УДК 533.9.08

# 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

Д. А. Когогин<sup>1</sup>\*, И. А. Насыров<sup>1</sup>, А. В. Шиндин<sup>2</sup>, С. М. Грач<sup>2</sup>, Д. С. Максимов<sup>1</sup>, Р. В. Загретдинов<sup>1</sup>, В. О. Дементьев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Казанский федеральный университет, г. Казань;

 $^2$  Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

 $^3$  AO «НПО Государственный институт прикладной оптики», г. Казань, Россия

В работе описана методика проведения совместного анализа снимков ночного неба и карт вариаций полного электронного содержания и представлена динамическая пространственно-временная картина распределения интенсивности вариаций полного электронного содержания в области генерации стимулированного свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода ( $\lambda = 630$  нм) при воздействии мощного радиоизлучения стенда «Сура». Измерения были проведены 29.08.2016, двумерные карты вариаций полного электронного содержания построены по данным сети из тридцати станций глобальных навигационных спутниковых систем, расположенных в радиусе 700 км от стенда. Показано, что область максимальной яркости пятна стимулированного свечения ионосферы пространственно локализована в области минимума интенсивности вариаций полного электронного содержания, в то время как область максимума интенсивности вариаций полного электронного содержания соответствует области минимума яркости пятна стимулированного свечения. Количественные оценки для формирующейся после включения волны накачки стенда «Сура» полости с пониженной электронной концентрацией в области свечения ионосферы варьируются в диапазоне  $\Delta N_{\rm e}/N_{\rm e} \approx 4 \div 9 \%$  (здесь  $N_{\rm e}$  — концентрация электронов,  $\Delta N_{\rm e}$  — её изменение в полости). Предложенная методика проведения эксперимента снимает ограничения, связанные с необходимостью пролёта навигационного спутника непосредственно над главным лепестком диаграммы направленности антенной системы стенда «Сура». Это существенно увеличивает шансы успешного проведения синхронных измерений вариаций полного электронного содержания и стимулированного свечения ионосферы в линии 630 нм.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования процессов нелинейного взаимодействия мощного коротковолнового радиоизлучения с ионосферной плазмой начали проводиться с 70-х годов в СССР и США. В настоящее время экспериментальные исследования искусственной турбулентности ионосферной плазмы, возникающей в поле мощных коротких радиоволн, проводятся на нагревных стендах «Сура», (Васильсурск, Россия), EISCAT, (Тромсё, Норвегия), НААRР (Аляска, США), Аресибо (Пуэрто-Рико, США). Рабочие частоты стендов варьируются в пределах от 2,85 до 10 МГц, максимальная эффективная мощность их излучения составляет от 160 до 3 200 МВт. В частности, показано, что при воздействии на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением ионосферные возмущения развиваются в результате вытеснения плазмы из области её нагрева или вследствие дополнительной ионизации нейтральной компоненты электронами, ускоренными плазменными волнами. В результате образуются неоднородности электронной концентрации с размерами от десятков сантиметров до десятков километров. Диагностика возмущённой области ионосферы осуществляется с помощью зондирования и просвечивания радиоволнами коротковолнового (КВ),

<sup>\*</sup> denis.kogogin@gmail.com

ультракоротковолнового (УКВ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазонов (пробные волны, ракурсное рассеяние, радары некогерентного рассеяния, спутниковая радиотомография), а также при измерениях излучения из возмущённой области в оптическом и радио диапазонах; ряд исследований был проведён при запусках геофизических ракет через возмущённую область (см. [1–3] и цитированную там литературу).

С середины 2000-х годов различные научные группы начали активно использовать сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС для определения полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере Земли в экспериментах по воздействию на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением. Спутники GPS и ГЛОНАСС двигаются по небосводу довольно медленно, линейная скорость перемещения их подыоносферной точки (на высоте h = 300 км) составляет примерно  $40\div70$  м/с. Это позволяет проводить двухчастотное радиозондирование в пределах возмущённой области ионосферы, ограниченной главным лепестком диаграммы направленности антенной системы нагревного стенда, в течение примерно  $15\div50$  мин, в зависимости от длины участка траектории её пересечения с лучом «спутник—ГНСС приёмник». Это обстоятельство позволяет получать информацию как о пространственных, так и о временных характеристиках наблюдаемых неоднородностей электронной концентрации, вызванных нагревом ионосферы мощной радиоволной. Такие исследования проводились на стендах «Сура» [4–13] и HAARP [14–18].

Существенный рост количества станций, оснащённых многочастотными многосистемными приёмниками, позволяющими принимать сигналы спутников большинства действующих ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou и др.), открыл возможность построения региональных и глобальных карт ПЭС [19–21], что позволило получать пространственно-временну́ю картину распределения интенсивности вариаций ПЭС в заданном регионе. Подавляющая часть результатов, в которых для анализа использовались карты вариаций ПЭС с высоким пространственновременны́м разрешением, были получены для Японии, США и Западной Европы, т. к. именно в этих регионах развёрнуты плотные сети ГНСС [21–23]. Источниками возмущения ионосферной плазмы в этих экспериментах являлись солнечный терминатор, геомагнитные бури, литосферные процессы, вторжение метеоров, ракетные запуски и т. д. [21–27].

К сожалению, детальные карты пространственно-временно́го распределения интенсивности вариаций ПЭС в области ионосферы, ограниченной пределами главного лепестка диаграммы направленности антенной системы нагревного стенда, до настоящего времени подробно не исследовались. В первую очередь это связано с тем, что нагревные стенды НААRP (Аляска, США) и EISCAT (Тромсё, Норвегия) расположены в высокоширотных регионах, где пролёты навигационных спутников достаточно редки и углы места из пункта наблюдения на спутник не превышают 60°. Кроме того, в силу экономических причин, в приполярных областях отсутствует развитая сеть станций ГНСС. Нагревный стенд Аресибо (Пуэрто-Рико, США), введённый в эксплуатацию после реконструкции в 2016 году, расположен на острове в Карибском море, где построение сети ГНСС невозможно по объективным причинам. До недавнего времени в окрестности нагревного стенда «Сура», расположенного в средних широтах, так же отсутствовала развитая сеть станций ГНСС. Однако за последние пять-шесть лет здесь ситуация коренным образом изменилась. Если для анализа экспериментальных результатов, полученных в 2010 году, можно было привлечь данные ГНСС с не более чем десяти измерительных пунктов, расположенных в радиусе примерно 700 км от стенда, то в 2016 году таких измерительных пунктов стало около тридцати, а в 2017 году уже более ста двадцати. Таким образом, появилась возможность построения двумерных динамических карт вариаций ПЭС в окрестностях стенда «Сура» с достаточной степенью детализации для исследований пространственно-временной эволюции искусственных ионосферных возмущений, стимулированных мощным коротковолновым радиоизлучением.

По нашим оценкам для сигналов ГНСС на частотах *L*-диапазона<sup>1</sup> радиус первой зоны Френеля на высотах максимума слоя  $F_2$  ионосферы (250÷350 км) составляет примерно 200÷300 м. Таким образом, метод радиозондирования сигналами ГНСС области ионосферы, возмущённой мощным радиоизлучением нагревного стенда, хорошо работает для детектирования искусственных ионосферных неоднородностей с размерами поперёк геомагнитного поля  $l_{\perp} \gtrsim 300$  м.

Другим эффективным методом исследования крупномасштабной структуры возмущённой области является измерение стимулированного свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода ( $\lambda = 630$  нм), связанного с переходом электронов с уровня  $O(^1D)$  в основное состояние  $O(^3P)$ . Потенциал возбуждения уровня  $O(^1D)$ , наиболее низкий из всех наблюдаемых линий стимулированного свечения, составляет 1,96 эВ, а его радиационное время жизни  $\tau_r(O(^1D)) =$ = 107 с [28]. Снимки возмущённой области ионосферы в линии 630 нм, сделанные при помощи ПЗС-камер с соответствующими светофильтрами, указывают на существование крупномасштабной структуры пятен стимулированного свечения с угловыми размерами порядка 1°÷10° (что соответствует размерам 5÷50 км на высотах 250÷280 км над поверхностью Земли), часто перемещающейся (дрейфующей) в пространстве при длительном нагреве [29–38].

В связи с вышеизложенным, возникает несомненный интерес к проведению совместного анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и детальных карт вариаций ПЭС, полученных во время выполнения нагревных экспериментов на стенде «Сура», с целью определения того, как ведёт себя электронная концентрация в области генерации стимулированного свечения ионосферы. Подобный анализ позволит лучше понять физику взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой и построить адекватную модель такого взаимодействия.

Ниже в разделе 1 приводится обоснование выбора сеанса измерений для проведения совместного анализа, а также описаны постановка и условия выполнения эксперимента. Описание методики обработки экспериментальных данных дано в разделе 2. В подразделе 2.1 подробно описана методика построения пространственно-временны́х карт вариаций ПЭС, а в подразделе 2.2 даётся краткое описание методики обработки снимков ночного неба и получения изображений пространственного положения пятна стимулированного свечения ионосферы. Совместный анализ изображений свечения и карт вариаций ПЭС приведён в разделе 3. Обсуждение полученных результатов проводится в разделе 4. В заключении сделаны общие выводы по работе.

### 1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В 2000 году на стенде «Сура» (р/п Васильсурск, Нижегородская область, географические координаты 56,15° с. ш., 46,10° в. д.) были начаты регулярные исследования стимулированного свечения ионосферы при воздействии на неё мощным коротковолновым радиоизлучением, которые продолжаются и по настоящее время [32–42].

В публикациях [41, 42] исследуется вопрос о связи пространственного поведения ПЭС на трассе навигационный спутник—п. Васильсурск и стимулированного свечения ионосферы в линии 630 нм при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением. Сложности, возникающие при проведении совместного анализа, подробно изложены в работе [42]. За период с 2010 года по 2018 год было проведено восемнадцать экспериментальных кампаний, в которых было выполнено около ста пятидесяти сеансов наблюдений стимулированного свечения с использованием ПЗС-камер. Однако только в пяти сеансах были удовлетворены все необходимые условия для

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Несущие частоты для системы GPS: L1-1575,42 МГц; L2-1227,60 МГц; L5-1176,45 МГц; для системы ГЛОНАСС: L1-1602 МГц +  $n \cdot 0,5625$  МГц; L2-1246 МГц +  $n \cdot 0,4375$  МГц; где  $n = -7, -6, -5, \ldots, 0, \ldots, 6-$ канал частоты спутника.

проведения совместного анализа изображений стимулированного свечения и временны́х вариаций ПЭС. Данное обстоятельство связано с тем, что пролёт навигационного спутника через основной лепесток диаграммы направленности и, соответственно, измерения ПЭС должны проводиться синхронно с оптическими измерениями свечения. Более того, желательно, чтобы радиотрасса навигационный спутник—п. Васильсурск «рассекала» пятно свечения по его центру во время движения спутника над возмущённой областью ионосферы. Из всех пяти удачных сеансов данное условие было выполнено только в одном из них.

В дополнение к сеансам, подробно описанным в работах [41, 42], пятно стимулированного свечения, коррелированное с циклами накачки, регистрировалось с 19:01 UT до 19:46 UT 29.08.2016. Однако в этот период времени ни один луч навигационный спутник—п. Васильсурск не проходил через поле зрения ПЗС-камеры. С появлением дополнительных данных за 2016 год, полученных на сети станций ГНСС, расположенных в окрестности стенда «Сура» (см. рис. 1), стало возможным построить пространственно–временные карты вариаций ПЭС для указанного времениого интервала, а затем провести совместный анализ вариаций ПЭС и изображений пятна свечения. Предварительные результаты этой работы докладывались на XXVI Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» [43]. К сожалению, в 2017–2019 годах, удачных сеансов регистрации стимулированного свечения на стенде «Сура» не было, что в первую очередь связано с минимумом солнечной активности, который продолжается и по настоящее время.

Измерения 29.08.2016 были выполнены в спокойных геомагнитных и ионосферных условиях. Индекс  $K_{\rm p} = 2$ ,  $D_{\rm st} = 3$ , а индекс состояния ионосферной погоды составлял  $W_{\rm p} = +2,5$ , что соответствует умеренным ионосферным возмущениям [44]. В период времени 18:30÷20:14 UT воздействие на ионосферу осуществлялось мощной радиоволной с обыкновенной поляризацией циклами 3 мин — нагрев, 3 мин — пауза ([+3; -3]); диаграмма направленности была ориентирована в зенит. В интервале наблюдения свечения частота волны накачки составляла  $f_0 = 4,35$  МГц, эффективная излучаемая мощность  $P_{\rm eff} \approx 70$  МВт.

Регистрация стимулированного свечения в красной линии атомарного кислорода ( $\lambda = 630$  нм) при воздействии мощным радиоизлучением стенда «Сура» осуществлялось при помощи ПЗСкамеры SBIG-8300M (поле зрения  $20^{\circ} \times 15^{\circ}$ ), располагавшейся в непосредственной близости от передающей антенны стенда «Сура». Методика проведения оптических измерений стимулированного свечения в этом эксперименте подробно описана в работе [37].

Экспериментальные данные двухчастного радиозондирования ионосферы сигналами навигационных спутников были получены на сети из тридцати станций ГНСС, расположенных в радиусе около 700 км от стенда «Сура». Схема расположения станций ГНСС в эксперименте представлена на рис. 1. Во время проведения оптических измерений (18:30÷20:14 UT) над областью, указанной на рис. 1, проходило семь навигационных спутников систем GPS (G23, G03, G09, G22) и ГЛО-НАСС (R01, R07, R08).

Во время выполнения измерений состояние ионосферы контролировалось при помощи станции вертикального зондирования ионосферы CADI [45], расположенной в непосредственной близости от антенной системы стенда «Сура». Регистрация ионограмм осуществлялась с периодичностью один раз в 6 мин во время пауз излучения волны накачки для исключения их искажений. На рис. 2 представлено поведение высоты отражения волны накачки  $h_0$  (чёрная сплошная линия), высоты максимума  $h_{\rm max}$  электронной концентрации слоя  $F_2$  (зелёные маркеры) и параметра  $\Delta f = f_{0F_2} - f_0$  (синяя сплошная линия), характеризующего разность между максимальной плазменной частотой слоя  $F_2$  и частотой волны накачки, во време́нном интервале 18:58 UT÷19:49 UT. Красной пунктирной линией показано медианное значение высоты отражения волны накачки  $h_0 \approx 280$  км. Высота верхнегибридного резонанса волны накачки для указанного време́нного периода  $h_{\rm UH}[{\rm км}] \approx h_0[{\rm км}] - 9.$ 



Рис. 1. Схема расположения станций ГНСС (30 пунктов) в эксперименте 29.08.2016. Штриховыми линиями показаны геомагнитная широта и долгота стенда «Сура». Красный эллипс — проекция диаграммы направленности стенда, серый прямоугольник — проекция поля зрения (20°×15°) ПЗС-камеры SBIG-8300M. Обе проекции рассчитаны для высоты 280 км



Рис. 2. Временной ход высоты отражения волны накачки  $h_0$  (чёрная сплошная линия), высоты максимума электронной концентрации  $h_{\max F_2}$  (зелёные маркеры) и поведение параметра  $\Delta f = f_{0F_2} - f_0$  (синия сплошная линия) в период регистрации свечения 18:58÷19:49 UT 29.08.2016. Красной штриховой линией показано медианное значение высоты отражения волны накачки  $h_0 \approx 280$  км

### 2. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

#### 2.1.Построение карт пространственно-временных вариаций ПЭС

Метод определения пространственно-временно́го распределения вариаций ПЭС по данным двухчастотного радиозондирования сигналами навигационных спутников на плотных сетях станций ГНСС, оснащённых многочастотными многосистемными приёмниками, был предложен в ра-

боте [19]. Он основан на том, что в каждый момент времени каждый луч «спутник—приёмник» характеризуется значением ПЭС, азимутом и углом места, а также положением подыоносферной точки в географических координатах<sup>2</sup>. Нанося значение вариаций вертикального ПЭС, кодируемых глубиной цвета, в соответствии с географическим положением подыоносферной точки для каждого луча «спутник—приёмник» для всех доступных в выбранном регионе станций, можно получать карты вариаций ПЭС с интервалом времени исходных данных станций ГНСС [46].

Для построения карт вариаций ПЭС в эксперименте 29.08.2016 были использованы данные семи навигационных спутников систем GPS и ГЛОНАСС (G03, G09, G22, G23, R01, R07, R08), подыоносферные точки которых проходили в пределах области, указанной на рис. 1, во время воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением, а отдельные лучи «спутник—приёмник» для навигационных спутников G23, R07, R08 проходили через область поля зрения ПЗС-камеры ( $20^{\circ} \times 15^{\circ}$ ) в интервале регистрации свечения. Использование большого числа спутников и наземных приёмных станций позволило расширить пространственный охват и повысить разрешение карт, отображающих вариации ПЭС, за счёт увеличения количества лучей «спутник—приёмник» и, соответственно, точек на картах вариаций ПЭС.

На первом шаге обработки данных ГНСС-радиозондирования были рассчитаны географические координаты положения ионосферных и подыоносферных точек и наклонное ПЭС  $I_{\rm S}(t)$  для каждого луча «спутник—приёмник» всех тридцати станций, участвующих в эксперименте (см. рис. 1). Соотношения, используемые для нахождения географических координат ионосферной и подыоносферной точек, были взяты из работы [46]. Исходя из интегрального характера ПЭС, в общем случае невозможно осуществить привязку наблюдаемых возмущений ПЭС к конкретной высоте. Как правило, при определении широты и долготы ионосферной и подыоносферной точек предполагается, что наибольший вклад в ПЭС вносят заряженные частицы, сосредоточенные вблизи высоты максимума электронной концентрации  $h_{\max F_2}$ . Толщина данного слоя, безусловно, пренебрежимо мала по сравнению с длиной луча «спутник—приёмник», и считается, что всё ПЭС, регистрируемое на данном луче, сосредоточено в точке пересечения луча и тонкого слоя на высоте  $h_{\max F_2}$ , т. е. в ионосферной точке.

В зависимости от геофизических условий  $h_{\max F_2}$  может варьироваться от 200 до 400 км [46], что существенно влияет на результаты расчёта географических координат подыоносферных точек и, соответственно, привязки вариаций на картах пространственно-временно́го распределения ПЭС. Для рассматриваемого экспериментального дня в период регистрации стимулированного свечения ионосферы медианное значение  $h_{\max F_2}$  было равно 317 км (зелёные маркеры на рис. 2).

Однако в ряде работ показано, что вклад в ПЭС различных слоёв ионосферы и плазмосферы может быть достаточно существенным. В частности, из оценок, приведённых в работе [47], видно, что 90% вклада в ПЭС вносит столб с высотой 1 200 км, при этом до высоты 300 км этот вклад составляет не более 30% от ПЭС и достигает 60% на высоте 500 км в вечерние и ночные часы. В работах [48, 49] показано, что в ряде случаев вклад плазмосферы может достигать примерно 50% от наблюдаемого ПЭС. Таким образом, вклад в ПЭС не ограничивается тонким слоем, определяемым ионосферной точкой, и вопрос привязки возмущений ПЭС к конкретной высоте требует дополнительного анализа для каждого экспериментального результата, полученного методом расчета ПЭС по сигналам ГНСС.

В данной работе для расчёта географических координат положения подыоносферных точек и привязки наблюдаемых вариаций ПЭС была выбрана высота  $h_{\rm IPP} = 280$  км, соответствующая медианному значению высоты отражения волны накачки  $h_0$  в период регистрации свечения

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Ионосферная точка (IPP, Ionospheric Penetration Point) — точка пересечения лучом «спутник—приёмник» сферического слоя на высоте ионосферы. Подыоносферная точка — проекция ионосферной точки на поверхность Земли.

18:58 UT÷19:49 UT. Согласно данным двухпозиционной регистрации свечения в красной линии (630 нм), представленным в работе [37], в 70 % случаев высота центра области свечения располагается на  $10\div20$  км ниже высоты отражения волны накачки, а её характерный высотный размер составляет около 35 км. Поэтому привязка ионосферной точки к данной высоте, на наш взгляд, является обоснованной с точки зрения проведения совместного анализа изображений свечения и карт вариаций ПЭС, описанного в разделе 3. В то же время обоснование выбора высоты привязки ионосферной точки  $h_{\rm IPP}$  и вариаций ПЭС обусловлено также тем, что, согласно современным представлениям (см., например, [1]), первоначальное взаимодействие мощной радиоволны с ионосферной плазмой происходит вблизи уровня отражения волны накачки. Это приводит к сильному разогреву электронов в резонансной области ( $h_0 - h_{\rm UH} \approx 9$  км в интервале времени регистрации свечения) и генерации искусственных ионосферных неоднородностей с различными масштабамив.

После определения географических координат положения ионосферных и подыоносферных точек из полученных рядов наклонного ПЭС был удалён тренд, связанный с изменением угла места спутника (т. е. длины участка траектории спутникового сигнала, проходящего через ионосферную плазму), с помощью вычитания из наклонного ПЭС  $I_{\rm S}(t)$  аппроксимирующего полинома шестого порядка. Далее для устранения ракурсного эффекта и нормировки амплитуды вариаций ПЭС с использованием методики, предложенной в работах [21, 50], полученные значения вариаций наклонного ПЭС  $dI_{\rm S}(t)$  были приведены к эквивалентным вертикальным значениям dI(t) по следующей формуле:

$$dI(t) = dI_{\rm S}(t) \cos\left[\arcsin\left(\frac{r_{\rm e}}{r_{\rm e} + h_{\rm IPP}}\cos\theta_{\rm s}\right)\right].$$
(1)

Здесь dI(t) — вариации вертикального ПЭС, d $I_{\rm S}(t)$  — вариации наклонного ПЭС,  $r_{\rm e}$  — радиус Земли,  $h_{\rm IPP} = 280$  км,  $\theta_{\rm s}$  — угол места луча спутник—приёмник. Поскольку формула (1) получена в приближении сферически-слоистой ионосферы, наиболее достоверные результаты определения ПЭС соответствуют высоким углам места. Исходя из этого для уменьшения погрешности при переходе от наклонного к вертикальному ПЭС данные, полученные при низких углах места ( $\theta_{\rm s} < 30^{\circ}$ ), исключались из расчёта.

На следующем этапе обработки данных с помощью фильтра скользящего среднего (окно фильтра 6 мин) из полученных рядов вариаций вертикального ПЭС dI(t) были выделены вариации ПЭС с периодами, соответствующими режиму воздействия волны накачки. Используемый в работе подход к обработке рядов ПЭС, состоящий из поэтапных процедур удаления тренда, приведения значений наклонных вариаций ПЭС к вертикальным значениям с последующим выделением характерных периодов при помощи процедур цифровой фильтрации, является стандартным подходом при обработке данных ПЭС (см., например, работу [51]). Вариации вертикального ПЭС dI(t) для каждого момента времени ставились в соответствие с положением подыоносферной точки, отвечающей выбранному лучу спутник—приёмник, и кодировались глубиной цвета. Таким образом было получено двумерное распределение вариаций вертикального ПЭС на неравномерной сетке.

Далее была проведена многомерная интерполяция данных с использованием многочлена Лагранжа для двух переменных. Для увеличения количества точек на картах вариаций ПЭС на неё наносились все подыоносферные точки и значения вариаций ПЭС за шестиминутный интервал времени, равный периоду воздействия на ионосферу волной накачки. Затем проводился сдвиг точек на одно значение, равное 30 с, и снова осуществлялся расчёт карты вариаций ПЭС. Таким образом, в результате обработки данных за 29.08.2016, полученных на сети из тридцати станций ГНСС (рис. 1), были рассчитаны 209 шестиминутных карт вариаций ПЭС в интервале времени 18:30 UT÷20:14 UT с шагом в 30 с.

#### 2.2. Обработка снимков ночного неба в линии 630 нм

Следующим шагом в анализе данных было сопоставление карт вариаций ПЭС со снимками ночного неба, полученными с помощью ПЗС-камеры SBIG-8300M в этот же временной интервал. Она оснащалась интерференционным светофильтром на длину волны  $\lambda = 630$  нм с полосой пропускания  $\Delta\lambda_{0,5} = 10$  нм, поле зрения камеры составляет  $20^{\circ} \times 15^{\circ}$ , размер кадра  $3\,326 \times 2\,504$ пикселов. ПЗС-камера располагалась в непосредственной близости (около 850 м) от передающей антенны стенда «Сура». Регистрация снимков ночного неба проводилась с выдержкой 25 с и временем открытия затвора в 0 и 30 с каждой минуты, работа ПЗС-камеры была синхронизирована со шкалой мирового времени (UT). Для увеличения чувствительности съёмка велась с использованием бинирования (объединения пикселов) 9 × 9, таким образом размер кадров составлял 281×372 пиксела (18,51 пиксел/градус). Другие технические детали проведения оптических измерений, а также методика обработки изображений, зарегистрированных с помощью ПЗС-камеры, и выделения на них пятен свечения, подробно изложены в работе [37].

Для прямого сопоставления карт вариаций ПЭС с изображениями ночного неба размер карт ПЭС был ограничен пределами поля зрения ПЗС-камеры (20° × 15°) и составил по широте (ось ординат на рис. 3) 55,77°÷56,55° с. ш., по долготе (ось абсцисс на рис. 3) 45,27°÷46,95° в. д., что примерно соответствует размерам 87×105 км на высоте 280 км с центром в точке местоположения п. Васильсурск.

Кроме этого, при обработке кадров ПЗС-камеры были выполнены два последовательных преобразования системы координат изображений ночного неба. Во-первых, был осуществлён переход от системы координат, связанной с изображением (в пикселах), к горизонтальной топоцентрической системе координат (AER, A — азимут, E — угол места, R=280 км). Функциональная связь между двумя системами координат и используемые формулы перехода подробно описаны в Приложении 1 работы [37]. Во-вторых, был выполнен переход от горизонтальной топоцентрической системы координат к геодезической системе координат (широта, долгота, высота). Данный переход можно описать двумя последовательными преобразованиями:

$$AER \to ECEF \to GEODETIC,$$
 (2)

где ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed) — прямоугольная геоцентрическая неинерциальная система координат, жёстко связанная с Землёй и имеющая начало в её центре масс, GEODETIC геодезическая система координат. В качестве опорного эллипсоида вращения (сфероида) был использован эллипсоид всемирной системы геодезических параметров Земли 1984 года (WGS-84). Центром горизонтальной топоцентрической системы координат AER в геодезических координатах является место установки камеры SBIG-8300M (850 м от антенной системы стенда «Сура»).

В результате данных преобразований проекция изображений ночного неба представлена в той же системе координат и пространственной области, что и полученные карты вариаций ПЭС из расчёта высоты  $h_{\rm IPP} = 280$  км, выбранной по медианному значению высоты отражения волны накачки  $h_0$  в период регистрации свечения 18:58 UT÷19:49 UT.

## 3. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ СТИМУЛИРОВАННОГО СВЕЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ И КАРТ ВАРИАЦИЙ ПЭС

Для проведения прямого сопоставления карт вариаций ПЭС и изображений ночного неба были сформированы 192 синхронные пары. Пример такого сопоставления представлен на рис. 3, где показаны две пары карт вариаций ПЭС и изображений ночного неба. Панели *a*, *e* соответствуют картам вариаций ПЭС, панели *b*, *e* — изображениям ночного неба. Сверху над картами



Рис. 3. Примеры карт вариаций ПЭС (a, 6) и изображений ночного неба (b, c) в области пространства  $(87 \times 105 \text{ км})$  на высоте 280 км), ограниченной полем зрения ПЗС-камеры SBIG-8300M в эксперименте 29.08.2016 на стенде «Сура». Белым эллипсом изображена проекция диаграммы направленности стенда на уровне половинной мощности, рассчитанная для высоты 280 км. Белым квадратом показаны области, по которым проводился расчёт средней яркости стимулированного свечения ионосферы b в линии 630 нм (b, c) и средней интенсивности вариаций ПЭС dI (a, c)

вариаций ПЭС указан 6-минутный интервал времени накопления данных, над изображениями ночного неба приведено время начала регистрации кадра. Белым эллипсом изображена проекция диаграммы направленности на уровне половинной мощности, рассчитанная для высоты 280 км без учёта рефракции волны накачки, буквами N, S, E, W обозначены стороны света. Магнитуда вариаций ПЭС dI на картах изменяется от -0,06 до 0,04 TECU (TECU — общепринятая единица измерения ПЭС: 1 TECU =  $10^{16}$  эл/м<sup>2</sup>); шкала яркости свечения b на изображениях ночного неба изменяется от 0 до 8 Рл (1 Рл =  $10^{10}$  фотонов/(м<sup>2</sup> · c))<sup>3</sup>. Белым квадратом на изображениях ночного неба показана область изображения (40 × 40 пикселов) с центром в пикселе с максимальной яркостью в пятне свечения, по которой проводилась оценка средней яркости стимулированного свечения в линии 630 нм. На картах вариаций ПЭС область, эквивалентная области изображения (40 × 40 пикселов), также изображена белым квадратом. Линейные размеры данной области на высоте 280 км с центром в пикселе с максимальной яркостью соответствуют 9,3 × 10 км.

Таким образом, по 94 синхронным парам карт вариаций ПЭС и изображений ночного неба, полученным в период регистрации свечения 18:58 UT÷19:49 UT с шагом в 30 с, был выполнен расчёт средней яркости свечения b в линии 630 нм по области  $40 \times 40$  пикселов с центром в пикселе

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Методика нахождения коэффициента пропорциональности R между единицами аналого-цифрового преобразователя (ед. АЦП) ПЗС-камеры SBIG-8300M и шкалой поверхностной яркости, измеренной в Рэлеях, описана в работе [37]. Для эксперимента 29.08.2016 коэффициент пропорциональности равен  $R = 0,60 \pm 0,16$  Рл/ед. АЦП.



Рис. 4. Результаты расчёта средней интенсивности вариаций ПЭС dI и средней яркости свечения b в линии 630 нм по 94 синхронным парам карт вариаций ПЭС (рис. 3a, b) и изображений ночного неба (рис. 3b, c), полученным в интервале 18:58 UT÷19:49 UT 29.08.2016. Красная линия — динамика средней интенсивности свечения b из области, соответствующей белому квадрату на рис. 3b, c; синяя линия — динамика средней интенсивности вариаций ПЭС dI из эквивалентной области на карте ПЭС (белый квадрат на рис. 3a, b). Стрелками отмечены моменты времени регистрации карт вариаций ПЭС и изображений ночного неба

с максимальной яркостью на изображениях ночного неба и расчёт средней интенсивности вариаций ПЭС dI по эквивалентной области на картах вариаций ПЭС. Полученная динамика данных параметров представлена на рис. 4. Красная линия на нём показывает временну́ю зависимость средней интенсивности свечения из области  $40 \times 40$  пикселов изображения ночного неба (белый квадрат на рис. 36, c). Синяя линия отображает динамику средней интенсивности вариаций ПЭС из области на карте ПЭС, эквивалентной области  $40 \times 40$  пикселов изображения ночного неба (белый квадрат на рис. 3a, 6). Стрелками отмечены моменты времени регистрации карт вариаций ПЭС и снимков ночного неба, показанных на рис. 3.

### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе анализа поведения кривых средней интенсивности вариаций ПЭС dI и средней яркости стимулированного свечения ионосферы b в линии 630 нм в интервале 18:58 UT÷19:49 UT 29.08.2016, представленных на рис. 4, можно выделить следующие особенности: 1) большинство максимумов средней интенсивности вариаций ПЭС (синяя линия) зарегистрировано в первые 30 с после включения мощных передатчиков (19:07:30 UT; 19:13:00 UT; 19:19:00 UT; 19:25:30 UT; 19:31:30 UT); 2) положение максимумов средней интенсивности вариаций пЭС в большинстве случаев соответствует минимумам средней яркости свечения (красная линия); 3) положение максимумов средней яркости свечения в линии 630 нм соответствует положению минимумов средней интенсивности вариаций ПЭС (19:09:30 UT; 19:16:00 UT; 19:22:00 UT; 19:28:00 UT; 19:34:00 UT; 19:39:30 UT); 4) максимальное значение средней яркости стимулированного свечения ионосферы (19:33:30 UT) равно 10,3 Рл, а минимум средней интенсивности вариаций ПЭС равен -0,06 TECU (19:22:00 UT).

В целом поведение кривой средней интенсивности вариаций ПЭС на рис. 4 можно описать как плавное уменьшение интенсивности вариаций ПЭС в такт с включением волны накачки и возрастание в паузе. Средняя яркость свечения в линии 630 нм на рис. 4 практически линейно увеличивается в первые 90÷110 с после включения волны накачки с дальнейшим выходом на плато

и быстро релаксирует в паузе между циклами накачки. Относительно быстрый спад яркости свечения после отключения волны накачки может быть объяснён тем, что фактическое время жизни уровня  $O(^{1}D)$  на высоте области свечения определяется временем дезактивации возбуждённого атома при его столкновениях с другими атомами и равно примерно 35 с [38]. Плавный рост яркости в течение примерно 100 с после включения волны накачки стенда «Сура», скорее всего, связан с самофокусировочной неустойчивостью, характерное время развития которой составляет также примерно 100 с. В течение этого времени формируется полость с пониженной электронной концентрацией и одновременно нарастает плотность потока высокочастотной мощности и потока сверхтепловых электронов, ускоренных плазменной турбулентностью в этой полости [38].

Общее поведение кривой средней яркости свечения в линии 630 нм, представленной на рис. 4, согласуется с ранее проведёнными оптическими и фотометрическими измерениями в данной линии на стенде «Сура» [33–38]. Среднее значение зарегистрированной поверхностной яркости области свечения (по полю 40 × 40 пикселов или 2 × 2°) в эксперименте 29.08.2016 не превышало 12 Рл, что несколько ниже, чем в экспериментах 2004 [33], 2010 [34, 35, 38], 2012 [36] и 2014 [37] годов, и, по всей видимости, связано с проведением наблюдений близко к минимуму 24-го цикла солнечной активности.

Необходимо заметить, что в большей части периода регистрации свечения 18:58 UT÷19:49 UT значение параметра  $\Delta f = f_{0F_2} - f_0$  (синяя сплошная линия на рис. 2) превышало 0,45 МГц, что согласно [38] является необходимым условием для преобладания усиления яркости свечения (ударный механизм возбуждения) над модуляцией фонового свечения, обусловленной омическим нагревом. Уже в следующем после последнего представленного на рис. 4 цикле излучения волны накачки (19:49 UT÷19:52 UT) усиления яркости свечения в линии 630 нм не происходит.

Для оценки величины изменений электронной концентрации  $\Delta N_{\rm e}$  в области свечения, вызванных воздействием на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура» (см. рис. 3), воспользуемся следующим эмпирическим соотношением, полученным исходя из простых физических рассуждений:

$$\frac{\Delta N_{\rm e}}{N_{\rm e}} = \frac{\mathrm{d}I/\Delta h}{N_{\rm e}}.\tag{3}$$

Здесь  $N_{\rm e}$  — электронная концентрация в максимуме слоя  $F_2$  (высота максимума электронной концентрации  $h_{\rm max}F_2$  в период регистрации свечения 18:58 UT÷19:49 UT 29.08.2016 представлена зелёными маркерами на рис. 2), dI — средняя интенсивность вариаций вертикального ПЭС (синяя линия на рис. 4) в единицах ТЕСИ из области на карте ПЭС, эквивалентной области 40 × 40 пикселов пятна свечения (белый квадрат на рис. 3*a*, *b*),  $\Delta h$  — полутолщина слоя  $F_2$ . Исходя из наших оценок, выполненных на основе анализа ионограмм CADI, средняя величина  $\Delta h$  составила около 50 км.

Оценим  $\Delta N_{\rm e}/N_{\rm e}$  для трёх циклов излучения волны накачки: 1) 19:16 UT÷19:22 UT; 2) 19:22 UT÷19:28 UT; 3) 19:28 UT÷19:34 UT. Вариации ПЭС, соответствующие рассматриваемым циклам: 1) dI  $\approx 0,062$  TECU; 2) dI  $\approx 0,126$  TECU; 3) dI  $\approx 0,062$  TECU. Подставляя полученные значения  $N_{\rm e}$  и dI в соотношение (3), получаем следующие значения: для первого цикла (19:16 UT÷19:22 UT)  $\Delta N_{\rm e}/N_{\rm e} \approx 4,2\%$ , для второго цикла (19:22 UT÷19:28 UT)  $\Delta N_{\rm e}/N_{\rm e} \approx$  $\approx 8,8\%$ , для третьего цикла (19:28 UT÷19:34 UT)  $\Delta N_{\rm e}/N_{\rm e} \approx 4,2\%$ . Таким образом, уменьшение электронной концентрации в области свечения в период его регистрации в данном эксперименте варьируется в диапазоне 4÷9%. Приведённые оценки  $\Delta N_{\rm e}/N_{\rm e}$  в целом согласуются с оценками  $\Delta N_{\rm e}/N_{\rm e}$ , полученными ранее в экспериментах на стенде «Сура» в условиях ночной ионосферы [5, 8, 9, 38].

Необходимо отметить, что поведение кривой средней интенсивности вариаций ПЭС, представленной на рис. 4, слабо зависит от выбора высоты привязки ионосферной точки h<sub>IPP</sub> в диапазоне

Д. А. Когогин, И. А. Насыров, А. В. Шиндин и др.

99

высот 250÷320 км для пространственной области, ограниченной пределами поля зрения ПЗСкамеры ( $20^{\circ} \times 15^{\circ}$ ), т к. лучи спутник—приёмник, секущие данную область непосредственно в период регистрации свечения, имеют высокие углы места ( $\theta_{\rm s} \ge 70^{\circ}$ ). Из этого следует и сохранение общей пространственной структуры карт вариаций ПЭС, представленных на рис. 3*a*, *b*.

На рис. 3 показаны две пары карт вариаций ПЭС (a, e) и изображений ночного неба (f, e), наблюдаемых в эксперименте. Из рис. 3e, e хорошо видно, что область минимума яркости свечения, зарегистрированная в 19:25:00 UT, пространственно соответствует области максимума вариаций ПЭС, полученной за интервал 19:25:00 UT÷19:31:00 UT. На рис. 3a, f наблюдается противоположная картина: область максимума яркости свечения на изображении ночного неба (19:22:00 UT) пространственно локализована в области минимума вариаций ПЭС на карте ПЭС (19:22:00÷19:28:00 UT). Данную динамику можно также хорошо проследить по рис. 4, где стрелками отмечены моменты времени регистрации карт вариаций ПЭС и изображений ночного неба, показанных на рис. 3.

Из общего анализа взаимного пространственно-временно́го положения 94 синхронных пар карт вариаций ПЭС и изображений ночного неба с выделенной областью свечения, зарегистрированных в интервале 18:58÷19:49 UT 29.08.2016, можно сделать следующие основные выводы. Область  $40 \times 40$  пикселов с центром в пикселе с максимальной интенсивностью в пятне свечения пространственно локализована в области минимума интенсивности вариаций ПЭС (рис. 3a,  $\delta$ ), в то время как область максимума интенсивности вариаций ПЭС соответствует области минимума яркости пятна свечения, наблюдаемого в паузах излучения волны накачки (рис. 3e, e).

Данные выводы хорошо согласуются и дополняют ранее полученные результаты [41, 42] одновременных измерений наклонного ПЭС и интенсивности свечения в линии 630 нм на одиночном луче зрения навигационный спутник—ГНСС приёмник (Васильсурск), пересекающем поле зрения ПЗС-камеры в момент работы мощных передатчиков стенда «Сура». В данных экспериментах было установлено, что положение пятна свечения в максимуме интенсивности при прохождении траектории луча зрения спутник—приёмник через его центр соответствовало минимальным значениям ПЭС, т. е. свечение генерировалось в области пониженной электронной концентрации, и именно в этой области популяция энергичных электронов, ускоренных плазменными волнами до потенциала возбуждения оптических уровней, оказывалась наиболее интенсивной. Здесь необходимо сделать замечание, что результаты, представленные в работах [41, 42], были получены при пролёте одиночного навигационного спутника через главный лепесток диаграммы направленности стенда «Сура» во время проведения оптических измерений, что является редким событием.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы данные, полученные в эксперименте на стенде «Сура», проведённом 29.08.2016 в спокойных геомагнитных условиях при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением. Особенностью данного эксперимента является то, что при его выполнении имелась возможность синхронной регистрации как изображений стимулированного свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода ( $\lambda = 630$  нм), так и карт вариаций ПЭС по данным сети из тридцати станций ГНСС, расположенных в радиусе около 700 км от стенда «Сура» в основном в северо-восточном, восточном и юго-восточном направлениях.

Данное обстоятельство позволило построить детализированные карты вариаций ПЭС в области ионосферы, возмущённой мощным радиоизлучением, с интервалом в 30 с и провести прямое пространственно-временно́е сопоставление между вариациями свечения в линии 630 нм и ПЭС, стимулированными работой стенда «Сура». В результате проведённого анализа была получена динамическая картина распределения интенсивности вариаций ПЭС в той области ионосферы,

где происходит генерация плазменных волн, способных ускорить электроны до потенциала возбуждения оптических уровней, и определено поведение электронной концентрации в области генерации стимулированного свечения ионосферы.

На основе анализа пространственного положения и поведения во времени пятен свечения на изображениях ночного неба и соответствующей им области на картах вариаций ПЭС был сделан вывод о том, что область максимальной яркости пятна свечения пространственно локализована в области минимума интенсивности вариаций ПЭС и наоборот — область максимума интенсивности вариаций ПЭС и наоборот стимулированного свечения.

Полученные оценки формирующейся после включения волны накачки стенда «Сура» полости с пониженной электронной концентрацией в области генерации свечения варьируются в диапазоне  $\Delta N_{\rm e}/N_{\rm e} \approx 4 \div 9 \%$ . Именно в этой полости происходит одновременное нарастание плотности потока высокочастотной мощности и потока сверхтепловых электронов, ускоренных плазменной турбулентностью [38].

Подробно описанная в данной работе методика проведения эксперимента снимает ограничения, связанные с необходимостью пролёта навигационного спутника непосредственно над диаграммой направленности стенда «Сура», что существенно увеличивает шансы успешного проведения синхронных измерений вариаций ПЭС и интенсивности стимулированного свечения ионосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (постановка задачи, обработка данных ГНСС, построение карт вариаций ПЭС и визуализация результатов (проект 19–72– 00072); проведение экспериментов, предварительный анализ и обработка изображений ночного неба (проект 14–12–00706)). Подготовка текста публикации выполнена при поддержке РФФИ (проект 20–32–70198).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гуревич А.В. // Успехи физ. наук. 2007. Т.177, № 11. С. 1145–1177. https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200711a.1145
- 2. Грач С. М., Сергеев Е. Н., Мишин Е. В., Шиндин А. В. // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186, № 11. С. 1189–1228. https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.07.037868
- 3. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2017. 468 с.
- Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Gurevich A. V., et al. // Phys. Lett. A. 2004. V. 325, No. 5–6. P. 381–388. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2004.03.055
- Терещенко Е. Д., Миличенко А. Н., Фролов В. Л., Юрик Р. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 934–938.
- Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 7. С. 421–444.
- Рябов А. В., Грач С. М., Шиндин А. В., Котик Д. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 7. С. 485–496.
- Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Vasiliev A. E., et al. // Adv. Space Res. 2011. V. 47, No. 10. P. 1743–1749. https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.03.031
- Kunitsyn V. E., Vasilieva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47, No. 3. Art. no. RS0L15. https://doi.org/10.1029/2011RS004957
- Фролов В. Л., Болотин И. А., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 6. С. 393–420.

- Фролов В. Л., Болотин И. А., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 6. С. 437–463.
- Nasyrov I. A., Kogogin D. A., Shindin A. V., et al. // Adv. Space Res. 2016. V. 47, No. 4. P. 1015– 1020. https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.12.008
- Когогин Д. А., Насыров И. А., Грач С. М. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 1. C. 100-115. https://doi.org/10.7868/S0016794017010059
- Milikh G., Gurevich A., Zybin K., Secan J. // Geophys. Res. Lett. 2008. V.35, No. 22. Art. no. L22102. https://doi.org/10.1029/2008GL035527
- Milikh G. M., Papadopoulos K., Shroff H., et al. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35, No. 17. Art. no. L17104. https://doi.org/10.1029/2008GL034630
- Pradipta R., Lee M. C., Cohen J. A., Watkins B. J. // Earth Moon Planets. 2015. V. 116, No. 1. P. 67–78. https://doi.org/10.1007/s11038-015-9461-2
- Najmi A., Milikh G., Secan J., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119, No. 7. P. 6000–6010. https://doi.org/10.1002/2014JA020038
- Najmi A., Milikh G., Yampolski Y. M., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120, No. 8. P. 6646–6660. https://doi.org/10.1002/2015JA021341
- Saito A., Fukao S., Miyazaki S. // Geophys. Res. Lett. 1998. V.25, No. 16. P.3079–3082. https://doi.org/10.1029/98GL52361
- 20. Bust G.S., Mitchell C.N. // Rev. Geophys. 2008. V.46, No. 1. Art. no. RG1003. https://doi.org/10.1029/2006RG000212
- 21. Afraimovich E. L., Edemskiy I. K., Voeykov S. V., et al. // Ann. Geophys. 2009. V. 27, No. 4. P. 1521–1525. https://doi.org/10.5194/angeo-27-1521-2009
- 22. Tsugawa T., Otsuka Y., Coster A. J., Saito A. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34, No. 22. Art. no. L22101. https://doi.org/10.1029/2007GL031663
- 23. Tsugawa T., Nishioka M., Ishii M., et al. // J. Disaster Res. 2018. V.13, No. 3. P.535–545. https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0535
- 24. Куницын В. Е., Крысанов Б. Ю., Воронцов А. М. // ВМУ. Серия 3. Физика. астрономия. 2015. № 6. С. 112–119.
- Perevalova N. P., Shestakov N. V., Voeykov S. V., et al. // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42, No. 16. P. 6 535–6 543. https://doi.org/10.1002/2015GL064792
- 26. Sherstyukov R. O., Akchurin A. D., Sherstyukov O. N. // Adv. Space Res. 2018. V. 61, No. 7. P. 1717–1725. https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.11.026
- 27. Chou M.-Y., Shen M.-H., Lin C. C. H., et al. // Space Weather. 2018. V. 16, No. 2. P. 172–184. https://doi.org/10.1002/2017SW001738
- 28. Мак-Ивен М., Филлипс Л. Химия атмосферы. М. : Мир, 1978. 375 с.
- Bernhardt P. A., Tepley C. A., Duncan L. M. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94, No. A7. P. 9071– 9092. https://doi.org/10.1029/JA094iA07p09071
- Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et. al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2003. V. 108, No. A4. P. 1 141. https://doi.org/10.1029/2002JA009543
- Djuth F. T., Pedersen T. R., Gerken E. A., et al. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94, No. 12. Art. no. 125001. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.125001
- Kosch M. J., Pedersen T., Mishin E., et al. // J. Geophys. Res. 2007. V.112, No. A8. Art. no. A08304. https://doi.org/10.1029/2007JA012264
- Grach S. M., Kosch M. J., Yashnov V. A., et al. // Ann. Geophys. 2007. V. 25, No. 3. P. 689–700. https://doi.org/10.5194/angeo-25-689-2007
- 34. Грач С. М., Клименко В. В., Шиндин А. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 36–56.

- Шиндин А. В., Грач С. М., Сергеев Е. Н., Рябов А. В. // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2012. № 4(1). С. 105–113.
- Шиндин А. В., Грач С. М., Клименко В. В., Насыров И. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 11. С. 849–864.
- Шиндин А. В., Клименко В. В., Когогин Д. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 11. С. 949–966.
- 38. Клименко В. В., Грач С. М., Сергеев Е. Н., Шиндин А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 6. С. 481–501.
- Grach S. M., Sergeev E. N., Nasyrov A. M., et al. // Adv. Space Res. 2004. V. 34. No. 11. P. 2422– 2427. https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.08.070
- Grach S. M., Sergeev E. N., Komrakov G. P., et. al. // Proc. SPIE The International Society for Optical Engineering. 2006. V. 6522. Art. no. 652226. https://doi.org/10.1117/12.723280
- 41. Grach S. M., Nasyrov I. A., Kogogin D. A., et al. // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. No. 23. P. 12749–12756. https://doi.org/10.1029/2018GL080571
- 42. Грач С. М., Насыров И. А., Когогин Д. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 3. С. 181–197.
- 43. Kogogin D., Nasyrov I., Shindin A., et al. // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), 1–6 July 2019, Kazan, Russia. P. 300–303. https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810188
- 44. Gulyaeva T. L., Stanislawska I. // Ann. Geophys. 2008. V. 26, No. 9. P. 2645–2648. https://doi.org/10.5194/angeo-26-2645-2008
- 45. http://www.sil.sk.ca/content/cadi
- 46. Ясюкевич Ю.В., Едемский И.К., Перевалова Н.П., Полякова А.С. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. 271 с.
- 47. Lilenstena J., Blellyb P.L. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2002. V.64, No. 7. P.775–793. https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00079-2
- Shpynev B.G., Khabituev D.S. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2014. V.119. P.223–228. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.01.007
- Cherniak I. V., Zakharenkova I. E., Krankowski A., Shagimuratov I. I. // 2014 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), 16–23 August 2014. Beijing, China. P. 1–2. https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929782
- Klobuchar J. A. // IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems. V. AES-23, No. 3. P. 325–331. https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829
- Maletckii B. M., Yasyukevich Y. V., Vesnin A. M. // Remote Sens. 2020. V. 12, No. 8. P. 1 340. https://doi.org/10.3390/rs12081340

Поступила в редакцию 30 декабря 2019 г.; принята в печать 26 февраля 2020 г.

## DYNAMIC CHANGES OF THE IONOSPHERIC ARTIFICIAL AIRGLOW REGION CAUSED BY POWERFUL RADIO EMISSION BASED ON A JOINT ANALYSIS OF NIGHT-SKY SNAPSHOTS IN THE 630 NM LINE AND TOTAL ELECTRON CONTENT VARIATION MAPS

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

We describe a method for joint analysis of the night-sky snapshots and total electron content (TEC) variation maps and present a dynamic spatiotemporal configuration of the TEC variation intensity in the ionospheric airglow region in the red line of atomic oxygen ( $\lambda = 630$  nm) stimulated by high-power radio waves from the SURA facility. The measurements were performed on the 29th of August, 2016. Two-dimensional TEC variationmaps were plotted according to a network of 30 GNSS stations located within a radius of 700 km from the SURA heater. It is shown that the region of the maximum brightness of the artificial ionospheric airglow spot is spatially localized in the region of the minimum intensity of TEC variations, while the region of the maximum intensity of TEC variations corresponds to the region of the minimum brightness of the artificial airglow spot. Quantitative estimates for a cavity with reduced electron density in the artificial airglow region, which forms after the Sura pump wave is switched on, vary in the range  $\Delta N_e/N_e \approx 4-9\%$ , where  $N_e$  is the electron density and  $\Delta N_e$  is its variation in the cavity. The proposed experimental technique removes the limitations associated with the need for a navigation satellite to flyby directly over the main lobe of the Sura antenna pattern, which significantly increases the chances of successful simultaneous measurements of TEC variations and artificial ionospheric airglow in the 630 nm line.