

МЕТОДИКА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СИНТЕЗА ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПОСРЕДСТВОМ ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ

А. М. Симаков¹ [0009-0009-7365-720X], А. О. Щирый² [0000-0001-7312-4424]

¹НИИУ Московский энергетический институт, г. Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

¹nickhaos9@gmail.com, ²andreyschiriy@gmail.com

Аннотация.

Исследован синтез ионограмм вертикального радиозондирования ионосферы с использованием физически информированных нейронных сетей. В предложенном подходе нейронная сеть применена не для непосредственного формирования изображения, а для аппроксимации высотного профиля электронной концентрации. Обучение сети выполнено с учетом стационарного одномерного уравнения баланса, включающего источник ионизации, рекомбинационные потери и эффективный перенос заряженных частиц. В функцию потерь дополнительно введены граничные условия, ограничение на гладкость профиля и диагностические параметры слоя F₂. Полученный профиль электронной концентрации преобразован в распределение плазменной частоты по высоте. Затем без учета магнитного поля Земли и столкновений электронов с другими частицами рассчитаны точки отражения, групповой показатель преломления и зависимость действующей высоты от частоты зондирования. На основе этой зависимости сформировано синтетическое изображение ионограммы с фоновым шумом и вертикальными помеховыми структурами. В пилотном эксперименте получены физически разумные масштабы максимума электронной концентрации и критической частоты слоя F₂. Результаты подтверждают возможность построения единой физически согласованной цепочки от высотного профиля электронной концентрации до изображения ионограммы. Разработанный подход

может применяться для генерации контролируемых синтетических данных, исследования влияния параметров ионосферы на форму ионограммных следов и последующей разработки алгоритмов автоматической обработки результатов радиозондирования.

Ключевые слова: ионосфера, ионограмма, вертикальное радиозондирование, электронная концентрация, плазменная частота, действующая высота, физически информированная нейронная сеть, PINN, синтетические данные, машинное обучение, радиофизическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования ионосферы востребованы как для фундаментальной науки (для построения и уточнения моделей геофизических процессов), так и для прикладных целей. Радиозондирование ионосферы является одним из наиболее информативных способов исследования состояния ионосферной плазмы и ионосферных радиолиний [1–6]. Результаты работы ионозонда представляют в виде ионограммы [1, 2]. Существуют различные виды радиозондирования ионосферы. Ионограмма вертикального радиозондирования ионосферы представляет собой зависимость амплитуды принятого сигнала от частоты f и действующей высоты отражения h' . Однако в процессе обработки и интерпретации реальных ионограмм возникает потребность в создании синтетических ионограмм, позволяющих идентифицировать треки мод распространения сигнала, отличать полезный сигнал от фоновых шумов и сосредоточенных помех, а также отлаживать алгоритмы автоматической обработки [3–5]. Традиционно синтез ионограмм базируется на решении краевой задачи распространения радиоволн в двумерно-неоднородной ионосфере [7–10]. Однако появление физически информированных нейронных сетей (physics-informed neural network, PINN) открывает новые возможности в синтезе ионограмм [11].

Цель настоящей работы – разработка и апробация нового метода синтеза ионограмм, в котором профиль электронной концентрации не задан непосредственно аналитической кривой, а получен как решение дифференциальной задачи, аппроксимируемое физически информированной нейросетью.

МОДЕЛЬ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ

Физической основой проведенного исследования служит уравнение (1) баланса для электронной концентрации [12]:

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = P - L - \frac{\partial J}{\partial h}, \quad (1)$$

где N_e – концентрация электронов, P – скорость ионообразования, L – потери, J – вертикальный поток заряженных частиц.

В реализованном прототипе рассмотрены нормированные высота $x \in [0, 1]$ и концентрация $n(x)$. Для синтеза высотного профиля используем следующую стационарную постановку:

$$\frac{d}{dx} \left[D(x) \frac{dn}{dx} \right] + q(x) - \alpha(x)n^2 = 0. \quad (2)$$

Здесь $D(x)$ – эффективный коэффициент транспорта, возрастающий в верхней части расчетной области; $\alpha(x)$ – эффективный коэффициент потерь, более высокий в нижней ионосфере; $q(x)$ – заданный источник ионизации. Для основного вклада области F применена пик-нормированная чепменовская форма

$$q_F(x) = A_F \exp\{1 - z - \exp(-z)\}, \quad z = \frac{x - x_m}{H_x},$$

дополненная слабыми вкладами областей E и F1.

Переход от безразмерной переменной x к физической высоте осуществим с помощью линейного отображения $h = h_0 + (h_1 - h_0)x$, где в пилотном расчете $h_0 = 90$ км и $h_1 = 520$ км. Такая нормировка удобна для PINN-оптимизации: величины в уравнении (2) имеют сопоставимый масштаб, а коэффициенты $D(x)$, $\alpha(x)$ и $q(x)$ легче варьировать без численной жесткости. Нижняя граница соответствует области ниже основного максимума слоя F, тогда как верхняя граница выбрана так, чтобы сохранить заметную электронную концентрацию над максимумом и не обрезать профиль искусственно.

PINN-ПОСТАНОВКА

Нейросеть $\hat{n}_\theta(x)$ принимает высоту x и возвращает положительную оценку концентрации. Производные по высоте вычисляются автоматическим дифференцированием. В функционал обучения включена невязка уравнения (2),

граничные ограничения, слабое априорное ограничение на чепменовскую форму и якоря на диагностические параметры

$foF2$ и $hmF2$:

$$L = \lambda_R \langle R_\theta^2(x) \rangle + \lambda_b [\hat{n}_\theta(0) - n_b]^2 + \lambda_t [\hat{n}_\theta(1) - n_t]^2 + \lambda_f [\hat{n}_\theta(x_m) - n_m]^2 + \lambda_h \left[\frac{d\hat{n}_\theta}{dx}(x_m) \right]^2 + \lambda_p \left\langle [\hat{n}_\theta(x) - n_p(x)]^2 \right\rangle.$$

где R_θ – левая часть уравнения (2), x_m соответствует целевой высоте максимума слоя F_2 , n_m – концентрация, соответствующая целевой частоте $foF2$, $n_p(x)$ – гладкий профиль-prior.

Такой функционал не сводится к простому «подгону» двух параметров. Слагаемое невязки уравнения задает физическую согласованность профиля во всей области, граничные штрафы стабилизируют решение на краях интервала, а prior ограничивает класс допустимых форм разумными гладкими профилями. Якорь на $hmF2$ фиксирует положение главного максимума, а якорь на $foF2$ определяет его масштаб по концентрации. В результате PINN получает достаточную свободу для перестройки формы $N_e(h)$, но не уходит в нефизические осциллирующие решения, которые часто возникают в плохо обусловленных обратных задачах.

Важно подчеркнуть ограничение текущей постановки: целевые значения $foF2$ и $hmF2$ использованы как управляющие параметры синтеза. Реальные ионограммы в обучение на данном этапе не включались.

ПЕРЕХОД ОТ ПРОФИЛЯ К ИОНОГРАММЕ

После обучения профиль переведем в физические единицы. Плазменную частоту вычислим по формуле

$$f_p = 8.98 \cdot 10^{-6} \sqrt{N_e(\text{м}^{-3})}.$$

Для формирования следа ионограммы используем приближение обыкновенной компоненты без магнитного поля и столкновений. Групповой показатель зададим в виде

$$n_g(f, h) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_p(h)}{f}\right)^2}}. \quad (3)$$

Действующую высоту $h'(f)$ найдем с помощью численного интегрирования n_g от нижней границы модели до точки поворота луча с добавлением участка свободного распространения от Земли до нижней границы. Полученную кривую преобразуем в полутоновое изображение; дополнительно вводим фоновый шум и вертикальные помеховые структуры, характерные для представления ионограмм как изображений [2, 3].

В выбранном приближении отражение обыкновенной компоненты происходит в окрестности высоты, где $f_p(h)$ достигает частоты зондирования. Поэтому форма трассы $h'(f)$ определяется не только положением максимума $N_e(h)$, но и тем, насколько быстро возрастает профиль на подходе к слою F_2 . Более пологий рост дает большую действующую высоту на промежуточных частотах, тогда как резкий фронт приводит к более компактной трассе. Это важно для синтетических данных: даже при одинаковом f_oF_2 разные формы профиля дают различимую геометрию следа на ионограмме.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В вычислительном эксперименте целью синтеза были выбраны $f_oF_2 = 9.4$ МГц и $h_mF_2 = 340$ км. В обучении были использованы 10000 эпох, 1536 случайных коллокационных точек на эпоху и шаг оптимизатора Adam $5 \cdot 10^{-4}$. Расчетная область по высоте составляла 90–520 км. В табл. 1 представлены основные численные результаты пилотного расчета.

Контрольные значения действующей высоты составили $h'(3 \text{ МГц}) = 186.1$ км, $h'(5 \text{ МГц}) = 287.6$ км, $h'(7 \text{ МГц}) = 359.8$ км, $h'(9 \text{ МГц}) = 457.1$ км. Полученные значения показывают, что расчет воспроизводит не только заданное положение максимума, но и разумный ход групповой задержки в широком диапазоне частот. В частности, $f_p(520 \text{ км}) = 5.15$ МГц указывает на сохранение заметной концентрации на верхней границе расчетной области; это означает, что максимум слоя F_2 не сформирован за счет искусствен-

ного прижатия решения к нулю на верхнем крае интервала. Рост $h'(f)$ при приближении к $foF2$ согласуется с физическим смыслом действующей высоты: по мере уменьшения знаменателя в формуле (3) возрастает вклад группового замедления волны.

Табл. 1. Основные численные результаты пилотного расчета.

Параметр	Значение
Финальная невязка уравнения L_R	$3.08 \cdot 10^{-3}$
Оценка $foF2$	9.36 МГц
Оценка $hmF2$	340.0 км
Максимум N_e	$1.09 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$
f_p на верхней границе 520 км	5.15 МГц
Диапазон частот с отражением	1.23–9.34 МГц
Диапазон рассчитанных h'	97.8–604.8 км

На рис. 1 показаны использованный высотный профиль источника и соответствующий ему профиль плазменной частоты. Видно, что основной вклад источника сосредоточен в области F, а максимум $f_p(h)$ формируется вблизи целевого значения $hmF2$. На рис. 2 приведены восстановленный профиль электронной концентрации и рассчитанная высотно-частотная характеристика. Эти зависимости демонстрируют согласованность между формой $N_e(h)$ и поведением $h'(f)$ в рабочем диапазоне частот. На рис. 3 показано соответствующее синтетическое изображение ионограммы в инвертированной палитре.

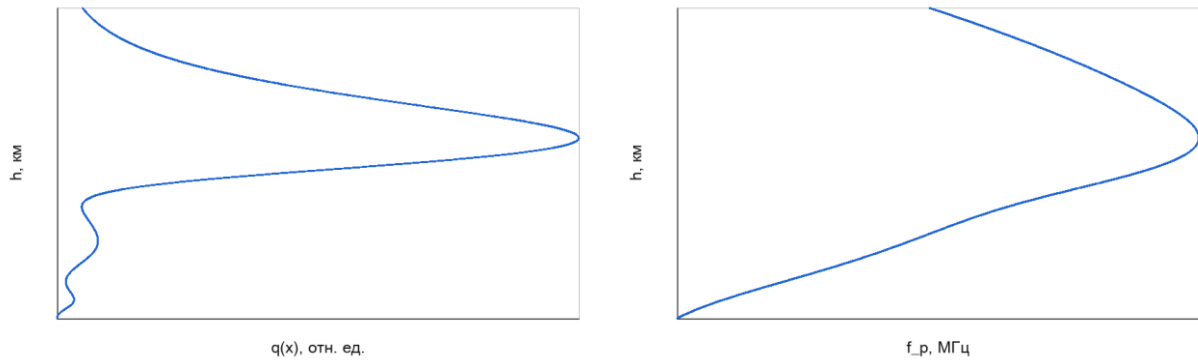


Рис. 1. Слева: высотный профиль источника $q(x)$, справа: полученный профиль плазменной частоты $f_p(h)$.

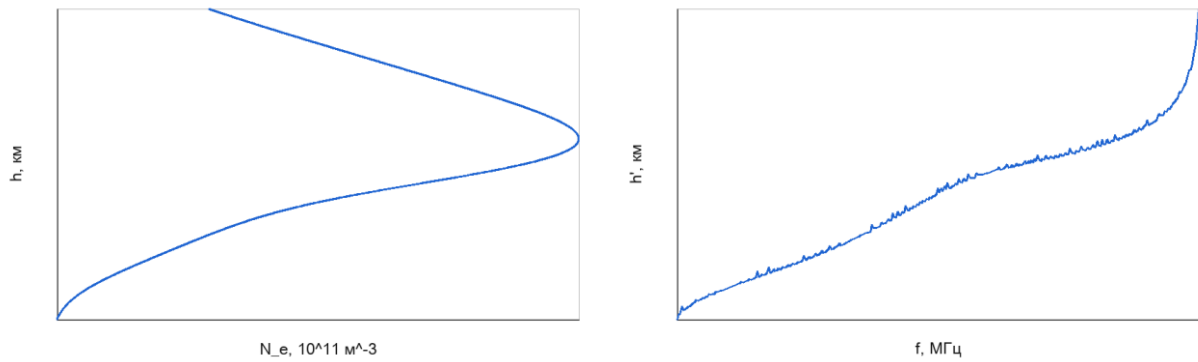


Рис. 2. Слева: профиль электронной концентрации $N_e(h)$, справа: рассчитанная высотно-частотная характеристика $h'(f)$.

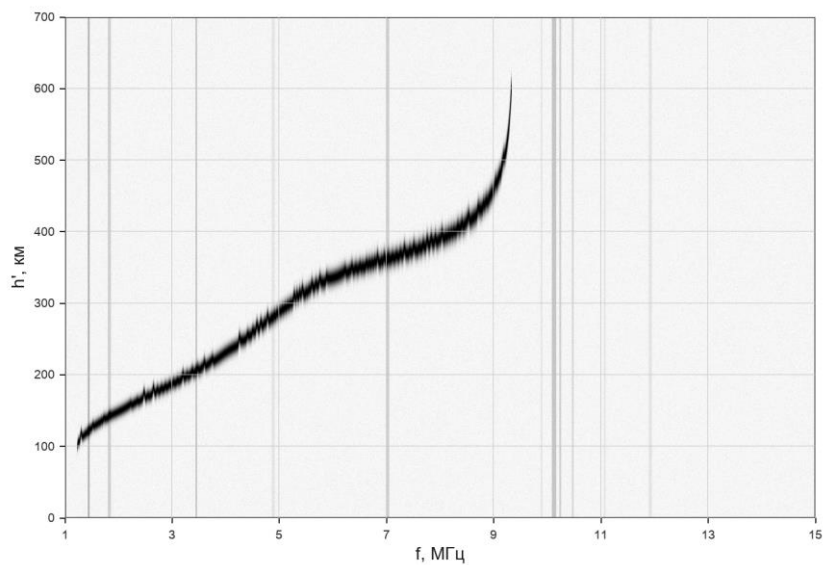


Рис. 3. Синтетическое изображение ионограммы, полученное из рассчитанной кривой $h'(f)$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенная методика демонстрирует возможность получить согласованную цепочку

$$\hat{n}_\theta(x) \rightarrow N_e(h) \rightarrow f_p(h) \rightarrow h'(f) \rightarrow \text{изображение ионограммы.}$$

По сравнению с прямым заданием ионограммного следа такой подход сохраняет явную связь изображения с высотным профилем электронной концентрации.

Вместе с тем модель остается демонстрационной. В ней нет нестационарности, горизонтальной неоднородности, полного магнитоионного выражения показателя преломления, столкновительного поглощения, отдельной X-компоненты и самостоятельного следа спорадического слоя Es. Поэтому полученную ионограмму следует интерпретировать как контролируемый синтетический образец, а не как результат расчета для конкретного сеанса наблюдений.

Тем не менее именно такая упрощенная постановка полезна как промежуточный этап. Она позволяет связать параметры профиля, диагностические характеристики слоя и итоговое изображение одной вычислительной схемой. Для задач автоматического распознавания это особенно полезно: можно генерировать семейства ионограмм с известной физической подложкой, варьировать уровень шума и помех, а затем проверять устойчивость алгоритмов выделения следа и оценивания $foF2$, $hmF2$ и других параметров. Кроме того, дифференцируемость всей вычислительной схемы делает естественным следующий шаг – включение в функционал наблюдательного слагаемого, зависящего уже не только от профиля, но и от положения следа на самой ионограмме.

На текущем этапе наиболее информативными результатами являются не итоговые полутоновые изображения, а профили $N_e(h)$, $f_p(h)$ и высотно-частотная характеристика $h'(f)$. Именно эти зависимости непосредственно отражают качество физической постановки и позволяют локализовать расхождения между моделью и ожидаемым поведением следа. Поэтому в настоящей работе акцент сделан на анализ промежуточных радиофизических представлений, которые затем могут быть использованы как основа для дальнейшего совершенствования синтеза изображений ионограмм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и проверена методика синтеза ионограмм на основе PINN. Нейросеть использована не как черный ящик для рисования изображения, а как аппроксимация высотного профиля, ограниченного дифференциальным уравнением баланса. В пилотном эксперименте получены физически разумные масштабы максимума электронной концентрации и критической частоты слоя F_2 : $f_oF2 = 9.36$ МГц, $hmF2 = 340.0$ км. В дальнейшем планируется включить наблюдательное слагаемое в функционал PINN и расширить радиофизическую модель до нескольких магнитоионных компонент. Подчеркнем, настоящая постановка задачи синтеза ионограмм с помощью PINN рассмотрена как промежуточный этап между процедурной генерацией изображений и полноценным восстановлением состояния ионосферы по данным наблюдений.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИЗМИРАН (тема № FFUM-2026-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами / Под ред. С.И. Авдюшина. Труды института прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова. М.: ИПГ, 2008.
URL: <http://ipg.geospace.ru/publications/book-2008.pdf>
2. РД 52.26.817–2023. Руководство по ионосферным, магнитным и геофизическим наблюдениям. Часть 1. Ионосферные наблюдения. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2023.
3. Shiriy A.O. HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. Vol. 5. 2002. P. 365–369.
<https://doi.org/10.1109/apede.2002.10449645>
4. Щирый А.О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук [Место защиты: С.-Петерб. гос. ун-т телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича]. СПб., 2007. 19 с. EDN: QMISDO

5. *Щирый А.О.* Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Журнал радиоэлектроники. 2022. № 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>
6. *Щирый А.О.* Две методики измерения помех декаметрового диапазона // Научное приборостроение. 2023. Т. 33, № 4. С. 72–83.
7. Программы расчета траекторных характеристик распространения коротких радиоволн: Сборник / АН СССР, Ин-т земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн; Отв. ред. канд. физ.-мат. наук Е.М. Жулина. Москва: ИЗМИРАН, 1975. 58 с.
8. *Ларюнин О.А.* Численный синтез ионограмм в горизонтально-неоднородной ионосфере на основе модели комбинированного параболического слоя // Солнечно-земная физика. 2016. №. 3. С. 52–58. <https://doi.org/10.12737/18656>
9. *Settimi A., Pezzopane M., Pietrella M., Bianchi C., Scotto C., Zuccheretti E., and Makris J.* Testing the IONORT-ISP system: A comparison between synthesized and measured oblique ionograms // Radio Science, March 2013. Vol. 48, No. 2. P. 167–179. <https://doi.org/10.1002/rds.20018>
10. *Носиков И.А., Падохин А.М., Крашенинников И.В., Клименко М.В., Бессараб П.Ф.* Особенности расчета минимальных частот мод в задаче прогнозирования условий ионосферной радиосвязи // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 8-9. С. 672–685.
11. *Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E.* Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. 2019. Vol. 378. P. 686–707.
12. *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 526 с.

METHODOLOGY AND FIRST RESULTS OF IONOGRAM SYNTHESIS BY PHYSICS-INFORMED NEURAL NETWORKS

A. M. Simakov¹ [0009-0009-7365-720X], A. O. Schiriy² [0000-0001-7312-4424]

¹National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹nickhaos9@gmail.com; ²andreyschiriy@gmail.com

Abstract. The problem of synthesizing ionograms of vertical ionosphere radio-sonde using physics-informed neural networks is solved. In the proposed approach, the neural network is used not for direct image generation, but for approximating the high-altitude profile of the electron concentration. Network training is performed taking into account a stationary one-dimensional balance equation, including an ionization source, recombination losses, and effective transfer of charged particles. The loss function additionally includes boundary conditions, a restriction on the smoothness of the profile, and diagnostic parameters of the F2 layer. The resulting electron concentration profile is transformed into a height distribution of the plasma frequency. Therefore, without taking into account the Earth's magnetic field and collisions of electrons with other particles, the reflection points, the group refractive index and the dependence of the effective height on the sounding frequency are calculated. Based on this dependence, a synthetic image of an ionogram with background noise and vertical interference structures is formed. The results confirm the possibility of constructing a single physically consistent chain from the height profile of the electron concentration to the image of the ionogram. The developed approach can be used to generate controlled synthetic data, study the effect of ionospheric parameters on the shape of ionogram trails, and subsequently develop algorithms for automatic processing of radiosonde results.

Keywords: *ionosphere, ionogram, vertical radio sounding, electron density, plasma frequency, virtual height, physics-informed neural network, PINN, synthetic data, machine learning, radiophysical model.*

REFERENCES

1. Satellite and Ground-Based Ionospheric Sounding / Ed. by S.I. Avdyushin. Proceedings of the Academician E.K. Fedorov Institute of Applied Geophysics. Moscow: IPG, 2008. URL: <http://ipg.geospace.ru/publications/book-2008.pdf>
2. RD 52.26.817–2023. Guidelines for ionospheric, magnetic and heliogeophysical observations. Part 1: Ionospheric observations // VNIIGMI-MCD. Obninsk, 2023.
3. *Shiriy A.O.* HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. Vol. 5. 2002. P. 365–369. <https://doi.org/10.1109/apede.2002.10449645>
4. *Schiriy A.O.* Development and Modeling of Algorithms for Automatic Measurement of Characteristics of Ionospheric HF Radio Links: Extended Abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation. Saint Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич. St. Petersburg, 2007. 19 p.
5. *Schiriy A.O.* Algorithms and Software for Automation of Measurement and Data Processing in Operational Diagnostics of the Ionosphere and Ionospheric Radio Links // Journal of Radio Electronics. 2022. No. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>
6. *Schiriy A.O.* Two methods for measuring decameter-band interference // Nauchnoe Priborostroenie [Scientific Instrumentation]. 2023. Vol. 33, No. 4. P. 72–83.
7. Programs for Calculating Trajectory Characteristics of Shortwave Radio Propagation: Collection / USSR Academy of Sciences, Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation; Ed. by E.M. Zhulina. Moscow: IZMIRAN, 1975. 58 p.
8. *Laryunin O.A.* Numerical Synthesis of Ionograms in a Horizontally Inhomogeneous Ionosphere Based on the Combined Quasi-Parabolic Layer Model // Solar-Terrestrial Physics. 2016. No. 3. P. 52–58. <https://doi.org/10.12737/18656>
9. *Settimi A., Pezzopane M., Pietrella M., Bianchi C., Scotto C., Zuccheretti E., and Makris J.* Testing the IONORT-ISP system: A comparison between synthesized and measured oblique ionograms // Radio Science, March 2013. Vol. 48, No. 2. P. 167–179. <https://doi.org/10.1002/rds.20018>

10. *Nosikov I.A., Padokhin A.M., Krashennnikov I.V., Klimenko M.V., Bes-sarab P.F.* Features of Calculating Minimum Mode Frequencies in the Problem of Forecasting Ionospheric Radio Communication Conditions // Radiophysics and Quantum Electronics. 2021. Vol. 64, No. 8–9. P. 672–685.

11. *Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E.* Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving non-linear partial differential equations // Journal of Computational Physics. 2019. Vol. 378. P. 686–707.

12. *Brunelli B.E., Namgaladze A.A.* Fizika ionosfery. Moscow: Nauka, 1988. 526 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



СИМАКОВ Александр Максимович – магистрант Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Россия.

Alexander Maximovich SIMAKOV – master's student at the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia.
email: nickhaos9@gmail.com
ORCID: 0009-0009-7365-720X



ЩИРЫЙ Андрей Олегович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В.Пушкова (ИЗМИРАН), Москва.

Andrey Olegovich SCHIRIY – PhD (Candidate of Technical Sciences), senior researcher at the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow.
email: andreyschiriy@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7312-4424

Материал поступил в редакцию 16 июня 2026 года