УДК 004.42:550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-417
Orcid 0009-0002-3217-8711

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ $N_e(h)$ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Н.А. Громик, В.П. Лебедев

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, gromik@iszf.irk.ru

METHOD FOR AUTOMATIC RECONSTRUCTION OF THE $N_e(h)$ PROFILE FROM VERTICAL SOUNDING DATA BASED ON A LOW-PARAMETER MODEL

N.A. Gromik, V.P. Lebedev

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, gromik@iszf.irk.ru

Аннотация. Представлен метод автоматического восстановления высотного профиля электронной концентрации $N_e(h)$ по данным вертикального зондирования. Разработанный программный комплекс SPRINTER основан на согласовании модельных высотно-частотной характеристик, рассчитанных для обыкновенной и необыкновенной магнитоионных компонент, с амплитудным распределением сигнала на ионограмме. Работа метода проверена на данных дигизондов DPS-4, расположенных в Иркутске и Норильске, также было проведено сравнение с данными Иркутского радара некогерентного рассеяния.

Ключевые слова: восстановление профиля электронной концентрации, B-сплайны, обратная задача, малопараметрическая модель.

Abstract. A method for automatic reconstruction of the vertical electron density profile $N_e(h)$ from vertical sounding data is presented. The developed software package SPRINTER is based on matching the model ionogram trace, computed for the ordinary and extraordinary magnetoionic components, against the signal amplitude distribution on the ionogram. The method was verified by data from the DPS-4 digisondes located in Irkutsk and Norilsk; a comparison was made with data from the Irkutsk Incoherent Scatter Radar.

Keywords: electron density profile reconstruction, B-splines, inverse problem, low-parameter model.

ВВЕДЕНИЕ

Высотный профиль электронной концентрации $N_e(h)$ — базовая характеристика ионосферы, используемая в задачах КВ-связи, загоризонтной радиолокации и в моделях ионосферных поправок навигационных систем [Reinisch et al., 1997; Belehaki et al., 2015]. Основным источником данных для его восстановления над пунктом наблюдения остаются вертикальные ионозонды, регистрирующие действующую (виртуальную) высоту отражения $h_d(f)$. Задача восстановления $N_e(h)$ по ионограмме сводится к решению обратной задачи для интегрального уравнения, связывающего $h_d(f)$ и $N_e(h)$ через групповой показатель преломления среды.

В сети цифровых ионозондов GIRO для автоматической обработки используется алгоритм ARTIST [Galkin, Reinisch, 2008], выделяющий высотно-частотные характеристики (ВЧХ) обыкновенной (O) компоненты следа и пересчитывающий их в $N_e(h)$ при помощи NHPC [Huang, Reinisch, 1996]. Параллельно развиваются альтернативные подходы, например, методы машинного обучения [Niu, 2024].

Общим ограничением последовательной схемы выделения трека ВЧХ и последующей инверсии $N_e(h)$ остается потеря информации на этапе выделения трека ВЧХ из амплитудного распределения сигнала: при низком отношении сигнал/шум, размытии следа или сложной морфологии слоев качество восстановления заметно снижается. Помимо этого, расчет групповой задержки в анизотропной плазме требует знания гирочастоты электронов f_H, которая в существующих реализациях задается из модели IGRF [Alken et al., 2021]. По экспериментальным ионограммам приемо-передающего комплекса ИСЗФ СО РАН было выявлено систематическое отличие прогноза IGRF от фактически полученных значений.

В настоящей работе предложен метод, в котором профиль $N_e(h)$ восстанавливается через прямое согласование модельных ВЧХ обеих магнитоионных компонент с амплитудным распределением на ионограмме, без промежуточного выделения трассы. Профиль представлен в виде малопараметрической модели, где каждый высотный слой может быть представлен в виде аналитических или эмпирических моделей. Полученный модельный профиль интерполируется B-сплайном и представляется в виде набора параболических функций, для которого интегрирование группового показателя преломления выполняется аналитически. Разработанный программный комплекс получил название SPRINTER (SPline-based Radio-sounding INversion with True-height Electron-density Reconstruction). Приведены результаты верификации метода и оценка отличия наблюдаемой гирочастоты от её значений по модели IGRF.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

В основе метода лежит поиск управляющих параметров малопараметрической модели профиля $N_e(h)$, обеспечивающих наилучшее согласование модельной ВЧХ для О- и Х-компонент с амплитудным распределением сигнала на ионограмме. Преобразование от $N_e(h)$ к ВЧХ выполняется по формуле

$$h_d(f) = \int_{h_0}^{h_r(f)} \frac{dh}{\mu_g(N_e(h),\ f,\ f_H, \theta)}, \qquad (1)$$

где μ_g — групповой показатель преломления, вычисляемый для обыкновенной и необыкновенной мод через уравнение Эпплтона — Хартри (2); f_H — гирочастота электронов; $h_r(f)$ — истинная высота отражения. Уравнение Эпплтона — Хартри в приближении холодной бесстолкновительной плазмы представлено в виде

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

где $X = \left(\frac{f_p}{f}\right)^2$ — нормированная плазменная частота, $Y = \frac{f_H}{f}$ — нормированная электронная гирочастота, $Y_T = Y\ sin\ sin\ \theta$, $Y_L = Y\ cos\ cos\ \theta$, θ — угол между направлением распространения волны и вектором геомагнитного поля.

Для уменьшения вычислительных затрат при расчете ВЧХ используется интерполяционный B-сплайн второго порядка. Такой подход обеспечивает возможность представления произвольного дискретного профиля $N_e(h)$ в виде набора параболических функций, для которых интеграл действующей высоты имеет аналитическое выражение через элементарные функции.

Каждая модель имеет управляющие параметры, которые перебираются в определенном диапазоне, и в результате выбираются те, для которых оценка качества будет максимальной. Оценка качества представляет собой нормированную сумму амплитуд вдоль ВЧХ. Каждая точка ВЧХ оценивается в рамках окна $[W, H]$, где W — ширина и H — высота окна. Итоговая оценка вычисляется по формуле

$$F(p) = \sum_{m\in\{O,X\}} \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} W_{m,i}\, g\left(f_{m,i}^{\text{изм}}, f_{m,i}^{\text{расч}}(p)\right) \to max, \qquad (3)$$

где p — вектор управляющих параметров малопараметрической модели (например, h_mF2, f_oF2, толщина слоя и др.), g — функция оценки соответствия, W — весовые коэффициенты, учитывающие надежность конкретной точки ВЧХ: чем дальше ячейка ионограммы находится от центра окна, тем меньший вклад вносит ее амплитуда в итоговую оценку; N — число точек для данной компоненты, m — магнитоионная компонента (O, X).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

Работа SPRINTER проверялась по результатам ручной обработки данных дигизонда DPS-4, расположенного в г. Иркутск. Использовались результаты обработки за период 2020–2024 гг. Была проведена оценка соответствия восстановленных параметров h_mF2 и f_oF2, где в качестве эталонных значений принимались результаты обработки оператором (рис. 1).

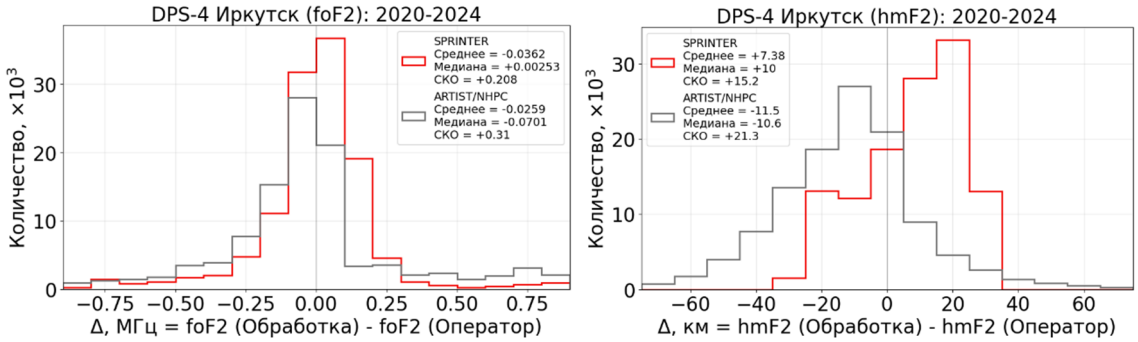

Рис. 1. Гистограммы распределения разностей восстановленных параметров в сравнении с операторской обработкой

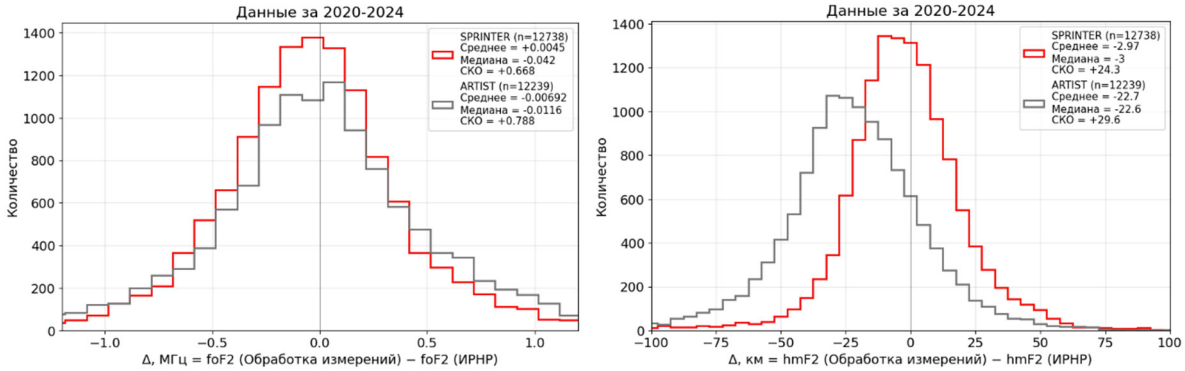

Рис. 2. Гистограммы распределения разностей восстановленных параметров в сравнении с данными ИРНР

Как можно заметить на рис. 1, параметр h_mF2, восстановленный SPRINTER, имеет завышение

относительно профиля $N_e(h)$, восстановленного посредством NHPC по выделенному оператором треку. Для верификации результатов были привлечены данные Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР). В отличие от метода вертикального зондирования ИРНР измеряет высотный профиль мощности сигнала, не опираясь на восстановление из ВЧХ. Результаты сравнения с данными ИРНР по 188 дням (за период 2020–2024 гг.) представлены на рис. 2.

Как можно заметить на рис. 2, параметр h_mF2, восстановленный посредством NHPC по выделенному алгоритмом ARTIST треку (далее ARTIST/NHPC), имеет занижение относительно профиля $N_e(h)$, восстановленного по данным ИРНР. Таким образом, результаты работы SPRINTER соответствуют независимым измерениям ИРНР.

Были обработаны также ионограммы дигизонда DPS-4, расположенного в г. Норильск, за период 2019–2025. Эти данные примечательны тем, что они не были обработаны оператором вручную, поэтому сравнение выполняется с результатами автоматической обработки ARTIST/NHPC. На рис. 3 видно завышение параметра h_mF2 относительно данных ARTIST/NHPC, однако это можно объяснить систематическим занижением ARTIST/NHPC параметра h_mF2.

Критические частоты обыкновенной и необыкновенной компонент связаны соотношением $f_xF2 - f_oF2 \approx \frac{f_H}{2}$. Это дает прямую оценку f_H из ионограммы и позволяет сравнить ее с прогнозом модели IGRF, рассчитанным для координат станции и высоты 300 км. Выбор высоты обусловлен слабой зависимостью f_H в области F. Примеры ионограмм ст. Норильск представлены на рис. 4.

Программный комплекс SPRINTER был также протестирован на данных ионозонда ПАРУС-А, расположенного в г. Калининград. Результаты сопоставления для трех станций сведены в табл. 1. На всех трех точках наблюдается положительное отличие $f_{H(набл)}$ от $f_{H(IGRF)}$.

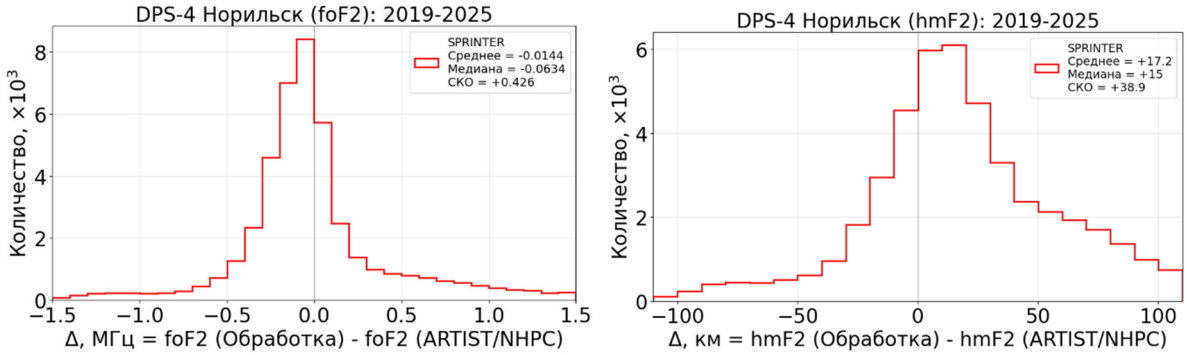

Рис. 3. Гистограммы распределения разностей восстановленных параметров в сравнении с ARTIST/NHPC

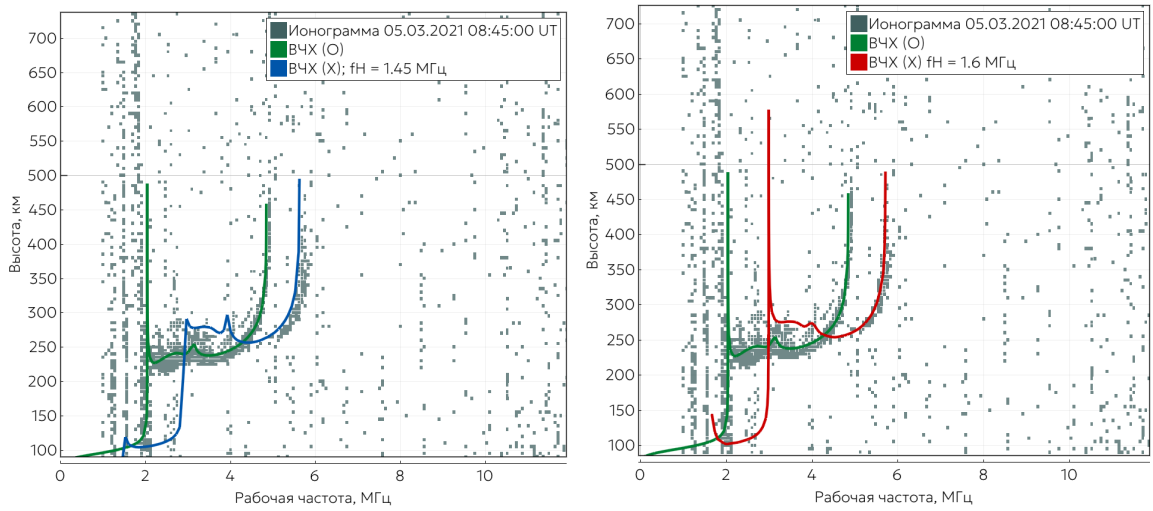

Рис. 4. Ионограмма 05.03.2021 08:45:00 UT с модельными ВЧХ

Таблица 1. Сравнение гирочастот трех станций

Город	Широта (с.ш., град)	Долгота (в.д., град)	Дата и время (UT)	$f_{H(IGRF)}$ (300 км)	Эксперимент	Δ, МГц
Калининград	54.71	20.46	2025-06-21 12:00	1.246246 МГц	1.3 МГц	0,053754
Иркутск	52.4	104.3	2024-02-28 00:00	1.450918 МГц	1.6 МГц	0,149082
Норильск	69.4	88.1	2021-03-05 08:00	1.457932 МГц	1.6 МГц	0,142068

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен программный комплекс SPRINTER, восстанавливающий профиль $N_e(h)$ с использованием малопараметрической модели с оценкой качества восстановления по двум магнитоионным компонентам.

По данным дигизондов в Иркутске (2020–2024 гг.) и Норильске (2019–2025 гг.) восстановленные программным комплексом SPRINTER значения f_oF2 согласуются с результатами ручной обработки в пределах ее погрешности, тогда как значения h_mF2 систематически занижены. Независимое сопоставление с данными ИРНР (2020–2024 гг.) показывает, что это расхождение обусловлено занижением h_mF2 при последовательной обработке оператором и алгоритмом NHPC. Восстановленные программным комплексом SPRINTER значения h_mF2 не имеют систематического смещения относительно данных ИРНР.

По ионограммам трех станций выявлено также систематическое превышение наблюдаемой гирочастоты электронов над прогнозируемой IGRF на 0.05–0.15 МГц.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность КФ ИЗМИРАН за предоставленные данные Калининградской обсерватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Alken P., Thébault E., Beggan C.D., et al. International Geomagnetic Reference Field: The thirteenth generation // Earth, Planets and Space. 2021. V. 73, 49. DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x.

Belehaki A., Tsagouri I., Kutiev I., et al. The European Ionosonde Service: Nowcasting and forecasting ionospheric conditions over Europe for the ESA Space Situational Awareness services // J. Space Weather Space Clim. 2015. V. 5, A25. DOI: 10.1051/swsc/2015026.

Galkin I.A., Reinisch B.W. The New ARTIST 5 for all Digisondes // INAG Bulletin No. 24. 2008. 8 p.

Huang X., Reinisch B.W. Vertical electron density profiles from the Digisonde network. Adv. Space Res. 1996. Vol. 18. P. 121–129. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00912-4.

Niu L., Wen L., Zhou C., Deng M. A profile inversion method for vertical ionograms // AIP Adv. 2024. V. 14, N 6, 065034. DOI: 10.1063/5.0208687.

Reinisch B., Haines D., Bibl K., et al. Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar // Radio Sc. 1997. V. 32, N 4. P. 1681–1694. DOI: 10.1029/97RS00841.