Keywords: ionosphere, modeling, transionospheric radio sounding, absorption.

ВВЕДЕНИЕ

Возобновление космических проектов, в частности старт проекта «Ионозонд» и запуск серии спутников «Ионосфера-М», обусловило растущую потребность в специализированном программном обеспечении, предназначенном для численного моделирования ионосферы.

Методические основы трансионосферного зондирования закладывались еще в ходе экспериментов на ИСЗ «Интеркосмос-19» [Жбанков, 2010], [Карпачев, 2012]. В настоящее время подобные измерения осуществляются на регулярной основе, базы данных систематически пополняются; вместе с тем накопленный объем наблюдений включает случаи, трудно поддающиеся интерпретации в рамках существующих подходов.

Применение методов математического моделирования позволяет не только обеспечить интерпретацию подобных нетривиальных наблюдений, но и получить количественные оценки профиля электронной концентрации в ионосфере, недоступные при использовании исключительно экспериментальных данных.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ

Модель ионосферного распространения радиоволн (МИР), разработанная в Калининградском филиале ИЗМИРАН, построена на основе прямого вариационного метода. Она использует международные эмпирические модели IGRF13 [Alken et al., 2021], NeQuick2 [Nava et al., 2008], а также ряд аналитических моделей, что в совокупности обеспечивает возможность трассирования радиолучей в условиях трехмерной неоднородной анизотропной ионосферы.

В рамках данной работы к модели МИР была подключена глобальная динамическая модель ионосферы GDMI [Shubin, Deminov, 2019], которая применяется для предварительного расчета профилей плазменной частоты и частоты соударений с последующей интерполяцией обоих параметров на трехмерной пространственной сетке (рис. 1).

РАСЧЕТЫ

В исходной версии модели МИР показатель преломления рассчитывался по формуле Эпплтона—Хартри

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - x - iZ)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1 - x - iZ)^2} + Y_L^2}},$$

$X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = \frac{f_P^2}{f^2}$, $Y = \frac{\omega_C}{\omega} = \frac{f_H}{f}$, $Y_L = Y\, cos\, cos\, \theta$, $Y_T = Y\, sin\, sin\, \theta$, $Z = \frac{\nu}{\omega} = \frac{\nu}{2\pi f}$,

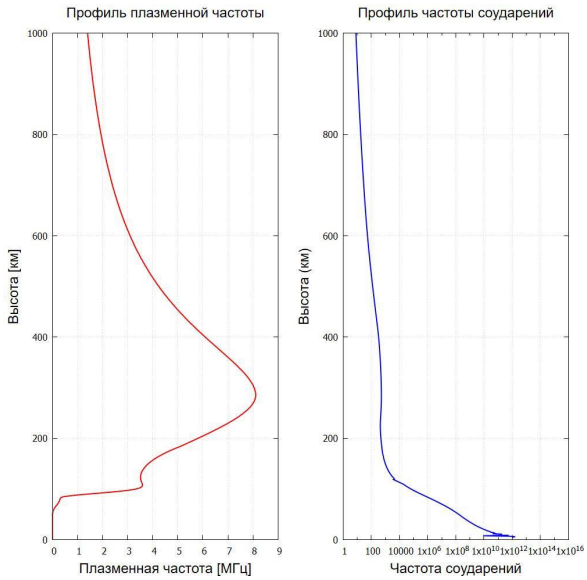

Рис. 1. Высотные профили плазменной частоты и частоты соударения, построенные на основе данных модели GDMI

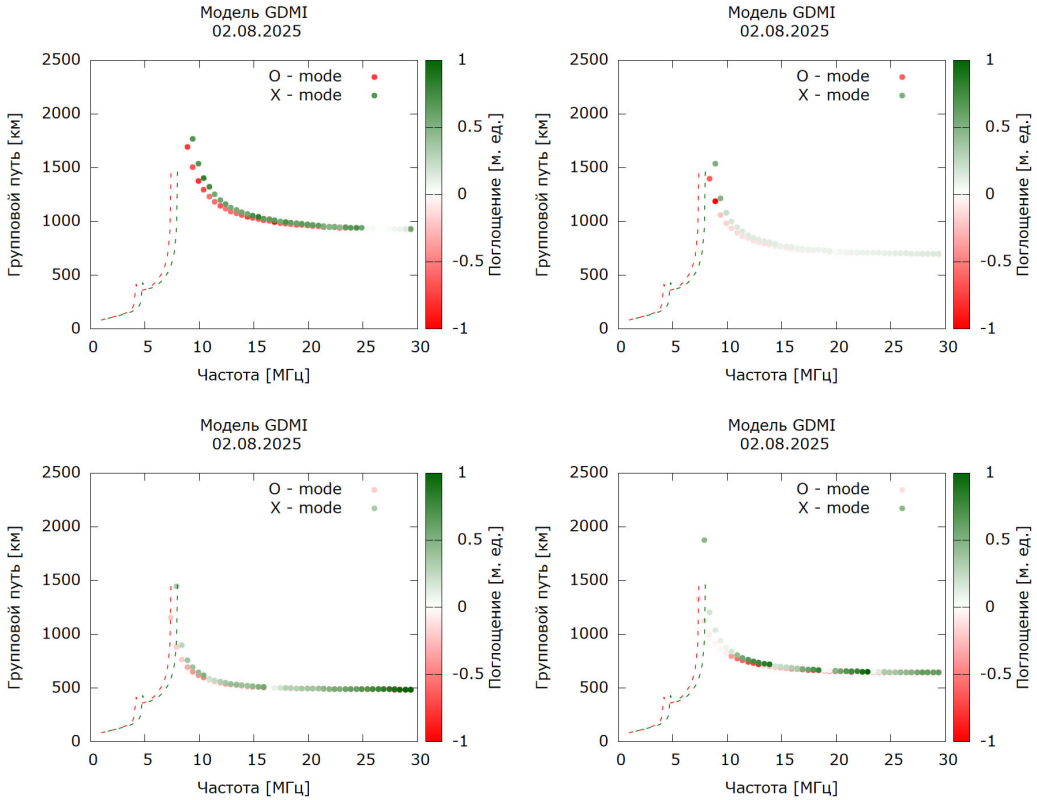

Рис. 2. Результаты моделирования пролета спутника над Калининградским регионом

где f_p — плазменная частота, f_H — гирочастота, f — рабочая частота, ν— частота соударений, θ — угол между направлением волнового вектора и вектором индукции внешнего магнитного поля (геомагнитного поля).

Расчет проводился без учета мнимой части, т. е. при условии $Z = 0$. В рамках проведенной модернизации параметр Z был введен на основании высотного профиля частоты соударений, рассчитываемого в модели GDMI. Учет мнимой части комплексного показателя преломления позволил реализовать в модели МИР расчет интегрального поглощения радиоволн [Котова, 2015]

$$k_{\text{инт}} = \int_L Im\,(n_i)\,cos\,cos\,\alpha_i\,\mathrm{d}l$$

где L — выбранный участок лучевой траектории, $I(n_i)$ — мнимая часть коэффициента преломления, α_i— угол между векторами импульса и луча.

Для апробации разработанного подхода были проведены расчеты трансионосферного зондирования применительно к условиям 2 августа 2025 г. На рис. 2 показаны модельные ионограммы, соответствующие пролету спутника на высоте 824 км в районе Калининградского региона. Градиентной окраской отображено поглощение в модельных единицах: красный цвет — для обыкновенной моды, зеленый — для необыкновенной. В целях наглядности значения поглощения для обыкновенной моды приведены с обратным знаком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы модель ионосферного распространения радиоволн МИР была расширена за счет интеграции с глобальной динамической моделью ионосферы GDMI. Введение параметра Z в формулу Эпплтона—Хартри на основе рассчитываемых в GDMI высотных профилей частоты соударений позволило реализовать расчет как интегрального поглощения в трехмерной неоднородной анизотропной ионосфере.

Апробация модернизированной модели на материале трансионосферного зондирования 2 августа 2025 г. подтвердила работоспособность реализованного подхода и его применимость для интерпретации экспериментальных данных.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-77-00033, https://rscf.ru/project/25-77-00033/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Жбанков Г.А. и др. Особенности распространения радиоволн со спутника «Интеркосмос-19» в области гребня ночной экваториальной аномалии // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. №. 1. С. 123–130.

Карпачев А.Т., Жбанков Г.А., Телегин В.А. Выделение крупномасштабной неоднородности в области главного ионосферного провала по данным внешнего зондирования на ИСЗ «Интеркосмос-19» // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. №. 2. С. 219–225.

Котова Д.С. Исследование формирования лучевых траекторий и поглощения коротких радиоволн в ионосфере во время геомагнитных бурь: дис. ИСЗФ СО РАН, 2015.

Alken P. et al. Evaluation of candidate models for the 13th generation International Geomagnetic Reference Field // Earth, Planets and Space. 2021. V. 73. N 1. P. 48.

Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // J. Atm. and Solar-Terr. Phys. 2008. T. 70. N 15. P. 1856–1862.

Shubin V.N., Deminov M.G. Global dynamic model of critical frequency of the ionospheric F2 layer // Geomagnetism and Aeronomy. 2019. V. 59. N 4. P. 429–440.