

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕННОЙ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ ИСКУССТВЕННОГО СВЕЧЕНИЯ В ЛИНИИ 630 нм И ДВУМЕРНЫХ КАРТ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

<sup>1</sup>Д.А. Когогин, <sup>1</sup>И.А. Насыров, <sup>1</sup>Д.С. Максимов, <sup>2</sup>А.В. Шиндин, <sup>2</sup>С.М. Грач,  
<sup>2</sup>Е.Н. Сергеев, <sup>1</sup>Р.В. Загреддинов

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия  
denis.kogogin@gmail.com

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия  
shindin@rf.unn.ru

## SPATIAL STRUCTURE OF THE HF-PUMPED IONOSPHERE, BASED ON ANALYSIS OF DATA ON 630-nm ARTIFICIAL IONOSPHERIC AIRGLOW AND 2D MAPS OF TOTAL ELECTRON CONTENT

<sup>1</sup>D.A. Kogogin, <sup>1</sup>I.A. Nasyrov, <sup>1</sup>D.S. Maksimov, <sup>2</sup>A.V. Shindin, <sup>2</sup>S.M. Grach, <sup>2</sup>E.N. Sergeev, <sup>1</sup>R.V. Zagretidinov

<sup>1</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia  
denis.kogogin@gmail.com

<sup>2</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia  
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), стимулированного 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, глобальные навигационные спутниковые системы, ГНСС, полное электронное содержание, ПЭС, карты ПЭС, искусственные ионосферные неоднородности, мощное коротковолновое радиоизлучение, стенд «Сура», возмущенная область ионосферы, искусственное оптическое свечение.

**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, global navigation satellite systems, GNSS, total electron content, TEC; TEC maps, artificial ionospheric irregularities, powerful radio waves, Sura facility, HF-pumped ionosphere, artificial emission, artificial airglow patches.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент данные приема ГНСС-сигналов используются для построения региональных и глобальных карт ПЭС [Bust, Mitchell, 2008; Aframovich et al., 2009]. Однако, подавляющая часть данных, полученных как нашими соотечественниками, так и зарубежными учеными, в которых для анализа результатов были использованы двумерные карты ПЭС, были зарегистрированы для таких регионов, как Япония, США, Западная Европа, обладающих плотной сетью ГНСС станций [Tsugawa et al., 2007; Aframovich et al., 2009; Tsugawa et al., 2018]. Источниками возмущения ионосферной плазмы в этих экспериментах выступали как естественные процессы (движение СТ, геомагнитные бури и др.) [Tsugawa et al., 2007; Aframovich et al., 2009; Tsugawa et al., 2018, Sherstyukov et al., 2018], так и антропогенные (ракетные запуски) [Chou et al., 2018]. Однако детализированные карты ПЭС с хорошим пространственно-временным разрешением, показыва-

ющие 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 пролеты навигационных спутников редки и нет плотной сети ГНСС станций. Стенд Аресибо также 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 постановки такого эксперимента, а также сопоставлению, полученных карт ПЭС с изображениями пятен искусственного свечения, и посвящена данная работа.

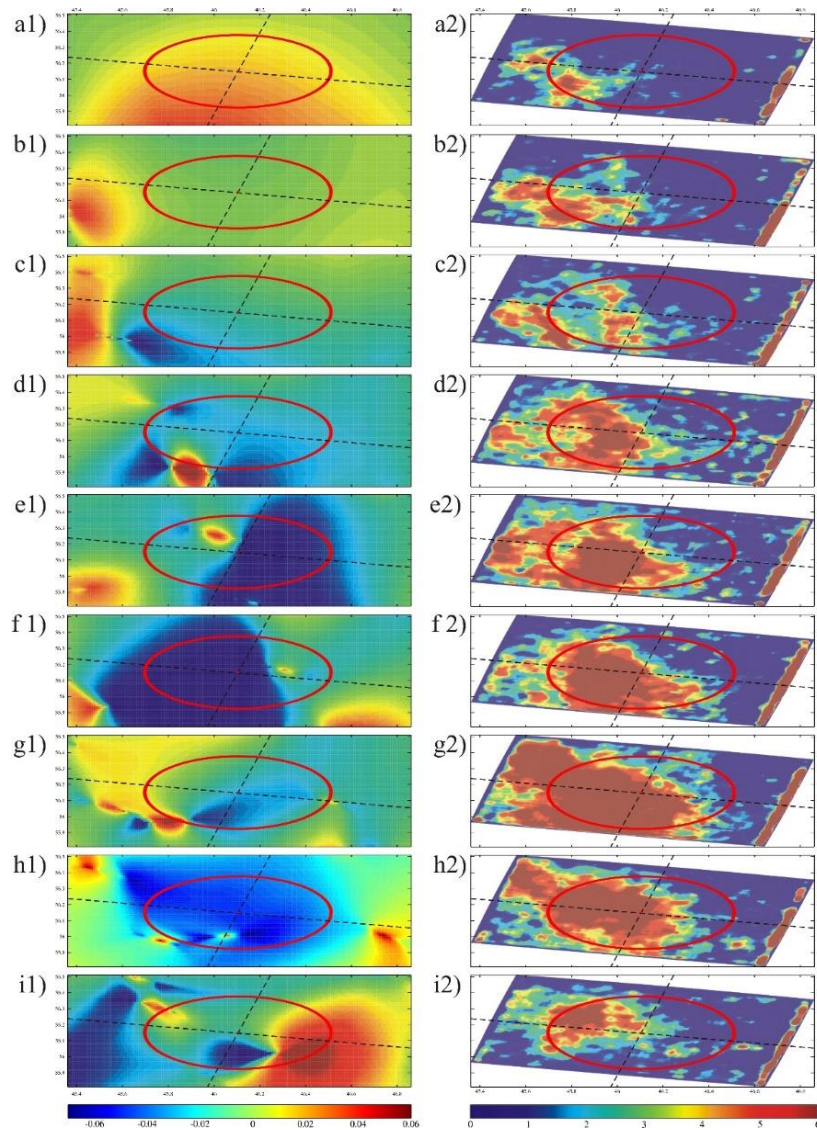


Рис. 1. Левые панели — карты ПЭС за следующие временные интервалы a1) 18:52–18:58 UTC; b1) 18:58–19:04 UTC; c1) 19:04–19:10 UTC; d1) 19:10–19:16 UTC; e1) 19:16–19:22 UTC; f1) 19:22–19:28 UTC; g1) 19:28–19:34 UTC; h1) 19:34–19:40 UTC; i1) 19:40–19:46 UTC. Правые панели — проекция портретов ночного неба 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

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент проведен на стенде «Сура» (р/п Васильсурск, Нижегородская область, географические координаты: 56.15° N, 46.10° E, магнитное наклонение 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 65 МВт. В течение данного интервала регистрировалось искусственное оптическое свечение в двух пунктах. Подробный анализ данного экспериментального дня с точки зрения оптических измерений представлен в работе [Shindin et al., 2018].

Экспериментальные данные двухчастотного радиозондирования ионосферы сигналами навигационных спутников были получены на сети из 20-ти

ГНСС-станций, расположенных в радиусе 400 км от стенда «Сура» в основном в восточном и юго-восточном направлениях.

29 августа 2016 г. диаграмму направленности антенной системы (ДН) стенда «Сура» пересекало практически одновременно, сразу два спутника: GPS G23 (интервал времени пролета 19:58–20:21 UTC); ГЛОНАСС R08 (интервал времени пролета 19:49–20:12 UTC). Для увеличения количества лучей спутник-приемник и соответственно точек на ПЭС картах, были взяты еще 3 спутника (GPS G03; GPS G09; GPS G22) подионосферные точки которых проходили через рассматриваемую область в интересующий нас интервал времени и углы, места которых имели приемлемые значения. Это позволило увеличить пространственный охват ПЭС карт и повысить их пространственное разрешение.

Далее было рассчитано наклонное ПЭС для всех станций, после чего по формуле из работы [Aframovich et al., 2009] оно было приведено в верти-

кальное ПЭС для устранения ракурсного эффекта и нормализации амплитуды вариаций ПЭС. С помощью фильтра скользящего среднего (с окном равным 6.5 мин) из вертикального ПЭС удален тренд и выделены вариации ПЭС, стимулированные работой стенда «Сура». Далее было получено двумерное распределение ПЭС на неравномерной сетке. Для проведения многомерной интерполяции экспериментальных данных был использован многочлен Лагранжа для двух переменных. Для оценки динамики возмущенной области ионосферы и увеличения точек на ПЭС картах, на нее наносились все подионосферные точки и значения вариаций ПЭС за 6-й интервал времени, который состоял из первых 3 мин паузы и следующих 3 мин работы стенда «Сура» в импульсном режиме. Таким образом были сформированы 9 интервалов: 18:52–18:58 UTC; 18:58–19:04 UTC; 19:04–19:10 UTC; 19:10–19:16 UTC; 19:16–19:22 UTC; 19:22–19:28 UTC; 19:28–19:34 UTC; 19:34–19:40 UTC; 19:40–19:46 UTC и построены 9 ПЭС карт (рис. 1 левые панели a1) – i1)). Следующим шагом в анализе данных было сопоставление двумерных карт вариаций ПЭС с изображениями ночного неба, полученными с помощью ПЗС камеры SBIG в этот же временной интервал. Каждой ПЭС карте в соответствие ставилось изображение ночного неба с выделенной областью искусственного свечения. Изображения выбирались в конце первых 3 мин работы стенда «Сура» в импульсном режиме, когда интенсивность искусственного свечения достигала своего максимума (рисунок, правые панели a2) – i2)).

Проекция портретов ночного неба представлены в той же системе координат (географические координаты), что и полученные карты ПЭС из расчета высоты максимума для F2-слоя взятого равным  $h_{\max}=250$  км (для этой же высоты рассчитаны координаты подионосферных точек). Проведенные 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 рисунке, где красным кругом показана проекция главного лепестка ДН стенда «Сура» на уровне половинной мощности на высоте 250 км. Штриховыми линиями показаны геомагнитная широта и долгота стенда «Сура». Интенсивность вариаций ПЭС на картах варьируется от  $-0.07$  до  $0.06$  TECU, 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.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-00072). Совместный анализ пятен искусственного оптического свечения и двумерных карт полного электронного содержания выполнен при финансовой поддержке Казанского (Приволжского) федерального университета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Afraimovich E.L., et al. The first GPS-TEC imaging of the space structure of MS wave packets excited by the solar terminator // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 1521–1525.
- Bust G.S., Mitchell C.N. History, current state, and future directions of ionospheric imaging // *Rev. Geophys.* 2008. V. 46, N 1. P. RG1003.
- Chou M.Y., et al. Gigantic Circular Shock Acoustic Waves in the Ionosphere Triggered by the Launch of FORMOSAT-5 Satellite // *Space Weather.* 2018. V. 16, N 2. P. 172–184.
- Sherstyukov R.O., Akchurin A.D., Sherstyukov O.N. Collocated ionosonde and dense GPS/GLONASS network measurements of midlatitude MSTIDs // *Adv. Space Res.* 2018. V. 61. P. 1717–1725.
- Shindin A.V., et al. Spatial characteristics of the 630-nm artificial ionospheric airglow generation region during the Sura facility pumping // *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2018. V. 60, N. 11. P. 849–865.
- Tsugawa T., Otsuka Y., Coster A.J., Saito A. Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. P. L22101.
- Tsugawa T., Nishioka M., Ishii M., et al. Total Electron Content Observations by Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS // *J. Disaster Res.* 2018. V. 13, N 3. P. 535–545.