УДК 551.510.535
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-435
ORCID: 0009-0000-0918-8933

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

М.А. Зверев[1,2], А.М. Падохин[3], С.И. Книжин[1,2], В.П. Лебедев[2], Ю.В. Ясюкевич[2]

[1]Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия, mikhail.zverev.90@mail.ru
[2]Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
[3]Московский государственный университет, Москва, Россия

IMPACT OF THE RECEIVER SYSTEM SPATIAL CONFIGURATION ON THE PERFORMANCE OF TOMOGRAPHIC RECONSTRUCTION OF LARGE-SCALE IONOSPHERIC PLASMA INHOMOGENEITIES

M.A. Zverev[1,2], A.M. Padokhin[3], S.I. Knizhin[1,2], V.P. Lebedev[2], Yu.V. Yasyukevich[2]

[1]Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, mikhail.zverev.90@mail.ru
[2]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
[3] Moscow State University, Moscow, Russia

Аннотация. Запущенная в 2024–2025 гг. группировка спутников «Ионосфера-М» предоставила уникальные возможности изучения ионосферы Земли. Для ионосферной радиотомографии перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) требуется корректно подойти к размещению наземной сети станций приема сигналов инструмента МАЯК. В работе реализовано решение томографической системы линейных уравнений на основе итерационного алгоритма DART (Decomposed Algebraic Reconstruction Technique) без регуляризации и проведена симуляция радиотомографических измерений.

Ключевые слова: ионосферная плазма, лучевая радиотомография, перемещающиеся ионосферные возмущения, низкоорбитальный спутник.

Abstract. The Ionosfera-M satellite constellation launched in 2024–2025 has provided unique opportunities for studying the Earth's ionosphere. For ionospheric radiotomography of traveling ionospheric disturbances (TIDs), a proper approach to configuring the ground-based network of receiving stations for the MAYAK instrument is required. This paper implements a solution to the tomographic system of linear equations based on the unregularized iterative DART (Decomposed Algebraic Reconstruction Technique) algorithm and presents a simulation of radiotomographic measurements.

Keywords: ionospheric plasma, ray radio tomography, traveling ionospheric disturbances, low-Earth-orbit satellite.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение околоземного космического пространства является одной из основных задач радиофизики. Неоднородная ионосферная плазма оказывает существенное влияние на процессы распространения радиоволн, определяя стабильность функционирования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), спутниковой радиосвязи и радиолокации. С развитием технологий появились новые методы диагностики ионосферы Земли, такие как спутниковая радиотомография (РТ) и радиозатменные измерения [Куницын и др., 2007; Андреева и др., 2000].

В отличие от большинства радиофизических методов, обеспечивающих лишь локальную диагностику ионосферы, использование сигналов низкоорбитальных спутников позволяет восстанавливать двумерное распределение электронной концентрации с высоким временным и пространственным разрешением при низкой стоимости наземной инфраструктуры [Куницын и др., 2007].

Спутниковую РТ разделяют на лучевую и дифракционную. При помощи лучевой РТ исследуются крупномасштабные ионосферные неоднородности [Куницын и др., 2007; Андреева и др., 2000; James et al., 2017]. Данный метод основан на геометрооптическом приближении, поэтому задача лучевой РТ сводится к восстановлению пространственного распределения электронной концентрации по интегральным измерениям полного электронного содержания (ПЭС) вдоль набора лучей спутник — приемник без учета дифракционных эффектов [Куницын и др., 2007].

Из-за ограниченности ракурсов просвечивания исследуемой плазменной среды задача спутниковой РТ является некорректно поставленной, а восстановление непрерывного распределения профиля электронной концентрации не представляется возможным. Поэтому задачу реконструкции решают в дискретном виде, разбивая реконструируемую область сеткой на отдельные элементы [Куницын и др., 2007]. При этом точность и однозначность томографической реконструкции существенно зависят от траектории, наклонения и угла возвышения пролета спутника, а также от геометрии размещения (плотности, взаимного расположения) наземных приемных пунктов.

В значение линейного интеграла $ПЭС_{ij}$ (ПЭС для i-го приемника в j-м положения спутника) вносят вклад только те элементы сетки, которые пересекаются лучом спутник — приемник, поэтому значения профиля электронной концентрации могут быть отличны от нуля не во всех узлах. Следовательно, задача нахождения значения электронной

концентрации в узлах сетки области реконструкции сводится к решению разреженной системы линейных уравнений при помощи итерационных алгоритмов (ART, DART, SIRT и др.), требующих априорной информации о фоновой структуре ионосферной плазмы [Куницын и др., 2007].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуем планируемую возможную конфигурацию элементов приемной системы сигналов низкоорбитальных спутников «Ионосфера-М» в составе научно-исследовательского комплекса ИСЗФ СО РАН, позволяющей восстанавливать потенциальное пространственное распределение электронной концентрации, пространственные масштабы локальных плазменных неоднородностей и перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ).

Над территорией Иркутской области возможна устойчивая и бесперебойная регистрация сигналов как на нисходящей, так и на восходящей траекториях пролета (в направлении с севера на юг и с юга на север) группировки спутников «Ионосфера-М». К сожалению, максимальная концентрация населенных пунктов наблюдается в южных районах области, в то время как на севере их количество крайне незначительно, что существенно затрудняет там развертывание и техническое обслуживание приемной инфраструктуры. Дефицит опорных точек на севере области и дрейфующая траектория движения космических аппаратов на солнечно-синхронной орбите приводит к геометрическому ограничению ракурсов наблюдения и сужению эффективного совокупного сектора обзора приемной системы. В связи с этим для компенсации данных факторов на траекториях обоих типов пролета спутника расположение приемных станций целесообразно выбрать в населенных пунктах Торы, Монды, Саянск, Братск и Усть-Илимск (рис. 1).

Как известно, электронную концентрацию неоднородной ионосферной плазмы $N(r)$ можно представить в виде суммы ее фонового профиля $\underline{N}(r)$ и флуктуаций $\widetilde{N}(r)$ относительно него (аддитивный вклад неоднородностей). Для модели фоновой среды и начального приближения итерационного алгоритма выберем плоскослоистое приближение в виде простого слоя Чепмена [Дэвис, 1973]:

$$\underline{N}_{chap}(h) = \underline{N}_m exp\left[1 - \frac{h-h_m}{H} - exp\left(-\frac{h-h_m}{H}\right)\right], \quad (1)$$

где h_m — высота максимума ионосферной ионизации, H — характерная полутолщина слоя, $\underline{N}_m$ — значение электронной концентрации в максимуме ионосферной ионизации.

В качестве вариации электронной концентрации рассматривалось ПИВ. Для его модели использовалась распространяющаяся вдоль меридиана плоская волна, имеющая ограничивающие огибающие по высоте и долготе (здесь (λ, φ, h) — широта, долгота и высота в системе координат WGS84):

$$\widetilde{N}_{tid}(t,\lambda,\varphi,h) = \widetilde{N}_{mtid} H(h) L(\varphi) cos\left(\frac{2\pi}{T_{tid}} t + \frac{2\pi}{\lambda_{tid}}(\lambda - v_{tid} t) + \Phi_0\right), \quad (2)$$

где $\widetilde{N}_{mtid}$ — максимальное значение вариации электронной концентрации ПИВ, $H(h)$ и $L(\varphi)$ — ограничивающие высотная и долготная огибающие, T_{tid} — период ПИВ, λ_{tid} – горизонтальная длина волны, v_{tid} – скорость ПИВ, Φ_0 — начальная фаза волны.

Ограничивающие высотная и долготная огибающие имеют экспоненциальное затухание:

$$H(h) = \{exp\left(-\left(\frac{h-h_{mid}}{H_{tid}}\right)^2\right), \quad h_{min} \le h \le h_{max}, 0, \quad h < h_{min} \cup h > h_{max}, \quad (3)$$

$$L(\varphi) = exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\varphi-\varphi_0}{\sigma_{\varphi tid}^{(rad)}}\right)^2\right], \quad (4)$$

здесь $h_{mid} = \frac{h_{min}+h_{max}}{2}$ — высота центра ПИВ, H_{tid} — экспоненциальный высотный масштаб затухания, φ_0 — центральная долгота (вдоль которой распространяется ПИВ), а $\sigma_{\varphi tid}^{(rad)}$ — характерный долготный угловой размер.

При численных расчетах используются следующие параметры. Высота орбиты низкоорбитального спутника — 820 км, рабочие частоты — 150 и 400 МГц. Орбита спутника рассчитывалась на основе TLE «Ионосфера-М2» для 15 мая 2026 г. В модели фоновой ионосферы $h_m = 350$ км, $H = 100$ км, $\underline{N}_m = 10^{12}$ м$^{-3}$. Параметры ПИВ: $T_{tid} = 30$ мин, $v_{tid} = 100$ м/с, $\lambda_{tid} = 300$ км, $h_{tid} \ni [200\text{ км}, 400\text{ км}]$, ($h_{mid} = 300$ км, $H_{tid} = 50$ км), $\widetilde{N}_{mtid} = 0.3 \cdot \underline{N}_m$, $\varphi_0 = 103°\,E$, $\sigma_{\varphi tid} = 120$ км, $\Phi_0 = 0$. Размерность сетки реконструкции составляет 80×80, число итераций алгоритма DART и значение параметра релаксации равны 50 и 0.07 соответственно. Регуляризация, межитерационное сглаживание, весовые функции и порог обновления значения узлов ячеек не использовались.

Расчеты выполнены в системе координат WGS84, а для трассировки лучей спутник — приемник использована система координат ECEF (с последующим переводом полученных координат обратно в WGS84).

На рис. 2 показано исходное модельное распределение электронной концентрации, на рис. 3 — результат его реконструкции методом лучевой РТ. В данном случае демонстрируется приемлемое восстановление интенсивности и структуры ПИВ. Однако из рис. 3 видно, что восстановление пространственного распределения электронной концентрации происходит асимметрично и ограничено совокупным сектором обзора приемной системы.

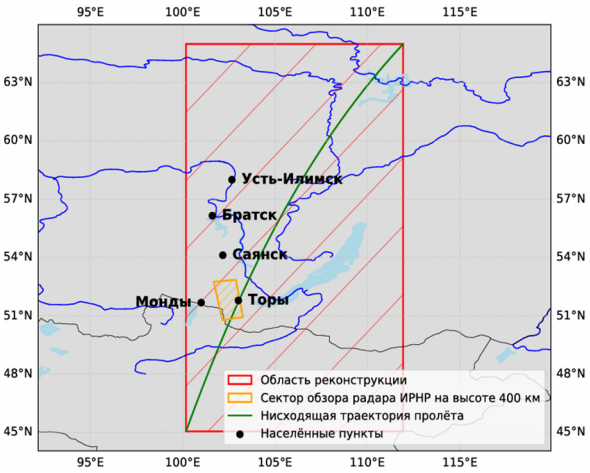

Рис. 1. Сектор обзора радара ИРНР и область реконструкции для нисходящей траектории пролета спутника с выбранными наземными приемными пунктами

Подобное поведение объяснимо геометрией сканирования лучей ПИВ (происходит незначительное пересечение ПИВ линией визирования, см. рис. 1) и структурой алгоритма. Так, при реконструкции в сечении широта—высота накладывается условие отсутствия долготного градиента исследуемой среды в выбранной области реконструкции, в то время как в модели плазменной среды, следовательно, и в ПЭС данный градиент учитывается.

На рис. 4 показан результат реконструкции модельного распределения электронной концентрации (рис. 2) без учета долготной зависимости ПИВ ($L(\varphi) = 1$). Полученные результаты показывают, что отсутствие долготного градиента приводит к симметричному восстановлению пространственного распределения электронной концентрации внутри сектора обзора приемной системы. Таким образом, результат томографической реконструкции напрямую зависит от характера и степени гладкости долготного градиента исследуемых плазменных структур. Стоит отметить, что сильная нестационарность исследуемой среды накладывает существенные ограничения на разрешающую способность спутниковой РТ, так как в рамках данного метода учитывается информация, получаемая за все время зондирования спутником неоднородной ионосферной плазмы.

В рассматриваемом случае выполняется гипотеза вмороженности среды, так как время синтезирования спутником апертуры по плоскости излучения значительно меньше характерного периода ПИВ.

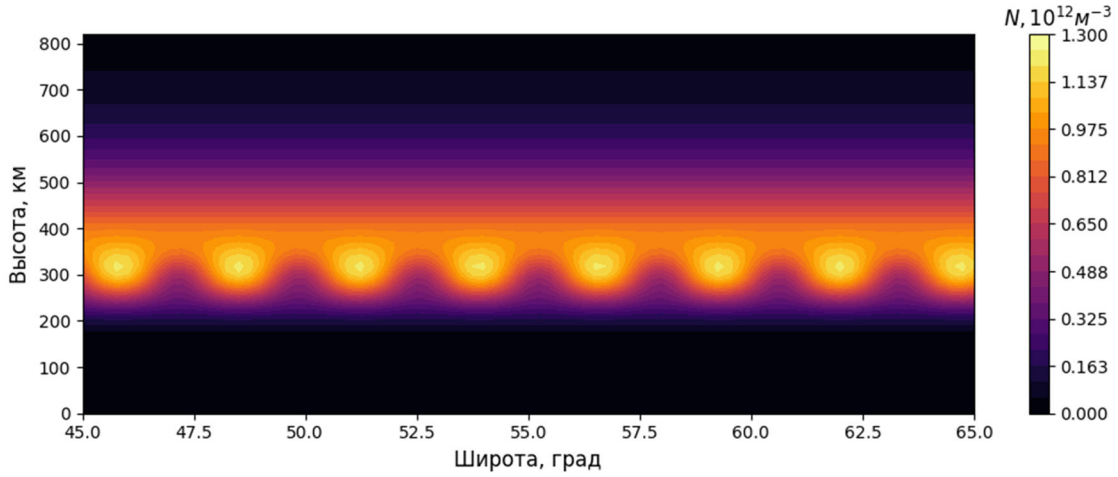

Рис. 2. Модель ионосферы с ПИВ

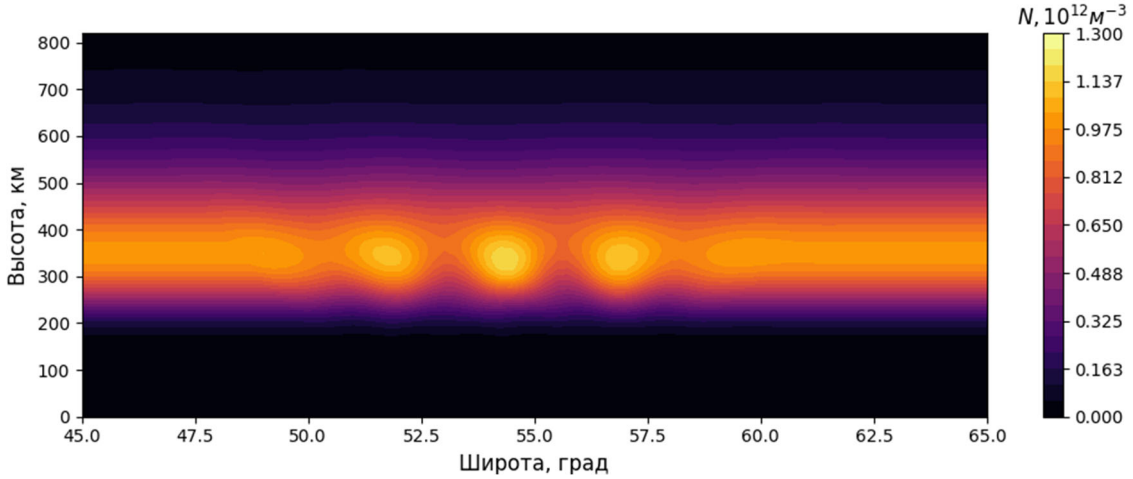

Рис. 3. Реконструкция модели (см. рис. 2) методом лучевой радиотомографии с учетом расположения наземных приемных пунктов и орбиты спутника (см. рис. 1)

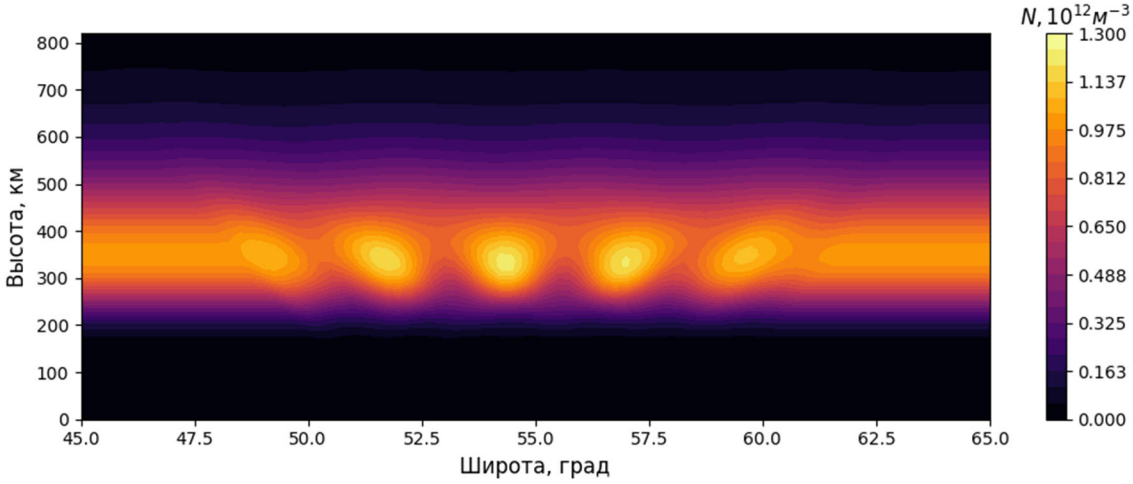

Рис. 4. Реконструкция модели (см. рис. 2) при $L(\varphi) = 1$ методом лучевой радиотомографии с учетом расположения наземных приемных пунктов и орбиты спутника (см. рис. 1)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численных расчетов показали, что рассматриваемая конфигурация расположения элементов наземных приемных пунктов в составе научно-исследовательского комплекса ИСЗФ СО РАН (Торы, Монды, Саянск, Братск, Усть-Илимск) обеспечивает приемлемое восстановление параметров перемещающихся ионосферных возмущений и крупномасштабной структуры ионосферы Земли по сигналам группировки спутников «Ионосфера-М». Для достижения максимального качества томографической реконструкции необходимо выполнение условия плавности долготного градиента и гипотезы вмороженности исследуемых плазменных структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278, Задание № FZZE-2026-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреева Е.С., Бербенева Н.А., Захаров В.И. и др. Радиотомографический и радиозатменный метод исследования ионосферы // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 1. № 1. С. 74–80.

Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 504 с.

Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.

James H.G., Frolov V.L., Andreeva E.S., et al. Sura heating facility transmissions to the cassiope/e-pop satellite // Radio Sci. 2017. V. 52. Iss. 2. P. 259–270.