

Том II, с. 47–51

УДК: 537.87:523

## СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ВОЗМУЩЕННОЙ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА ПЯТЕН ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ И ДВУМЕРНЫХ КАРТ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

Д. А. Когогин<sup>1</sup>, И. А. Насыров<sup>1</sup>, А. В. Шиндин<sup>2</sup>, Д. С. Максимов<sup>1</sup>, С. М. Грач<sup>2</sup>,  
В. О. Дементьев<sup>1</sup>, Р. В. Загретдинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18

E-mail: [dkogogin@kpfu.ru](mailto:dkogogin@kpfu.ru)

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,

630950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

E-mail: [shindin@rf.unn.ru](mailto:shindin@rf.unn.ru)

**Аннотация.** В работе выполнена предварительная обработка экспериментальных данных за 29 августа 2016 года, полученных в ходе проведения совместных измерений искусственных вариаций полного электронного содержания ионосферы на сети из 20-ти ГНСС-станций, расположенных в радиусе 400 км от стенда «Сура» в основном в восточном и юго-восточном направлениях и оптического свечения в красной линии атомарного кислорода ( $\lambda=630$  нм), стимулированных мощным радиоизлучением стенда «Сура». Проведено прямое сопоставление между изображениями искусственного оптического свечения и картами ПЭС, получена динамическая пространственно-временная картина изменения ПЭС в той области ионосферы, где происходит генерация плазменных волн, способных ускорить электроны до потенциала возбуждения оптических уровней.

**Ключевые слова:** ионосфера; ГНСС; ПЭС; карты ПЭС; искусственные ионосферные неоднородности; мощное коротковолновое радиоизлучение; стенд «Сура»; возмущенная область ионосферы; искусственное оптическое свечение

## THE STRUCTURE AND DYNAMICS OF THE HF-PUMPED IONOSPHERE BASED ON A JOINT ANALYSIS OF THE ARTIFICIAL AIRGLOW SPOTS AND TWO-DIMENSIONAL MAPS OF THE TOTAL ELECTRON CONTENT

D. A. Kogogin, I. A. Nasyrov, A. V. Shindin, D. S. Maksimov, S. M. Grach, V. O. Dementiev,  
R. V. Zagretdinov

**Abstract.** The paper carried out preliminary processing of experimental data for August 29, 2016, obtained during joint measurements of artificial variations in the total electron content of the ionosphere on a network of 20 GNSS stations located within a radius of 400 km from the «Sura» facility, mainly in eastern and southeastern directions and artificial airglow in the red line of atomic oxygen ( $\lambda=630$  nm), stimulated by powerful radio emission from the «Sura» facility. A direct comparison between the images of artificial airglow spots and TEC maps has been made. Dynamic spatial-temporal picture of the TEC variations in the heating region where plasma waves are generated, capable of accelerating electrons to the excitation potential of optical levels, has been obtained.

**Keywords:** ionosphere; GNSS; TEC; TEC maps; artificial ionospheric irregularities; powerful radio waves; Sura facility; HF-pumped ionosphere; artificial emission; artificial airglow patches

### Введение

При воздействии на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением в области отражения образуются неоднородности электронной концентрации с размерами от десятков сантиметров до десятков километров [1]. Диагностика крупномасштабной (с размерами поперёк геомагнитного поля  $l_{\perp} \gtrsim 0,5$  км) структуры возмущённой мощной радиоволной области ионосферы

осуществляется с помощью просвечивания ионосферы декаметровым радиоизлучением космических радиостанций, просвечивания возмущённой области УКВ сигналами низкоорбитальных и геостационарных спутников, а так же навигационных спутников [2–4], с помощью спутниковой радиотомографии [5, 6], измерений электронной плотности *in situ* при пролёте космических аппаратов и геофизических ракет через возмущённую область и над ней (см. [1] и цитированную там литературу), измерений искусственного оптического свечения ионосферы [7–10].

С момента развёртывания в 80-х годах прошлого столетия навигационных систем второго поколения (GPS и ГЛОНАСС), обеспечивающих глобальный охват, все большее развитие, особенно в геофизических исследованиях околоземного космического пространства в естественных условиях, приобретает метод двухчастотного радиопросвечивания исследуемой области сигналами таких систем. При распространении через ионосферу у таких сигналов появляется дополнительный набег фазы, обусловленный дисперсией радиоволн в ионосферной плазме и линейно связанный с полным электронным содержанием (ПЭС) на траектории распространения. С 2007 года началось активное использование спутников системы GPS для определения полного электронного содержания в ионосфере во время экспериментов по воздействию на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением. Такие исследования проводились на стендах HAARP и «Сура» [4, 11–13]. В этом случае навигационные спутники пересекают диаграмму направленности антенных систем (ДН) нагревных стендов, тем самым осуществляют радиосканирование искусственных ионосферных неоднородностей, стимулированных воздействием волны накачки. Время сканирования возмущённой области ионосферы определяется скоростью перемещения точки пересечения радиотрассы спутник – наземный приёмный пункт с модифицированной областью ионосферы (т. н. подионосферной точки), и, в зависимости от ширины главного лепестка ДН нагревного стенда, для среднеорбитальных спутниковых навигационных систем составляет ~ 25–50 мин.

В настоящий момент данные приема ГНСС-сигналов так же используются для построения региональных и глобальных карт ПЭС [6, 14]. Однако, подавляющая часть данных, полученных как нашими соотечественниками, так и зарубежными учеными, в которых для анализа результатов были использованы двумерные карты вариаций ПЭС, были зарегистрированы для таких регионов, как Япония, США, Западная Европа, обладающих плотной сетью ГНСС станций [14, 15]. Источниками возмущения ионосферной плазмы в этих экспериментах выступали как естественные процессы (движение СТ, геомагнитные бури и литосферные процессы) [14–16], так и антропогенные (ракетные запуски) [17]. Однако детализированные карты ПЭС с хорошим пространственно-временным разрешением, показывающие распределение электронной концентрации в области ионосферы, облучаемой пучками мощных радиоволн, до сих пор не получены. В первую очередь это связано с техническими сложностями в постановке таких экспериментов. Стенды HAARP, EISCAT расположены в приполярных областях, где пролёты навигационных спутников редки и нет плотной сети ГНСС станций. Стенд Аресибо запущен после реконструкции только в 2016 г. и расположен в регионе, где также отсутствует густая сеть ГНСС станций. В экспериментах на стенде «Сура» до недавнего времени такой эксперимент нельзя было провести, также и в силу малого количества ГНСС станций. Однако учитывая существенное увеличение количества ГНСС-станций в последние годы на территории РФ и расположение стенда «Сура» в средних широтах, решение этой задачи становится возможным. Описанию предварительных результатов такого анализа, а также сопоставлению, полученных карт ПЭС с изображениями пятен искусственного свечения, и посвящена данная работа.

### Описание эксперимента и полученные результаты

Эксперимент проведён на стенде «Сура» (р/п Васильсурск, Нижегородская область, географические координаты: 56.15° с.ш., 46.10° в.д., магнитное склонение ~ 71.5°) 29 августа 2016 г. В интервале 18:52:00 – 19:46:00 UTC воздействие на ионосферу осуществлялось в импульсном режиме с периодом 6 мин и длительностью импульса 3 мин. ДН стенда была ориентирована в Зенит. Частота воздействия 4.35 МГц. Эффективная излучаемая мощность  $P_{eff} \approx 65$  МВт. В течение данного интервала регистрировалось искусственное оптическое свечение в двух пунк-



шагом в анализе данных было сопоставление двумерных карт вариаций ПЭС с изображениями ночного неба, полученными с помощью ПЭС камеры SBIG в этот же временной интервал. Каждой ПЭС карте в соответствие ставилось изображение ночного неба с выделенной областью искусственного свечения. Данные изображения выбирались в конце каждых 3 мин работы стенда «Сура» в импульсном режиме, когда интенсивность искусственного свечения достигала своего максимума (рис. 2 правые панели a2)–i2)). Проведённые измерения дали возможность провести прямое пространственно-временное сопоставление между вариациями искусственного оптического свечения и полного электронного содержания, стимулированными мощным радиоизлучением стенда «Сура» и получить пространственную картину изменения электронной плотности ( $\Delta N_e$ ) в той области ионосферы, где происходит генерация плазменных волн, способных ускорить электроны до потенциала возбуждения оптических уровней. Полученные результаты представлены на рис. 2. Левые панели – карты ПЭС за след. временные интервалы a1) 18:52–18:58 UTC; b1) 18:58–19:04 UTC; c1) 19:04–19:10 UTC; d1) 19:10–19:16 UTC; e1) 19:16–19:22 UTC; f1) 19:22–19:28 UTC; g1) 19:28–19:34 UTC; h1) 19:34–19:40 UTC; i1) 19:40–19:46 UTC. Правые панели – проекция портретов ночного неба с выделенной областью искусственного свечения в линии 630 нм; время регистрации a2) 18:58 UTC; b2) 19:04 UTC; c2) 19:09:30 UTC; d2) 19:16 UTC; e2) 19:22 UTC; f2) 19:28 UTC; g2) 19:34 UTC; h2) 19:40 UTC; i2) 19:45:30 UTC. Красным овалом показана проекция главного лепестка ДН стенда «Сура» на уровне половинной мощности на высоте 250 км без учёта рефракции. Штриховыми линиями показаны геомагнитная широта и долгота стенда «Сура». Пространственный охват, представленных ПЭС карт и изображений ночного неба: по широте (ось ординат)  $55.81^\circ$  с. ш.  $\div$   $56.51^\circ$  с. ш.; по долготе (ось абсцисс)  $45.36^\circ$  в. д.  $\div$   $46.86^\circ$  в. д. Интенсивность вариаций ПЭС на картах варьируется от -0.07 до 0.06 TECU (TECU – общепринятая единица измерения ПЭС;  $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$ ), яркость свечения на изображениях ночного неба от 0 до 6 Рл.

### Заключение

В рамках данного исследования проведено прямое сопоставление между изображениями искусственного оптического свечения и картами ПЭС, получена динамическая пространственно-временная картина изменения ПЭС в той области ионосферы, где происходит генерация плазменных волн, способных ускорить электроны до потенциала возбуждения оптических уровней. Это исследование дополняет, ранее выполненные [10, 19] на стенде «Сура» одновременные измерения наклонного ПЭС и интенсивности искусственного свечения в линии 630 нм на луче зрения «навигационный спутник – GPS приёмник», пересекающего поле зрения ПЭС камеры, в момент работы мощных передатчиков стенда, в которых было установлено, что свечение генерируется в области пониженной электронной концентрации, и именно в этой области популяция энергичных электронов, ускоренных плазменными волнами до потенциала возбуждения оптических уровней, оказывается более интенсивной.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (обработка ГНСС данных и визуализация результатов – проект № 19–72–00072, предварительный анализ, проведение экспериментов и обработка изображений ночного неба – проект № 14–12–00706). Совместный анализ пятен искусственного оптического свечения и двумерных карт полного электронного содержания выполнен при финансовой поддержке Казанского (Приволжского) федерального университета.

### Список литературы

1. Gurevich A. V. Nonlinear effects in the ionosphere // *Phys. Usp.* – 2007. – Vol. 50, no. 11. – P. 1091–1121.
2. Observations of the magnetic-zenith effect using GPS/GLONASS satellite signals / E. D. Tereshchenko, A. N. Milichenko, V. L. Frolov, R. Yu. Yurik // *Radiophysics and Quantum Electronics.* – 2008. – Vol. 51, no. 11. – P. 842.



3. Perturbations of GPS signals by the ionospheric irregularities generated due to HF-heating at triple of electron gyrofrequency / G. Milikh, A. Gurevich, K. Zybin, J. Secan // [Geophys. Res. Lett.](#) — 2008. — Nov. — Vol. 35, no. 22.
4. Study of GNSS-measured ionospheric total electron content variations generated by powerful HF-heating / V. E. Kunitsyn, A. M. Padokhin, A. E. Vasiliev et al. // [Advances in Space Research.](#) — 2011. — Vol. 47, no. 10. — P. 1743–1749.
5. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. — Москва : Физматлит, 2007. — С. 336.
6. Bust G. S., Mitchell C. N. History, current state, and future directions of ionospheric imaging // [Rev. Geophys.](#) — 2008. — March. — Vol. 46, no. 1. — P. RG1003.
7. Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence / M. T. Rietveld, M. J. Kosch, N. F. Blagoveshchenskaya et al. // [Journal of Geophysical Research: Space Physics.](#) — 2003. — Vol. 108, no. A4.
8. Temporal evolution of pump beam selffocusing at the high-frequency active auroral research program / M. J. Kosch, T. R. Pedersen, E. V. Mishin et al. // [Journal of Geophysical Research: Space Physics.](#) — 2007. — Vol. 112, no. 8. — P. A08304.
9. Airglow during ionospheric modifications by the Sura facility radiation. Experimental results obtained in 2010 / S. M. Grach, V. V. Klimenko, A. V. Shindin et al. // [Radiophysics and Quantum Electronics.](#) — 2012. — Vol. 54, no. 1–2. — P. 33–50.
10. Mutual allocation of the artificial airglow patches and large-scale irregularities in the HF-pumped ionosphere / S. M. Grach, I. A. Nasyrov, D. A. Kogogin et al. // [Geophysical Research Letters.](#) — 2018. — Vol. 45, no. 12. — P. 12,749–12,756.
11. Sounding of the ionosphere disturbed by the Sura heating facility radiation using signals of the GPS satellites / V. L. Frolov, G. P. Komrakov, V. E. Kunitsyn et al. // [Radiophysics and Quantum Electronics.](#) — 2010. — Vol. 53, no. 7. — P. 379–400.
12. Studying characteristics of the large-scale ionospheric irregularities induced by high-power HF radio emission with GPS diagnosis / A. V. Ryabov, S. M. Grach, A. V. Shindin, D. S. Kotik // [Radiophysics and Quantum Electronics.](#) — 2011. — Vol. 54, no. 7. — P. 441–451.
13. Generation and detection of super small striations by F region HF heating / A. Najmi, G. Milikh, J. Secan et al. // [Journal of Geophysical Research A: Space Physics.](#) — 2014. — July. — Vol. 119, no. 7. — P. 6000–6010.
14. The first GPS-TEC imaging of the space structure of MS wave packets excited by the solar terminator / E. L. Afraimovich, I. K. Edemskiy, S. V. Voeykov et al. // [Ann. Geophys.](#) — 2009. — Vol. 27. — P. 1521–1525.
15. Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America / Tsugawa T., Otsuka Y., Coster A. J., Saito A. // [Geophysical Research Letters.](#) — 2007. — Vol. 34. — P. L22101.
16. Sherstyukov R. O., Akchurin A. D., Sherstyukov O. N. Collocated ionosonde and dense GPS/GLONASS network measurements of midlatitude MSTIDs // [Advances in Space Research.](#) — 2018. — Vol. 61. — P. 1717–1725.
17. Gigantic Circular Shock Acoustic Waves in the Ionosphere Triggered by the Launch of FORMOSAT-5 Satellite / Min-Yang Chou, Ming-Hsueh Shen, Charles C. H. Lin et al. // [Space Weather.](#) — 2018. — Vol. 16, no. 2. — P. 172–184.
18. Spatial characteristics of the 630-nm artificial ionospheric airglow generation region during the Sura facility pumping / A. V. Shindin, V. V. Klimenko, D. A. Kogogin et al. // [Radiophysics and Quantum Electronics.](#) — 2018. — Vol. 60, no. 11. — P. 849–865.
19. On the connection between the spatial behavior of the total electron content of the ionosphere on the GPS signal path and the ionospheric artificial airglow in the 630 nm line / S. M. Grach, I. A. Nasyrov, D. A. Kogogin et al. // [Radiophysics and Quantum Electronics.](#) — 2018. — Vol. 61, no. 3. — P. 161–175.