

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 537.87:523

doi: 10.26907/2541-7746.2021.1.59-76

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КАРТИНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ОБЛАСТИ СТИМУЛИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ

*И.А. Насыров^{1,2}, Д.А. Когогин¹, А.В. Шиндин², С.М. Грач²,
Р.В. Загреддинов¹, А.Б. Белецкий³, В.В. Емельянов¹*

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, 603950, Россия

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, 664033, Россия

Аннотация

Разработан метод построения пространственной картины распределения полного электронного содержания (ПЭС) в области стимулированного свечения ионосферы в красной линии оптического спектра ($\lambda = 630$ нм) в экспериментах по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением стенда СУРА. Для отработки метода был выбран сеанс измерений 29 августа 2016 г., в течение полутора часов которого (18:40–20:10 UTC) ионосферные и погодные условия варьировались незначительно и позволили провести синхронные оптические измерения стимулированного свечения ионосферы из двух пространственно разнесённых пунктов (п. Васильсурск и п. Магнитка, расположенный в ~ 170 км к востоку от стенда СУРА). Проведённые оптические измерения позволили построить область искусственного свечения в трёхмерной проекции и определить пространственное положение возмущённой области ионосферы (ВО), стимулированной мощным радиоизлучением стенда СУРА. Метод построения пространственной картины распределения электронной плотности в ВО основан на проведении совместного анализа вариаций ПЭС на радиотрассах «навигационный спутник – наземный пункт» для ряда приёмных станций глобальных навигационных спутниковых систем, расположенных в радиусе ~ 160 км от стенда СУРА. Применение метода позволяет получить значения вариаций электронной плотности для различных пространственных сечений ВО ионосферы. Анализ экспериментальных данных, проведённый при помощи разработанного метода, показал, что в поле мощной радиоволны возникает вытянутая вдоль силовых линий геомагнитного поля возмущённая область, которая имеет достаточно сложную структуру. На границах области с пониженной электронной концентрацией возникают плазменные неоднородности с повышенной электронной плотностью. Перепад $\Delta N_e/N_e$ на границах ВО может достигать $\sim 10\%$. Масштабы ВО составляют $l_{\perp} \approx 45 \div 60$ км поперёк и $l_{\parallel} \gtrsim 70$ км вдоль силовых линий магнитного поля Земли.

Ключевые слова: ионосфера, ГНСС, полное электронное содержание, искусственные ионосферные неоднородности, мощное коротковолновое радиоизлучение, стенд СУРА, стимулированное свечение ионосферы

Введение

С 2010 г. на стенде СУРА (радиополигон Васильсурск, Нижегородская обл., географические координаты: 56.15° с.ш., 46.10° в.д., магнитное наклонение $\sim 71.5^{\circ}$)

начали проводиться регулярные синхронные измерения интенсивности стимулированного оптического свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода ($\lambda = 630$ нм) и вариаций полного электронного содержания (ПЭС) вдоль радиотрасс «навигационный спутник – наземный пункт» (луч НС–НП) при пролёте навигационного спутника (НС) над возмущённой областью ионосферы (ВО) в поле зрения ПЗС-камеры, направленной на ВО [1–4]. В экспериментах 2010–2014 гг. данные измерения проводились на одиночном луче «НС–п. Васильсурск». Приёмник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, BEIDOU) Prego-T, используемый в этих экспериментах для записи параметров зондирующих радиосигналов, был расположен в непосредственной близости от антенной системы стенда СУРА. Полученные результаты, методика обработки данных и сложности, возникающие при проведении подобных измерений, подробно изложены в работе [3]. В экспериментах было установлено, что положение пятна искусственного свечения в максимуме яркости при прохождении траектории луча «НС–п. Васильсурск» через его центр соответствовало минимальным значениям ПЭС. Здесь необходимо заметить, что в период с 2010 по 2014 г. было проведено более ста сеансов измерений и только в пяти из них были выполнены все необходимые и достаточные условия для проведения совместного анализа вариаций ПЭС и стимулированного свечения в возмущённой области ионосферы. Более того, луч «НС–п. Васильсурск» пересёк центр пятна стимулированного свечения ионосферы лишь в одном из этих сеансов (17 марта 2010 г.) [3, 4]. Кроме того, все выводы, приведённые в работах [3, 4], были сделаны на основании предположения, что неоднородности электронной концентрации, стимулированные волной накачки и проявляющиеся в вариациях ПЭС, «вморожены» в плазму, то есть являются статическими плазменными образованиями.

Очевидно, что подобное положение дел не могло удовлетворить нас. С другой стороны, за последние пять-шесть лет произошло бурное развитие сети ГНСС-станций в Европейской части Российской Федерации, что позволило привлечь для совместного анализа данные не только со станции, расположенной на п. Васильсурск, но и с других ГНСС-приёмников, расположенных в окрестностях стенда СУРА. Таким образом, появилась возможность разработки новых методов проведения совместного анализа вариаций ПЭС и стимулированного свечения при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением стенда СУРА. Одним из таких методов, разработанных нами, является метод построения синхронной динамической картины поведения стимулированного свечения на линии 630 нм и вариаций ПЭС в возмущённой области ионосферы. Предварительные результаты совместной обработки экспериментальных данных при помощи этого метода докладывались на XXVI Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (Казань, 2019 г.) [5], а сам метод подробно изложен в [6]. В настоящей работе мы представляем новый метод построения пространственной картины распределения ПЭС в области стимулированного свечения ионосферы при воздействии мощным коротковолновым излучением стенда СУРА. Для отработки метода и верификации полученных результатов был выбран тот же экспериментальный сеанс, что и в работе [6], а именно 29 августа 2016 г.

В разд. 1 описаны диагностическая аппаратура и постановка задачи. В разд. 2 дано краткое описание методики обработки экспериментальных данных. В разд. 3 приведено описание экспериментальных результатов. В разд. 4 рассмотрено построение пространственной картины распределения ПЭС в области стимулированного оптического свечения ионосферы. Выводы представлены в разд. «Заключение».

1. Постановка задачи

29 августа 2016 г. в интервале времени 18:40–20:14 UTC воздействие на ионосферу осуществлялось с периодом 6 мин: 3 мин – излучение волны накачки (ВН), 3 мин – пауза. Главный лепесток диаграммы направленности антенной системы стенда СУРА (ДН) был ориентирован в зенит. Частота воздействия волны накачки обыкновенной поляризации $f_0 = 4.35$ МГц. Эффективная излучаемая мощность $P_{\text{эф}} \approx 70$ МВт. Измерения проводились в спокойных геомагнитных и ионосферных условиях.

Регистрация стимулированного оптического свечения осуществлялась из двух пространственно разнесённых пунктов наблюдения: первый – п. Васильсурск (ПЗС-камера располагалась в ~ 850 м от антенной системы стенда СУРА); второй – п. Магнитка, расположенный в ~ 170 км к востоку от стенда СУРА на территории магнитной обсерватории Казанского федерального университета (географические координаты 55.56° с.ш., 48.45° в.д.).

На п. Магнитка была установлена ПЗС-камера КЕО Sentinel, оснащённая объективом с полем зрения 140° (размер кадра 2048×2048 пикселей) и светофильтром на длину волны $\lambda = 630$ нм с полосой пропускания $\Delta\lambda_{0.5} = 2$ нм. Для увеличения соотношения сигнал/шум съёмка производилась с бинированием (объединением пикселей) 4×4 . На п. Васильсурск была установлена ПЗС-камера SBIG-8300M, оснащённая объективом Canon EF 50 mm $f/1.2L$ USM с полем зрения $20^\circ \times 15^\circ$ (размер кадра 3326×2504 , бинирование 9×9 пикселей) и светофильтром на длину волны $\lambda = 630$ нм с полосой пропускания $\Delta\lambda_{0.5} = 10$ нм. Обе камеры были синхронизованы между собой с привязкой к шкале Всемирного координированного времени – UTC. Регистрация портретов ночного неба проводилась с выдержкой 25 с и временем открытия затвора в 0 и 30 с каждой минуты.

Методика выделения пятен стимулированного свечения на зарегистрированных с помощью ПЗС-камер портретах ночного неба и построения пространственной картины области искусственного свечения ионосферы, а также другие технические детали проведения оптических измерений и их обработки в данной постановке эксперимента подробно изложены в работе [7]. На рис. 1 красным полупрозрачным эллипсоидом показана трёхмерная проекция возмущённой области во время регистрации максимума стимулированного свечения ионосферы (19:21:30 UTC).

Отличительной особенностью описываемого эксперимента является то, что при его проведении имелась возможность регистрации данных ГНСС-радиозондирования не только в одном пункте (п. Васильсурск), как в экспериментах 2010–2014 гг., но и дополнительно на широкой сети ГНСС-станций, расположенных в окрестности стенда СУРА. Расположение ГНСС-станций показано на рис. 1. Траектории движения ионосферных точек¹ для лучей НС–НП, проходивших в непосредственной близости от области стимулированного свечения ионосферы в период проведения оптических измерений из двух пространственно разнесённых пунктов (18:58 ÷ 19:51 UTC), показаны на рис. 1 цветными линиями.

Всего в период проведения нагревного эксперимента (18:40–20:14 UTC) возмущённую область ионосферы пересекали восемь лучей НС–НП: G23–VASIL; G23–СНЕВ; R07–52NN; R08–VASIL; R08–BATR; R08–KANA; R08–SHUM; R08–YADR (где R – спутник ГЛОНАСС; G – спутник GPS). Два луча (R08–VASIL и G23–VASIL) проходили в период, когда генерация стимулированного оптического свечения в линии 630 нм прекратилась в силу снижения критической частоты f_oF2

¹ Ионосферная точка – точка пересечения луча «спутник–приёмник» и тонкого сферического слоя на высоте ионосферы. Подыоносферная точка (Ionospheric Penetration Point, IPP) – проекция на поверхность Земли ионосферной точки. Географические координаты ионосферной и подыоносферной точек совпадают.

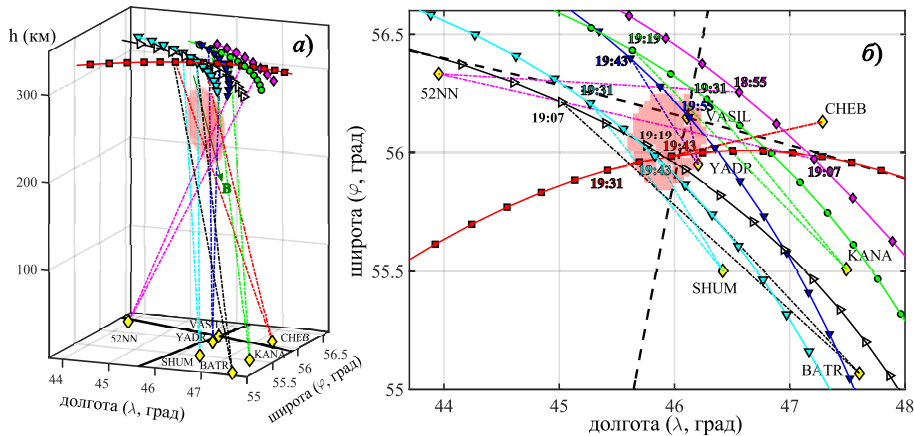


Рис. 1. Схема эксперимента 29.08.2016 г. Панель а): красный полупрозрачный эллипсоид – область стимулированного свечения ионосферы в трёхмерной проекции. Зелёная стрелка показывает направление магнитного поля Земли (\vec{B}). Панель б): вид сверху. Чёрными штриховыми линиями отмечены геомагнитная широта и геомагнитная долгота п. Васильсурск, рассчитанные по модели IGRF-13 [8]. Жёлтыми ромбиками отмечено местоположение ГНСС-станций, задействованных в эксперименте. Цветными кривыми с соответствующими маркерами показаны траектории движения подыоносферных точек, рассчитанных для высоты 315 км, для ряда лучей НС–НП, проходивших через возмущённую область ионосферы во время проведения измерений: R07–52NN (розовая линия); R08–KANA (зелёная линия); R08–YADR (синяя линия); G23–CHEB (красная линия); R08–BATR (чёрная линия); R08–SHUM (голубая линия). Здесь R – навигационный спутник ГЛОНАСС, G – навигационный спутник GPS. Штриховыми линиями соответствующего цвета отмечены временные интервалы сканирования возмущённой области соответствующими лучами НС–НП: R07–52NN – 18:55 ÷ 19:07 UTC; R08–KANA – 19:19 ÷ 19:31 UTC; R08–YADR – 19:43 ÷ 19:55 UTC; G23–CHEB – 19:31 ÷ 19:43 UTC; R08–BATR – 19:07 ÷ 19:19 UTC; R08–SHUM – 19:31 ÷ 19:43 UTC

($\Delta f(19:48 \text{ UT}) = f_oF2 - f_o \leq 0.2 \text{ МГц}$; $\Delta f(19:54 \text{ UT}) = 0.05 \text{ МГц}$; $20:00 \text{ UT } f_oF2 < f_o$), поэтому они были исключены из дальнейшего анализа. Таким образом, для проведения совместного анализа вариаций ПЭС были выбраны шесть лучей: R07–52NN (розовая линия); R08–KANA (зелёная линия); R08–YADR (синяя линия); G23–CHEB (красная линия); R08–BATR (чёрная линия); R08–SHUM (голубая линия), см. рис. 1.

Как видно из рис. 1, лучи НС–НП указанных навигационных спутников сканировали возмущённую область ионосферы в разные интервалы времени и в разных пространственных сечениях: R07–52NN – 18:55 ÷ 19:07 UTC; R08–KANA – 19:19 ÷ 19:31 UTC; R08–YADR – 19:43 ÷ 19:55 UTC; G23–CHEB – 19:31 ÷ 19:43 UTC; R08–BATR – 19:07 ÷ 19:19 UTC; R08–SHUM – 19:31 ÷ 19:43 UTC.

Ранее, в работах [3–6], нами было показано, что положение пятна стимулированного свечения ионосферы соответствует минимальным значениям ПЭС. Исходя из этого был сделан вывод о том, что искусственное оптическое свечение ионосферы генерируется в области пониженной электронной концентрации, и именно в этой области популяция энергичных электронов, ускоренных плазменными волнами до потенциала возбуждений оптических уровней, оказывается наиболее интенсивной. Постановка задачи, рассмотренная в настоящей статье, позволяет выполнить сечения возмущённой области ионосферы в различных пространственных координатах, и, следовательно, построить пространственную картину искусственной ионосферной неоднородности, стимулированной мощным радиоизлучением стенда СУРА.

2. Методика обработки экспериментальных данных

Методика обработки портретов ночного неба, зарегистрированных во время проведения нагревных экспериментов в двух пространственно разнесённых пунктах, подробно изложена в работах [1, 3, 7], она включает в себя несколько основных этапов: *a*) пространственная и временная привязка изображений ночного неба к небесным координатам; *б*) выделение на кадрах пятен стимулированного свечения ионосферы; *в*) переход от системы координат, связанной с изображением пятна свечения (в пикселах), к горизонтальной топоцентрической системе координат AER (A – азимут, E – угол места, R – высота) с последующим переходом от топоцентрических к геодезическим координатам (широта, долгота, высота). В качестве опорного эллипсоида вращения (сфероида) используется эллипсоид Всемирной системы геодезических параметров Земли 1984 г. (WGS-84). Центром горизонтальной топоцентрической системы координат AER в геодезических координатах является место установки ПЭС-камеры.

Таким образом, наличие двух синхронных изображений, являющихся снимками одного и того же пятна свечения с разных углов обзора, позволяет восстановить пространственные размеры области стимулированного свечения ионосферы. Основная идея методики восстановления трёхмерной области стимулированного свечения ионосферы по двумерным изображениям описана в [7] и заключается в следующем. Область свечения моделируется в виде трехмерного распределения Гаусса. Необходимо сказать, что из-за наличия внешнего магнитного поля ионосфера является анизотропной средой. Разность коэффициентов амбиполярной диффузии вдоль и поперёк магнитного поля приводит к тому, что искусственные ионосферные неоднородности, а следовательно, и область стимулированного оптического свечения вытягиваются вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Пространственное положение вектора магнитной индукции (\vec{B}) определяется магнитным склонением (D) и магнитным наклонением (I), которые можно рассчитать при помощи Международной справочной модели магнитного поля Земли – IGRF-13 [8]. Для 29 августа 2016 г. на высоте $h = 240$ км (высоте центра пятна стимулированного свечения, полученной в результате обработки портретов ночного неба) имеем $D = 11.5^\circ$ и $I = 71.95^\circ$. Таким образом, модель области стимулированного свечения ионосферы в виде трёхмерного распределения Гаусса запишется в следующем виде [7]:

$$\begin{aligned}
 F(x, y, z, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) = A_0 \times \\
 \times \exp \left\{ - \left[\frac{((x - x_0) \cos(\varphi) \cos(\theta) + (y - y_0) \sin(\varphi) \cos(\theta) + (z - z_0) \sin(\theta))^2}{2\sigma_x^2} + \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{(-(x - x_0) \sin(\varphi) + (y - y_0) \cos(\varphi))^2}{2\sigma_y^2} + \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{((x - x_0) \cos(\varphi) \sin(\theta) + (y - y_0) \sin(\varphi) \sin(\theta) - (z - z_0) \cos(\theta))^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Здесь A_0 – интенсивность свечения в центре области; x_0, y_0, z_0 – координаты центра пятна свечения в прямоугольной геоцентрической неинерциальной системе координат, жестко связанной с Землёй и имеющей начало в центре её масс (Earth-Centered, Earth-Fixed, $ECEF$); $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – параметры, характеризующие гауссову ширину области свечения вдоль осей x, y, z соответственно; $\varphi = D$ и $\theta = 90^\circ - I$ – параметры, задающие угол наклона вектора магнитной индукции \vec{B} системе координат $ECEF$.

Далее строятся проекции гауссова распределения области свечения, соответствующие реальным изображениям, полученным с ПЗС-камер. На следующем этапе полученные проекции и реальные изображения сравниваются друг с другом с использованием метода наименьших квадратов. Данное сравнение происходит для различных значений параметров распределения, то есть в результате вариации параметров распределения Гаусса находятся такие их значения, при которых реальные изображения и соответствующие им проекции модели максимально совпадают. Таким образом, для момента времени, когда область свечения достигала максимального размера (19:21:30 UTC), были получены горизонтальный (~ 30 км) и вертикальный (~ 90 км) масштабы области стимулированного свечения ионосферы. Следующим шагом осуществляется переход от координат *ECEF* к геодезической системе координат (широта, долгота, высота).

В результате реализации описанной выше методики обработки снимков пятна стимулированного свечения ионосферы мы получаем пространственную привязку области, в которой генерируются искусственные ионосферные неоднородности при воздействии мощного радиоизлучения стенда СУРА.

Для обработки рядов ПЭС (здесь и далее по тексту имеется в виду наклонное ПЭС – *slant TEC* (англ.)) и выделения вариаций был использован стандартный подход, состоящий из поэтапных процедур удаления тренда (связанного с изменением угла места спутника и, следовательно, длины участка траектории сигнала спутника, проходящего через ионосферную плазму), с помощью вычитания из временной зависимости ПЭС аппроксимирующего полинома шестого порядка и последующей цифровой фильтрации полученного ряда скользящим средним (с окном, равным 6 мин). Таким образом, из рядов ГНСС-данных выделяются вариации ПЭС, коррелированные по времени с циклами воздействия мощного радиоизлучения стенда СУРА на ионосферу.

Необходимо сказать, что ПЭС является интегральной величиной вдоль всего луча «спутник – приёмник» и не даёт полного представления о структуре возмущений. Поэтому для пространственной привязки измерений с разных спутников считают, что большинство заряженных частиц, дающих вклад в вариации ПЭС, сосредоточено вблизи некоторой области, находящейся на высотах максимума электронной концентрации в ионосфере (слой *F2*). Вертикальный размер этой области пренебрежимо мал по сравнению с расстоянием от спутника до приёмника. Таким образом, вопрос привязки возмущений ПЭС к конкретным высотам требует дополнительного анализа для каждого экспериментального дня. В настоящей работе для географической привязки возмущений электронной концентрации, стимулированных мощным радиоизлучением стенда СУРА, используются параметры области стимулированного свечения ионосферы, приведённые выше.

3. Экспериментальные результаты

Экспериментально установлено [1–6], что искусственное оптическое свечение возникает в одних и тех же пространственных координатах, и, таким образом, даёт пространственную привязку области ионосферы, где происходит генерация стимулированных неоднородностей электронной концентрации. Однако интенсивность и размер пятен стимулированного свечения в экспериментальный день – 29 августа 2016 г. – изменялись от цикла к циклу воздействия. Во время первых циклов накачки интенсивность свечения была невысока, но со временем постепенно возрастала и достигла максимума в 19:21 UTC. Затем размер пятен стимулированного свечения и их интенсивность снова стали убывать, и после 19:50 UTC стимулированное оптическое свечение ионосферы не регистрировалось [5, 6]. Таким образом, мы можем с уверенностью утверждать, что искусственные плазменные неоднородности,

стимулированные мощным радиоизлучением стенда СУРА, генерируются в одних и тех же пространственных координатах. Следовательно, имея несколько сечений возмущённой области ионосферы, полученных на различных лучах НС–НП в разное время, мы можем восстановить конфигурацию искусственной ионосферной неоднородности.

На рис. 2 представлены результаты измерений вариаций ПЭС в единицах TECU (TECU – общепринятая единица измерения ПЭС; $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$) 29 августа 2016 г. на шести лучах: R07–52NN (а); R08–KANA (б); R08–YADR (в); G23–СНЕВ (г); R08–BATR (д); R08–SHUM (е), пересекающих возмущённую область в разные временные интервалы и в разных пространственных сечениях (см. рис. 1).

Как видно на рис. 1, а, луч R07–52NN (розовая линия) сканирует ВО ионосферы по её нижней кромке. Конфигурация радиотрассы R07–52NN такова, что сканирование ВО осуществляется практически вдоль геомагнитного меридиана стенда СУРА (рис. 1, б). Необходимо отметить, что навигационный спутник R07 проходил через главный лепесток ДН стенда СУРА в тот период, когда генерация стимулированного оптического свечения была ещё достаточно слабой. Однако на рис. 2, а видно (серый вертикальный прямоугольник), что в период времени 18:55–19:07 UTC, когда осуществлялось сканирование непосредственно возмущённой области ионосферы, наблюдается понижение ПЭС до $\sim -0.02 \text{ TECU}$. В то же время на границах области ионосферы с пониженной электронной концентрацией наблюдаются области повышения ПЭС (временные интервалы 18:49 ÷ 18:53 UTC и 19:06 ÷ 19:09 UTC) до $\sim 0.06 \div 0.08 \text{ TECU}$. Исходя из этого можно сделать предположение о том, что под воздействием мощной радиоволны стенда СУРА на высотах $\sim 200 \text{ км}$ (см. рис. 1) в пределах ДН вдоль геомагнитной долготы в ионосфере формируется неоднородность с пониженной электронной концентрацией, на границах которой электронная концентрация становится выше фоновых значений. Таким образом, градиенты электронной концентрации на нижней границе ВО ионосферы достигают $\sim 0.08 \div 0.1 \text{ TECU}$.

Луч R08–KANA сканирует северную часть ВО ионосферы (рис. 1, зелёная линия) в тот период времени (19:19 ÷ 19:31 UTC), когда наблюдается наиболее интенсивное развитие пятен стимулированного свечения. Из рис. 2 видно (серый вертикальный прямоугольник на панели б), что во время включения волны накачки происходит уменьшение ПЭС до величин $\sim -0.07 \text{ TECU}$, а во время пауз, наоборот, регистрируется увеличение ПЭС до значений $\sim 0.05 \text{ TECU}$. Аналогичная картина наблюдается и для радиотрассы R08–YADR (рис. 1, синяя линия). Однако в этом случае сканирование ВО осуществлялось в более поздний период времени с 19:43 до 19:55 UTC (серый вертикальный прямоугольник на рис. 2, в), когда интенсивность стимулированного свечения ионосферы начала снижаться, но в то же время сканирующий луч R08–YADR прошёл близко к центру возмущённой области. Конфигурация обеих радиотрасс такова, что сканирование ВО ионосферы осуществляется поперёк геомагнитного меридиана стенда СУРА (см. рис. 1).

На радиотрассе G23–СНЕВ (красная линия на рис. 1) луч сканирует практически центр ВО в период времени уверенной регистрации стимулированного свечения ионосферы (19:31 ÷ 19:43 UTC). Как видно из рис. 2, г, во время включения волны накачки наблюдается уменьшение ПЭС до $\sim -0.1 \text{ TECU}$, а во время пауз – возрастание до $\sim +0.13 \text{ TECU}$. Таким образом, магнитуда вариаций ПЭС в центре ВО ионосферы достигает значений $\sim 0.2 \div 0.23 \text{ TECU}$.

Подобные и даже более высокие значения вариации ПЭС, магнитуда которых составляет $\sim 0.2 \div 0.3 \text{ TECU}$, наблюдаются и для радиотрассы R08–BATR (серый прямоугольник на рис. 2, д). Это связано с тем, что траектория движения луча R08–BATR (рис. 1, чёрная линия) в период сканирования ВО (19:07 ÷ 19:19 UTC)

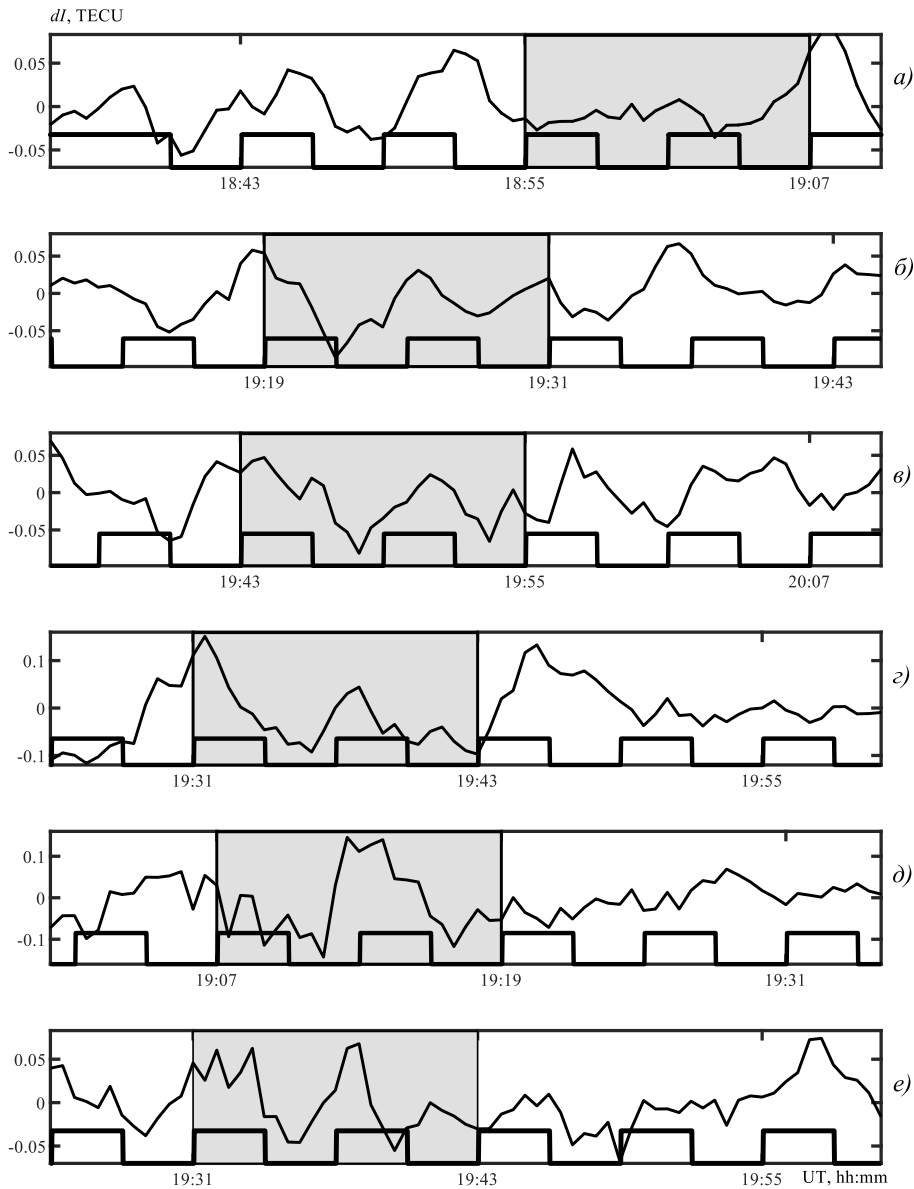


Рис. 2. Ряды вариаций ПЭС (dl), полученные 29 августа 2016 г.: а) радиотрасса R07–52NN; б) радиотрасса R08–KANA; в) радиотрасса G23–YADR; г) радиотрасса R08–СНЕВ; д) радиотрасса R08–ВАТР; е) радиотрасса R08–SHUM. Серыми вертикальными прямоугольниками выделены интервалы, соответствующие временам сканирования ВО лучами НС–НП для каждого спутника (отмечены штриховыми линиями соответствующих цветов на рис. 1). На осях абсцисс жирной сплошной линией показан режим включения волны накачки. Вариации ПЭС представлены в единицах TECU

проходила близко к магнитному зениту и во время регистрации наиболее интенсивного стимулированного свечения ионосферы.

Для радиотрассы R08–SHUM (рис. 1, голубая линия) в период сканирования ВО (19:31 ÷ 19:43 UTC) при включении волны накачки ПЭС достаточно быстро убывает до значений ~ -0.05 TECU, а во время пауз ПЭС возрастает до

~ 0.05 TECU (рис. 2, *e*). Необходимо сказать, что лучи R08–BATR и R08–SHUM сканировали возмущённую область ионосферы по её южной границе практически перпендикулярно магнитному меридиану стенда СУРА (рис. 1, чёрная и голубая линии соответственно).

Таким образом, в результате проведённых измерений было получено шесть сечений возмущённой области ионосферы, стимулированной мощным радиоизлучением: одно сечение вдоль геомагнитного меридиана стенда СУРА (луч R07–52NN); пять сечений поперёк геомагнитного меридиана стенда СУРА (лучи R08–KANA, G23–YADR, G23–CHEB, R08–BATR и R08–SHUM).

4. Построение пространственной картины распределения ПЭС в области стимулированного свечения ионосферы

Для оценки пространственных периодов в рядах вариаций ПЭС (dI) было выполнено непрерывное вейвлет-преобразование по формуле (2) для каждого из шести лучей НС–НП (рис. 2). Обратим внимание, что на выходе непрерывного вейвлет-преобразования мы получаем динамику спектра сигнала во времени, то есть периодограмму – временную эволюцию периодов в исходном сигнале. В данном случае, учитывая движение подыоносферных точек в пространстве, на выходе непрерывного вейвлет-преобразования мы получаем временную эволюцию пространственных масштабов искусственной ионосферной неоднородности, то есть фактически эволюцию во времени пространственного спектра. Поэтому в дальнейшем полученные при помощи вейвлет-преобразования периодограммы будем называть масштабодиаграммами. На основе коэффициентов C_{ab} были рассчитаны масштабодиаграммы, отображающие эволюцию пространственных составляющих исходного сигнала во времени

$$C_{ab} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (2)$$

Здесь a – параметр масштабирования в диапазоне $1 \div 90$ км с учётом средней скорости движения подыоносферной точки ($h_{\text{ГРР}}$) на высоте 280 км^2 для каждого спутника (на рис. 3 соответствует оси ординат и обозначен как l), параметр b – текущий момент времени (ось абсцисс на рис. 3), ψ – вейвлет Морле $\exp(x^2/2) \cos(5x)$, $x(t)$ – вариации ПЭС (dI), представленные на рис. 2. Таким образом, коэффициенты C_{ab} фактически показывают амплитуду колебаний с соответствующим пространственным периодом a в момент времени b . Интегрирование по времени от $-\infty$ до $+\infty$ в данном случае означает интегрирование по всей реализации.

Для оценки величины изменений плотности электронной концентрации $\Delta N_e/N_e$ в области стимулированного свечения, вызванных воздействием на ионосферу мощным радиоизлучением стенда СУРА, воспользуемся следующим эмпирическим соотношением, полученным исходя из простых физических рассуждений:

$$\frac{\Delta N_e}{N_e} = \frac{C_{ab}/\Delta h}{N_e} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где N_e – электронная концентрация в максимуме $F2$ -слоя, C_{ab} – средняя интенсивность вариаций ПЭС в TECU, рассчитанная по формуле (2), Δh – полутолщина $F2$ -слоя ионосферы.

² Обоснование выбора $h_{\text{ГРР}} = 280$ км приведено в работе [6].

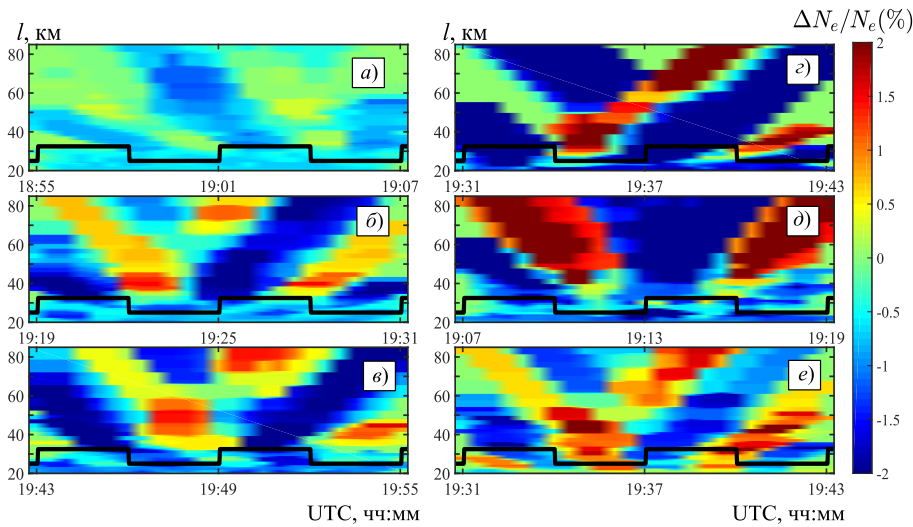


Рис. 3. Масштабограммы для шести лучей «спутник – приёмник»: а) R07 – 52NN, б) R08 – KANA, в) R08 – YADR, г) G23 – CHEB, д) R08 – BATR, е) R08 – SHUM. Цветовой палитрой (в правой части рисунка) показана интенсивность вариаций $\Delta N_e/N_e$

Как следует из наших оценок, выполненных на основе анализа ионограмм SADI, которые получены в период регистрации стимулированного оптического свечения ионосферы 29 августа 2016 г., средняя величина полутолщины $F2$ -слоя составила $\Delta h \approx 50$ км. Средняя высота максимума электронной концентрации – $h_{\max} \approx 315$ км. Оценка среднего значения электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя была выполнена с привлечением Международной справочной модели ионосферы (International Reference Ionosphere, IRI-2012) [10] и составила $N_{e \max} \approx 2.84 \cdot 10^{11}$ эл/м³.

Полученные значения C_{ab} при помощи выражения (3) были пересчитаны в $\Delta N_e/N_e$. Результаты расчёта масштабограмм вариаций плотности электронной концентрации для каждого из лучей, представленных на рис. 2 для периодов времени, выделенных серыми вертикальными прямоугольниками, показаны на рис. 3. Необходимо заметить, что при построении масштабограмм учитывались средние скорости движения подионосферной точки, а именно этот параметр (а в выражении 2) определяет пространственный масштаб неоднородностей, то есть на рис. 3 указан усреднённый масштаб ионосферных неоднородностей.

Масштабограммы, представленные на рис. 3, показывают наличие положительных и отрицательных вариаций плотности электронной концентрации с характерными пространственными периодами, коррелирующими с циклами включения волны накачки, показанными на осях абсцисс рис. 3 жирными линиями. Обращают на себя внимание два момента. Во-первых, для всех сечений ВО (как вдоль, так и поперёк геомагнитного меридиана стенда СУРА), независимо от времени сканирования и этапов развития стимулированного свечения ионосферы, наблюдаются качественно похожие картинка. Во-вторых, вариации электронной концентрации в сечении ВО ионосферы вдоль геомагнитной долготы стенда СУРА (луч R07 – 52NN, рис. 3, а) находятся в противофазе с остальными сечениями, сделанными поперёк силовых линий магнитного поля Земли (рис. 3, панели б–е).

Таким образом, поведение масштабограмм на рис. 3 позволяет сделать обоснованное предположение о том, что для сходных ионосферных условий в каждом цикле воздействия искусственная ионосферная неоднородность генерируется в строго

определённых пространственных координатах. Фактически, это аналогично предположению о «вмороженности» ионосферных неоднородностей, сделанному в работах [3, 4]. Следовательно, полученные пространственно-временные сечения ВО ионосферы позволяют построить пространственную картину распределения электронной плотности в области искусственного оптического свечения ионосферы, стимулированного мощным радиоизлучением стенда СУРА.

Видно, что для луча R07–52NN (рис. 3, *a*), сканирующего ВО ионосферы вдоль геомагнитного меридиана стенда СУРА (розовые линии на рис. 1) наблюдаются слабые вариации $\Delta N_e/N_e$. При включении нагрева на высотах ~ 200 км формируется область с пониженной электронной концентрацией (порядка $-0.5\% \div -1\%$), которая вытягивается вдоль силовых линий магнитного поля Земли на $\gtrsim 70$ км. При выключении волны накачки в ионосфере формируются неоднородности с повышенной электронной концентрацией ($+0.5\% \div +0.7\%$) с масштабами $\sim 10 \div 20$ км, которые в течение ~ 2 мин релаксируют к фоновому уровню. Здесь необходимо заметить, что сканирование возмущённой области ионосферы лучом R07–52NN осуществляется по её нижней кромке (см. рис. 1, *a*), фактически вдоль ложбины между *F*- и *E*-слоями ионосферы.

Для радиотрасс R08–KANA и R08–YADR (рис. 3, *б* и *в* соответственно), проходящих по северной периферии пятна стимулированного свечения (зелёная и синяя линии на рис. 1), во время включения волны накачки наблюдается формирование области с пониженной электронной концентрацией ($\Delta N_e/N_e \approx -1.5\% \div -1.7\%$) с масштабами $\sim 40 \div 60$ км. При выключении накачки (в паузах), наоборот, электронная концентрация возрастает до величин $\sim +1\% \div +1.5\%$, которая через ~ 2 мин возвращается к фоновым значениям. На радиотрассе R08–SHUM, сканирующей южную периферию пятна стимулированного свечения (голубая линия на рис. 1), также наблюдается подобная картина формирования и релаксации стимулированной ионосферной неоднородности (рис. 3, *е*). Масштабы искусственных ионосферных неоднородностей с пониженной (во время нагрева) и повышенной электронной концентрацией (в паузах) для сечения R08–SHUM составляют $\sim 40 \div 45$ км.

Характерно, что для всех трёх радиотрасс, пересекающих ВО как по северной границе R08–KANA (рис. 3, *б*) и R08–YADR (рис. 3, *в*), так и по южной границе пятна стимулированного свечения ионосферы R08–SHUM (рис. 3, *е*), во время включения волны накачки наряду с отрицательными вариациями электронной концентрации на масштабogramмах наблюдаются ионосферные неоднородности с повышенной электронной концентрацией ($\Delta N_e/N_e \approx +0.5\% \div +1\%$). Масштабы этих неоднородностей составляют $l \approx 25 \div 35$ км. Траектории движения лучей R08–KANA, R08–YADR и R08–SHUM проходят поперёк силовых линий магнитного поля Земли (см. рис. 1, *б*). Таким образом, можно сделать вывод о том, что в поперечном относительно магнитного поля Земли сечении при включении волны накачки в ионосфере формируется область с пониженной электронной концентрацией, на периферии которой формируются области с повышенной электронной концентрацией.

Луч G23–СНЕВ сканирует возмущённую область ионосферы практически по её центру (рис. 1, *a*) в связи с этим эффекты, выделенные для трёх предыдущих масштабogramм (рис. 3, *б*, *в* и *е*), здесь проявляются особенно ярко (см. рис. 3, *з*). При включении волны накачки в ионосфере формируется область с пониженной электронной концентрацией ($\Delta N_e/N_e \sim -2\% \div -1.5\%$) с масштабами $\sim 40 \div 60$ км. Сразу после выключения нагрева электронная концентрация в этой области возрастает до значений $\sim +1.5\% \div +2\%$, масштаб области с повышенной электронной концентрацией равен $\sim 35 \div 40$ км. Затем через ~ 2 мин неоднородность релаксирует к фоновому уровню.

Как видно из рис. 1, *a*, луч R08–BATR сканирует ВО ионосферы наиболее близко к «магнитному зениту» стенда СУРА. Здесь необходимо отметить, что мощная радиоволна за счёт ионосферной рефракции уходит на юг в сторону «магнитного зенита», и именно в этом направлении создаётся наибольшая напряжённость электромагнитного поля, что, в свою очередь, приводит к наиболее эффективному взаимодействию радиоизлучения с ионосферной плазмой. В связи с этим, как можно видеть из рис. 3, *d*, наиболее яркие эффекты, возникающие при формировании и релаксации искусственных ионосферных неоднородностей, наблюдаются для радиотрассы R08–BATR. Во время включения нагрева в ионосфере образуется искусственная неоднородность с масштабом $l \gtrsim 80$ км и понижением электронной концентрации до $\Delta N_e/N_e > -2\%$. Учитывая конфигурацию сканирования лучом R08–BATR ВО (см. рис. 1), можно сделать вывод о том, что на границах области с пониженной электронной концентрацией формируются области с повышенной электронной плотностью ($\Delta N_e/N_e > +2\%$).

Таким образом, из анализа масштабogramм, представленных на рис. 3, следует, что искусственная ионосферная неоднородность, формируемая в поле мощной радиоволны в *F*-слое ионосферы, имеет достаточно сложную структуру. На границах области с пониженной электронной концентрацией возникают плазменные неоднородности с повышенной электронной плотностью. Градиенты $\Delta N_e/N_e$ на границах искусственной ионосферной неоднородности, стимулированной мощным радиоизлучением стенда СУРА, по нашим оценкам, могут достигать 10%. Масштабы искусственной ионосферной неоднородности составляют $l_{\perp} \approx 45 \div 60$ км поперёк и $l_{\parallel} \gtrsim 70$ км вдоль силовых линий магнитного поля Земли.

Заключение

В работе представлен метод построения пространственной картины распределения полного электронного содержания в области стимулированного свечения ионосферы в красной линии оптического спектра ($\lambda = 630$ нм) в экспериментах по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением стенда СУРА. В обоснование метода положен тот факт, что искусственное оптическое свечение ионосферы возникает в одних и тех же пространственных координатах. Следовательно, мы можем считать, что и искусственная ионосферная неоднородность формируется в этих же пространственных координатах.

Метод основан на проведении совместного анализа вариаций полного электронного содержания на радиотрассах «навигационный спутник – наземный пункт» для ряда приёмных станций глобальных навигационных спутниковых систем, расположенных в радиусе ~ 160 км от стенда СУРА. Метод позволяет анализировать вариации электронной плотности в пространственно разнесённых сечениях области ионосферы, возмущённой мощным радиоизлучением стенда СУРА, а также оценить пространственные возмущения электронной концентрации как вдоль, так и поперёк магнитного поля Земли.

Для отработки метода и верификации полученных результатов был выбран тот же экспериментальный сеанс, что и в работе [6], а именно 29 августа 2016 года. Анализ экспериментальных данных, проведённый при помощи представленного метода, позволяет сделать вывод о том, что в поле мощной радиоволны обыкновенной поляризации, направленной вертикально вверх (то есть в зенит), возникает достаточно узкая, вытянутая вдоль силовых линий геомагнитного поля в направлении «магнитного зенита» искусственная ионосферная неоднородность с пониженной плотностью электронной концентрации, которая вдоль своих границ имеет области с повышенной электронной концентрацией. Масштаб искусственной ионо-

сферной неоднородности поперёк силовых линий геомагнитного поля составляет $l_{\perp} \approx 45 \div 60$ км, а вдоль – $l_{\parallel} \gtrsim 70$ км. На границах области с пониженной электронной концентрацией имеются неоднородности с повышенным уровнем электронной плотности. Градиент $\Delta N_e/N_e$ на границах возмущённой области может достигать до $\sim 10\%$.

Здесь можно отметить, что полученные в работе результаты качественно, а с точки зрения определения масштаба искусственной ионосферной неоднородности в долготном направлении, и количественно совпадают с результатами, приведёнными в работе [11]. Экспериментальные результаты, свидетельствующие о размерах искусственной ионосферной неоднородности поперёк геомагнитного меридиана стенда СУРА (l_{\perp}), получены впервые.

Следует сказать, что представленные результаты являются лишь первым шагом. В дальнейшем метод будет развиваться с целью построения трёхмерной численной модели искусственных плазменных неоднородностей, возникающих в поле внешней электромагнитной волны. Моделирование будет проводиться с использованием пространственных сечений, полученных на лучах «навигационный спутник – наземный приёмный пункт» по аналогии с методикой построения трёхмерной области стимулированного свечения ионосферы, описанной в работе [7].

Благодарности. Эксперименты проведены на УНУ СУРА, УНУ СУРА поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ, полученным в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», уникальный идентификатор проекта RFMEFI62020X0003, номер соглашения 075-15-2020-529. Метод обработки экспериментальных данных разработан при поддержке Российского научного фонда: обработка оптических измерений – проект № 20-12-00197; совместный анализ синхронных измерений вариаций ПЭС и искусственного свечения, визуализация результатов, подготовка текста публикации – проект № 19-72-00072.

Литература

1. Шиндин А.В., Грач С.М., Сергеев Е.Н., Рябов А.В. Пространственная корреляция крупномасштабных неоднородностей плотности (по данным анализа GPS-сигналов) и искусственного оптического свечения в линии 630 нм в ионосфере, возмущенной мощной радиоволной // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 105–113.
2. Когогин Д.А., Шиндин А.В., Насыров И.А., Грач С.М. Синхронные измерения вариаций искусственного оптического свечения и полного электронного содержания ионосферы, стимулированных мощным радиоизлучением стенда «СУРА» // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2016. – Т. 158, кн. 3. – С. 434–447.
3. Грач С.М., Насыров И.А., Когогин Д.А., Шиндин А.В., Дементьев В.О., Сергеев Е.Н., Акчурун А.Д. О связи пространственного поведения полного электронного содержания ионосферы на трассе GPS-сигналов и искусственного оптического свечения ионосферы в линии 630 нм // Изв. вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61, № 3. – С. 181–197.
4. Grach S.M., Nasyrov I.A., Kogogin D.A., Shindin A.V., Sergeev E.N., Razi Mousavi S.A. Mutual allocation of the artificial airglow patches and large-scale irregularities in the HF-pumped ionosphere // Geophys. Res. Lett. – 2018. – V. 45, No 23. – P. 12,749–12,756. – doi: 10.1029/2018GL080571.

5. *Kogogin D., Nasyrov I., Shindin A., Maksimov D., Grach S., Dementiev V., Zagretdinov R.* 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 // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation, RWP: Proceedings. – IEEE, 2019. – P. 300–303. – doi: 10.1109/RWP.2019.8810188.
6. *Когогин Д.А., Насыров И.А., Шиндин А.В., Грач С.М., Максимов Д.С., Загреддинов Р.В., Дементьев В.О.* Динамическая картина стимулированной мощным радиоизлучением области свечения ионосферы, полученная по результатам совместного анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций полного электронного содержания // Изв. вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 89–104.
7. *Шиндин А.В., Клименко В.В., Когогин Д.А., Белецкий А.Б., Грач С.М., Насыров И.А., Сергеев Е.Н.* Пространственные характеристики области генерации искусственного свечения ионосферы в линии 630 нм при воздействии радиоизлучением стэнда «СУРА» // Изв. вузов. Радиофизика. – 2017. – Т. 60, № 11. – С. 949–966.
8. IGRF-13. The International Geomagnetic Reference Field. 13th Generation. – International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), Division V-MOD: Geomagnetic Field Modeling. – URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/home.html/>.
9. *Клименко В.В., Грач С.М., Сергеев Е.Н., Шиндин А.В.* Характеристики искусственного свечения ионосферы при омическом нагреве и при ускорении электронов плазменной турбулентностью, инициированными мощным радиоизлучением стэнда «Сура» // Изв. вузов. Радиофизика. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 481–501.
10. IRI-2012. International Reference Ionosphere. – Greenbelt, Md.: National Aeronautics and Space Administration, NASA/GSFC, Heliospheric Physics Laboratory, Code 672; Fairfax, Va.: George Mason University, Space Weather Laboratory. – URL: <https://iri.gsfc.nasa.gov/>.
11. *Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Gurevich A.V., Zybin K.P., Frolov V.L., Myasnikov E.N., Muravieva N.V., Carlson H.C.* Radio tomography and scintillation studies of ionospheric electron density modification caused by a powerful HF-wave and magnetic zenith effect at mid-latitudes // Phys. Lett. A. – 2004. – V. 325, No 5–6. – P. 381–388. – doi: 10.1016/j.physleta.2004.03.055.

Поступила в редакцию
03.12.2020

Насыров Игорь Альбертович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники; старший научный сотрудник НИЛ кафедры распространения радиоволн и радиоастрономии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
пр. Гагарина, д. 23, г. Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: inasyrov@kpfu.ru

Когогин Денис Александрович, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры радиоэлектроники

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: dkogogin@kpfu.ru

Шиндин Алексей Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Математические методы в радиофизике»

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
пр. Гагарина, д. 23, г. Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: *shindin@rf.unn.ru*

Грач Савелий Максимович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры распространения радиоволн и радиоастрономии

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
пр. Гагарина, д. 23, г. Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: *sgrach@rf.unn.ru*

Загреддинов Ренат Вагизович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии и космической геодезии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *Renat.Zagretdinov@kpfu.ru*

Белецкий Александр Борисович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Институт солнечно-земной физики СО РАН
ул. Лермонтова, д. 126А, г. Иркутск, 664033, Россия
E-mail: *beletsky@mail.iszf.irk.ru*

Емельянов Валерий Викторович, аспирант кафедры радиоэлектроники

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *evv960722@gmail.com*

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
 SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
 (Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)
 2021, vol. 163, no. 1, pp. 59–76

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2541-7746.2021.1.59-76

**The Method of Plotting a Spatial Distribution
 Pattern of the Total Electron Content in the Region
 of Artificial Airglow of the Ionosphere**

I.A. Nasyrov^{a,b}, D.A. Kogogin^{a**}, A.V. Shindin^{b***}, S.M. Grach^{b****},
 R.V. Zagretdinov^{a*****}, A.B. Beletsky^{c*****}, V.V. Emeljanov^{a*****}*

^a*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

^b*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^c*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
 Irkutsk, 664033 Russia*

E-mail: **inasyrov@kpfu.ru*, ***dkogogin@kpfu.ru*, ****shindin@rf.unn.ru*,
 *****sgrach@rf.unn.ru*, ******Renat.Zagretdinov@kpfu.ru*,
 ******beletsky@mail.iszf.irk.ru*, ******evv960722@gmail.com*

Received December 12, 2020

Abstract

The method of plotting a spatial distribution pattern of the total electron content (TEC) in the region of artificial airglow of the ionosphere in the red line of the optical spectrum ($\lambda = 630$ nm) was developed during the experiments on disturbances of the ionosphere by powerful radio emission of the SURA facility. To test the method, a measurement session on August 29, 2016 from 18:40 to 20:10 UTC, i.e., when the ionospheric and weather conditions varied slightly and allowed simultaneous optical measurements of the artificial airglow of the ionosphere from two spatially separated sites (Vasilsursk near the SURA facility and Magnitka lying ~ 170 km East of the SURA facility), was selected. As a result of the simultaneous optical measurements, the area of artificial airglow was plotted in a three-dimensional projection and the spatial position of the disturbed region of the ionosphere stimulated by the powerful radio emission of the SURA facility was determined. The method of plotting a spatial pattern of the electron density distribution in the disturbed region of the ionosphere is based on a joint analysis of variations in the TEC on the radio paths “navigation satellite – ground receiving site” for a number of receiving stations of the global navigation satellite systems located within a radius of ~ 160 km from the SURA facility. By using this method, the values of electron density variations for different spatial cross-sections of the disturbed region of the ionosphere can be obtained. The joint analysis of the experimental data carried out with the help of the method under consideration showed that in the field of the powerful radio wave a disturbed region with the complex structure formed along the magnetic field lines. Plasma inhomogeneities with an increased electron density occurred at the boundaries of the region with a reduced electron concentration. The difference $\Delta N_e/N_e$ at the boundaries of the disturbed region, i.e., between the regions with increased and decreased electron density, might reach 10%. The size of the disturbed region is $l_{\perp} \approx 45 \div 60$ km across and $l_{\parallel} \gtrsim 70$ km along the Earth’s magnetic field lines.

Keywords: ionosphere, GNSS, total electron content, artificial ionospheric inhomogeneities, powerful short-wave radio emission, SURA facility, stimulated airglow of ionosphere

Acknowledgments. The experiments were carried out at the SURА facility. The SURА facility was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the federal targeted program “Research and development in priority areas of the scientific and technological complex of Russia for 2014–2020” (project ID RFMEFI62020X0003, agreement no. 075-15-2020-529). The method for processing experimental data was developed with the support of the Russian Science Foundation: processing of the optical measurements – project no. 20-12-00197; joint analysis of the synchronous measurements of TEC variations and artificial airglow, visualization of the results, preparation of the publication text – project no. 19-72-00072.

Figure Captions

Fig. 1. Scheme of the experiment on August 29, 2016. Panel *a*): a red semitransparent ellipsoid – a region of stimulated airglow of the ionosphere in a three-dimensional projection. The green arrow shows the direction of the Earth’s magnetic field (\vec{B}). Panel *b*): top view. The black dashed lines mark the geomagnetic latitude and longitude of the site Vasil’sursk, calculated by the IGRF-13 model [8]. The yellow rhombuses mark the location of the GNSS stations used in the experiment. Colored curves with corresponding markers show the trajectories of movement of the ionospheric penetration points calculated for an altitude of 315 km, for a number of “navigation satellite – ground receiving site” (beam NS–GS) beams that passed through the disturbed region of the ionosphere during the measurements: R07–52NN (pink line); R08–KANA (green line); R08–YADR (blue line); G23–CHEB (red line); R08–BATR (black line); R08–SHUM (cyan line), where R – GLONASS navigation satellite, G – GPS navigation satellite. Dashed lines of the corresponding color mark the time intervals of scanning the disturbed volume with the corresponding beams of the NS–GS: R07–52NN – 18:55 ÷ 19:07 UTC; R08–KANA – 19:19 ÷ 19:31 UTC; R08–YADR – 19:43 ÷ 19:55 UTC; G23–CHEB – 19:31 ÷ 19:43 UTC; R08–BATR – 19:07 ÷ 19:19 UTC; R08–SHUM – 19:31 ÷ 19:43 UTC.

Fig. 2. The experimental series of the TEC variations (dI) obtained on August 29, 2016: *a*) radio path R07–52NN; *b*) radio path R08–KANA; *c*) radio path G23–YADR; *d*) radio path R08–CHEB; *e*) radio path R08–BATR; *f*) radio path R08–SHUM. The gray vertical rectangles mark the time intervals corresponding to the scanning times of the disturbed region of the ionosphere by the beams NS–GS for each satellite (marked with dashed lines of the corresponding colors in Fig. 1). On the abscissa axes, the bold solid line shows the mode of switching on the pump wave. TEC variations are presented in TECU units.

Fig. 3. The spatial scalegrams calculated by wavelet transform (2) for six beams NS–GS: *a*) R07–52NN, *b*) R08–KANA, *c*) R08–YADR, *d*) G23–CHEB, *e*) R08–BATR, *f*) R08–SHUM. The color palette (in the right part of the figure) shows the intensity of variations $\Delta N_e/N_e$.

References

1. Shindin A.V., Grach S.M., Sergeev E.N., Ryabov A.V. Spatial correlation of large-scale plasma density inhomogeneities (measured by GPS signal analysis) and regions of 630 nm artificial optical emissions in the HF-pumped ionosphere. *Vestn. Nizhegorod. Univ. im. N.I. Lobachevskogo*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 105–113. (In Russian)
2. Kogogin D.A., Shindin A.V., Nasyrov I.A., Grach S.M. Simultaneous measurements of variations in the artificial airglow and the total electron content of the ionosphere caused by powerful radio waves of “SURА” facility. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2016, vol. 158, no. 3, pp. 434–447. (In Russian)
3. Grach S.M., Nasyrov I.A., Kogogin D.A., Shindin A.V., Dementiev V.O., Sergeev E.N., Akchurin A.D. 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. *Radiophys. Quantum Electron.*, 2018, vol. 61, no. 3, pp. 161–175. doi: 10.1007/s11141-018-9879-2.

4. Grach S.M., Nasyrov I.A., Kogogin D.A., Shindin A.V., Sergeev E.N., Razi Mousavi S.A. Mutual allocation of the artificial airglow patches and large-scale irregularities in the HF-pumped ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 2018, vol. 45, no. 23, pp. 12,749–12,756. doi: 10.1029/2018GL080571.
5. Kogogin D., Nasyrov I., Shindin A., Maksimov D., Grach S., Dementiev V., Zagretdinov R. 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. *Proc. 2019 Russ. Open Conf. on Radio Wave Propagation, RWP*. IEEE, 2019, pp. 300–303. doi: 10.1109/RWP.2019.8810188.
6. Kogogin D.A., Nasyrov I.A., Shindin A.V., Grach S.M., Maksimov D.S., Zagretdinov R.V., Dementiev V.O. Dynamic changes of the ionospheric artificial airglow region caused by high-power radio waves based on a joint analysis of night-sky snapshots in the 630 nm line and total electron content variation maps. *Radiophys. Quantum Electron.*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 83–96. doi: 10.1007/s11141-020-10037-9.
7. Shindin A.V., Klimenko V.V., Kogogin D.A., Beletsky A.B., Grach S.M., Nasyrov I.A., Sergeev E.N. Spatial characteristics of the 630-nm artificial ionospheric airglow generation region during the SURA facility pumping. *Radiophys. Quantum Electron.*, 2018, vol. 60, no. 11, pp. 849–865. doi: 10.1007/s11141-018-9852-0.
8. IGRF–13. The International Geomagnetic Reference Field. 13th Generation. International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), Division V-MOD: Geomagnetic Field Modeling. Available at: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/home.html>.
9. Klimenko V.V., Grach S.M., Sergeev E.N., Shindin A.V. Features of the ionospheric artificial airglow caused by ohmic heating and plasma turbulence-accelerated electrons induced by HF pumping of the Sura heating facility. *Radiophys. Quantum Electron.*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 431–449. doi: 10.1007/s11141-017-9812-0.
10. IRI–2012. International Reference Ionosphere. National Aeronautics and Space Administration. Greenbelt, Md., National Aeronautics and Space Administration, NASA/GSFC, Heliospheric Physics Laboratory, Code 672; Fairfax, Va., George Mason University, Space Weather Laboratory. Available at: <https://iri.gsfc.nasa.gov/>.
11. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Gurevich A.V., Zybin K.P., Frolov V.L., Myasnikov E.N., Muravieva N.V., Carlson H.C. Radio tomography and scintillation studies of ionospheric electron density modification caused by a powerful HF-wave and magnetic zenith effect at mid-latitudes. *Phys. Lett. A.*, 2004, vol. 325, nos. 5–6, pp. 381–388. doi: 10.1016/j.physleta.2004.03.055.

Для цитирования: Насыров И.А., Когогин Д.А., Шиндин А.В., Грач С.М., Загреддинов Р.В., Белецкий А.Б., Емельянов В.В. Метод построения пространственной картины распределения полного электронного содержания в области стимулированного оптического свечения ионосферы // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2021. – Т. 163, кн. 1. – С. 59–76. – doi: 10.26907/2541-7746.2021.1.59-76.

For citation: Nasyrov I.A., Kogogin D.A., Shindin A.V., Grach S.M., Zagretdinov R.V., Beletsky A.B., Emeljanov V.V. The method of plotting a spatial distribution pattern of the total electron content in the region of artificial airglow of the ionosphere. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2021, vol. 163, no. 1, pp. 59–76. doi: 10.26907/2541-7746.2021.1.59-76. (In Russian)