

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУЧЕВЫХ ТРАЕКТОРИЙ КВ-РАДИОВОЛН  
В ЕСТЕСТВЕННО И ИСКУССТВЕННО ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЕ  
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РАДИОТОМОГРАФИИ**

**М.А. Анненков, Е.С. Андреева, И.А. Нестеров, А.М. Падохин**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
annenkov@physics.msu.ru

**RESEARCH INTO RAY TRAJECTORIES OF HF RADIOWAVES  
IN THE NATURALLY AND ARTIFICIALLY DISTURBED IONOSPHERE  
ON THE BASIS OF RADIOTOMOGRAPHIC DATA**

**M.A. Annenkov, E.S. Andreeva, I.A. Nesterov, A.M. Padokhin**

Lomonosov State University, Moscow, Russian Federation

**Аннотация.** Проведено численное моделирование лучевых траекторий КВ-радиоволн в ионосфере. В качестве модели среды использована как модель IRI, так и реальные данные, полученные методом радиотомографии ионосферы. Для задания магнитного поля использовалась модель IGRF. Проведено сопоставление лучевых траекторий КВ-радиоволн в условиях естественных и искусственных ионосферных возмущений для реальных и модельных распределений электронной концентрации.

**Ключевые слова:** распространение КВ-радиоволн, модели ионосферы, низкоорбитальная радиотомография.

**Abstract.** We present numerical simulation of ray trajectories of HF radiowaves in the ionosphere. As a model of the medium, we use both the IRI model and the real data obtained by the method of radio-tomography of the ionosphere. The magnetic field is defined by the IGRF model. We compare ray trajectories of HF radiowaves under conditions of natural and artificial ionospheric disturbances.

**Keywords:** HF radiowaves propagation, ionospheric models, low-orbital radiotomography.

**Введение**

Распространение КВ-радиоволн играет важную роль во многих областях, включая, например, дистанционное зондирование, радиосвязь и загоризонтную радиолокацию. Для построения лучевых траекторий КВ-радиосигналов необходимо задание распределения электронной концентрации в ионосфере. Источниками этих профилей могут являться как ионосферные модели, например, IRI [Bilitza, 2014] и GSM TIP [Kotova et al., 2015], так и данные реальных наблюдений. Несмотря на существенные успехи в развитии ионосферных моделей, достигнутые в последнее время, даже лучшие из них не всегда адекватно воспроизводят структурные особенности ионосферы, в том числе в спокойных геомагнитных условиях. В связи с этим целью данной работы является сопоставление лучевых траекторий КВ-радиоволн, полученных в рамках модели IRI2012, с аналогичными траекториями, полученными при использовании данных реальных радиотомографических реконструкций ионосферы в качестве модели среды.

**Методы**

В течение последних десятилетий метод низкоорбитальной радиотомографии (НОРТ) хорошо зарекомендовал себя в изучении строения ионосферы. Благодаря ему были исследованы такие структурные особенности ионосферы, как экваториальная аномалия, перемещающиеся ионосферные возмущения, главный ионосферный провал и др. [Kunitsyn, Tereshchenko, 2003; Pryse, 2003; Bust, Mitchell, 2008].

Кроме того, метод НОРТ успешно использовался для анализа искусственных возмущений ионосферы во время нагревных экспериментов на стендах EISCAT/Heating [Tereshchenko et al., 2000] и СУРА [Kunitsyn et al., 2012].

В НОРТ экспериментах прием двух когерентных спутниковых сигналов на частотах 150 и 400 МГц и регистрация разности фаз между ними (приведенной фазы) осуществляется на цепочке, состоящей из нескольких наземных приемных станций, расположенных вдоль траектории спутников на расстояниях порядка сотен километров. Это позволяет получать двумерные высотно-широтные реконструкции распределения электронной концентрации с пространственным разрешением порядка 20–30 км по горизонтали и 30–40 км по вертикали. В основе метода лежит следующее интегральное уравнение:

$$\lambda r_e \int_l N(r, t) d\sigma = \varphi + \varphi_0, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина зондирующей волны,  $r_e$  — классический радиус электрона,  $N$  — электронная концентрация,  $\varphi$  и  $\varphi_0$  — приведенная и начальная фазы соответственно, а интегрирование ведется вдоль луча спутник-приемник  $l$ . Начальная фаза не измеряется в эксперименте, поэтому для ее исключения используется метод разности фаз, в котором рассматривается разность интегралов вдоль соседних лучей. Затем уравнения (1) для всех приемных пунктов преобразуются в систему линейных алгебраических уравнений, которую можно эффективно решать с помощью итерационных методов типа ART или SIRT [Kunitsyn, Tereshchenko, 2003].

Метод трассировки лучей в данной работе основывается на решении уравнения эйконала, которое в двумерном случае в сферической системе координат принимает вид [Haselgrove, 1954]:

$$\begin{cases} \frac{dr}{d\tau} = \frac{dH}{dk_r}, \\ \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{r} \frac{dH}{dk_\theta}, \\ \frac{dk_r}{d\tau} = -\frac{dH}{dr} + k_\theta \frac{d\theta}{d\tau}, \\ \frac{dk_\theta}{d\tau} = \frac{1}{r} \left( \frac{dH}{d\theta} + k_r \frac{dr}{d\tau} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где  $r$  и  $\theta$  — радиус и коширота,  $k_r$  и  $k_\theta$  — соответствующие им компоненты волнового вектора,  $\tau$  — длина группового пути,  $H$  — гамильтониан, взятый в форме

$$H = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \frac{c^2}{\omega^2} (k_r^2 + k_\theta^2) - n^2 \right], \quad (3)$$

где  $c$  — скорость света,  $\omega$  — угловая частота,  $n$  — коэффициент преломления, вычисляемый по формуле Эпплтона—Хартри. В качестве модели геомагнитного поля была использована модель IGRF [https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html]. Также использовалось бесстолкновительное приближение. Рассматриваемая система ОДУ (2) решалась с использованием метода Рунге—Кутты.

### Результаты

Рассмотрим результаты трассировки лучей на основе данных НОРТ и модели IRI2012. На рис. 1 изображены траектории лучей для двух рассматриваемых вариантов задания двумерного распределения электронной концентрации в ионосфере вдоль меридиана 37.6° E, полученных 16 марта 2015 г. в 21:41 UT. Рис. 1, *а* соответствует данным НОРТ, полученным со спутника Cosmos-2463 на линии Москва—Мурманск, а рис. 1, *б* — данным модели IRI2012. Предполагаемый источник помещен на широте 68° N (Ловозеро) на уровне земли и излучает КВ-радиоволну необыкновенной поляризации (Х-мода) на частоте 4 МГц. Ширина ориентированной в зенит диаграммы направленности источника 80°, шаг между соседними лучами 2°. В рассматриваемый день геомагнитная обстановка была спокойной, индекс  $K_p$  достиг максимума (порядка 3.7) перед полуднем, а затем снижался вплоть до 0.3 ко времени пролета спутника, использованного при получении НОРТ-реконструкции. Несмотря на это на рис. 1, *а* видны большие градиенты электронной концентрации из-за провала ионизации, в то время как в модели IRI2012 они отсутствуют, что приводит к значительно отличающимся картинам хода лучей. В случае использования данных НОРТ мы наблюдаем фокусировку лучей в провале ионизации и их прохождение до высот внешней ионосферы, тогда как для модели IRI2012 все лучи отразились от F слоя ионосферы. Вследствие этого области радиотени и

длины односкачковых путей лучей также значительно отличаются.

Рассмотрим также пример траекторных расчетов КВ-радиоволн в искусственно модифицированной ионосфере. На рис. 2 приведена НОРТ-реконструкция состояния ионосферы во время эксперимента на нагревном стенде СУРА 18 августа 2011 г 18:48 UT [Andreeva et al., 2016]. Эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях ( $K_p=3$ ). Эффективная излучаемая мощность волны накачки обыкновенной поляризации (О-мода) составляла 50 МВт на частоте 4785 кГц, что на 500 кГц ниже критической частоты  $f_oF2=5300$  кГц во время проведения эксперимента. На заданной частоте полуширина диаграммы направленности стенда равна ~15°, при этом угол наклона составлял 12° к югу от вертикали в плоскости геомагнитного меридиана. На реконструкции хорошо виден провал ионизации (~30 %), соответствующий диаграмме направленности стенда. Наличие данного провала создает усло-

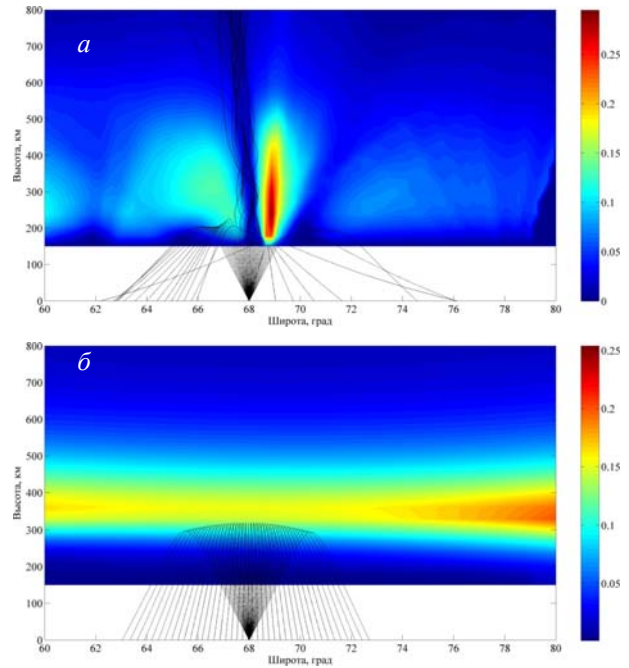


Рис. 1. Сечения электронной концентрации вдоль меридиана 37.6° E, полученные 16 марта 2015 г. в 21:41 UT по данным НОРТ (*а*) и модели IRI2012 (*б*), а также соответствующие им траектории КВ-радиоволн (Х-мода, 4 МГц)

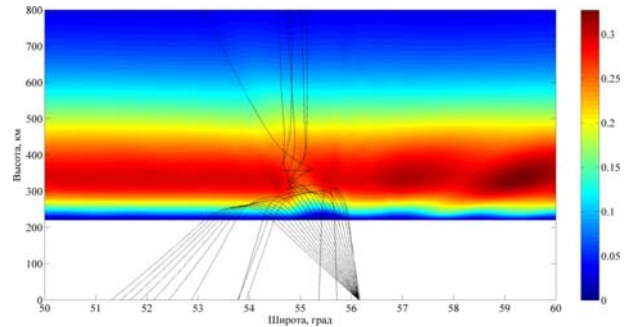


Рис. 2. НОРТ-реконструкция распределения электронной концентрации вдоль меридиана 46.1° E над нагревным стендом СУРА, 18 августа 2011 г. в 18:48 UT, а также соответствующие лучевые траектории КВ-радиоволн (О-мода, 4785 кГц)

вия искусственного каналирования энергии волны накачки на высоты внешней ионосферы. Очевидно, что модель IRI не содержит подобных искусственных возмущений и структур.

### **Заключение**

Пространственные градиенты в распределении электронной концентрации существенно влияют на распространение КВ-радиоволн в ионосфере. Обычно используемые ионосферные модели, например, IRI, не всегда могут верно отобразить эти градиенты даже в условиях невозмущенной геомагнитной обстановки. В этом случае применение НОРТ-реконструкций может предоставить данные для изучения таких важных особенностей распространения КВ-радиоволн в ионосфере, как, например, эффекты фокусировки и каналирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №17-05-01250).

### **Список литературы**

- Andreeva E.S. et al. Radiotomography and HF-raytracing of the arti\_cially disturbed ionosphere above the Sura Heating Facility // *Radio Sci.* 2016. V. 51, no. 6. P. 638–644.
- Bilitza D. et al. The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration // *J. Space Weather Space Climate.* 2014. V. 4. A07. P. 1–12.
- Bust G.S., Mitchell C.N. History, current state, and future directions of ionospheric imaging // *Rev. Geophys.* 2008. V. 46. RG1003.
- Haselgrove J. Ray theory and a new method for ray tracing // In *Conference on the Physics of the Ionosphere*, Phys. Soc. of London. 1954. P. 355–364.
- Kotova D.S. et al. Using IRI and GSM TIP model results as environment for HF radiowave propagation model during the geomagnetic storm occurred on September 2629, 2011 // *Adv. Space Res.* 2015. V. 56, iss. 9. P. 2012–2029.
- Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. *Ionospheric Tomography*. Springer-Verlag, New York. 2003.
- Kunitsyn V.E. et al. Sounding of HF heating-induced arti\_cial ionospheric disturbances by navigational satellite radio transmissions // *Radio Sci.* 2012. V. 47. no 4. RS0L15.
- Pryse S.E. *Ionospheric Tomography // Surveys in Geophys.* 2003. V. 24. P. 1–38.
- Tereshchenko E.D. et al. Irregular structures of the F layer at high latitudes during ionospheric heating // *Ann. Geophys.* 2000. V. 18. P. 1197–1209.
- URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>.