

Исследование возмущенной мощным радиоизлучением УНУ стенд СУРА области ионосферы по данным совместного анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций полного электронного содержания в экспериментах 2021-2023 гг

Д.А. Когогин¹, В.В. Емельянов¹, Д.С. Максимов¹, И.А. Насыров¹, А.Б. Белецкий², А.В. Шиндин³, С.М. Грач³, Р.В. Загреддинов¹

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, ул. Кремлевская, 18
E-mail: denis.kogogin@gmail.com

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23

В работе представлены результаты совместного анализа данных снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций полного электронного содержания, полученных в экспериментах на уникальной научной установке стенд СУРА в 2021-2023 гг. Получены зависимости вариаций интенсивности пятен искусственного свечения ионосферы и соответствующих им вариаций полного электронного содержания в периоды воздействия на ионосферу мощного радиоизлучения. Выявлены временные изменения нейтральной и электронной компонент ионосферной плазмы в пределах цикла воздействия с использованием метода наложения эпох. Ключевые слова: ионосфера, искусственное свечение, оптика, 630 нм, полное электронное содержание, стенд СУРА.

The research of the ionosphere region disturbed by powerful radio emission from the Sura facility, based on data from a combined analysis of nighttime sky images in the 630 nm line and maps of total electron content variability from experiments conducted in 2021 and 2022

D.A. Kogogin¹, V.V. Emelyanov¹, D.S. Maksimov¹, I.A. Nasyrov¹, A.B. Beletsky², A.V. Shindin³, S.M. Grach³, R.V. Zagretdinov¹

¹ Kazan Federal University

² Institute of Solar-Terrestrial Physics

³ National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

The results of a joint analysis of data from the night sky images in the 630 nm line and maps of the total electron content variations obtained in experiments at the Sura facility 2021-2023 are presented. The dependences of variations in the intensity of artificial ionospheric glow spots and corresponding total electron content variations as a result of exposure to the ionosphere of powerful radio emission are obtained. Temporary changes in the neutral and electronic components of the perturbed region within the exposure cycle using the superposed epoch analyses have been revealed. Keywords: ionosphere, artificial glow, optic, 630 nm, total electron content, Sura facility.

Введение

В 2021-2023 гг. на Уникальной научной установке (УНУ) «Многофункциональный комплекс для исследования околоземного и космического пространства (Стенд СУРА, рег. № 06-30)», расположенной на территории экспериментально-опытной базы ННГУ «Васильсурск» в 140 км от г. Нижний Новгород (56.15 с.ш., 46.10 в.д.) были проведены эксперименты по исследованию крупномасштабной структуры возмущённой мощным

радиоизлучением УНУ стенд СУРА области ионосферы, с помощью измерения искусственного свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода ($\lambda=630$ нм), связанного с переходом электронов с уровня $O(^1D)$ в основное состояние $O(^3P)$. Воздействие на ионосферу осуществлялось радиоволной O-поляризации в режиме с периодом 6 минут: 2.5 минуты – излучение, 3.5 минуты – пауза, частота волны накачки в экспериментах менялась от 4300 кГц до 5828 кГц в зависимости от состояния ионосферы. При проведении экспериментов использовались два варианта ориентации диаграммы направленности стенда: излучение волны накачки вертикально вверх (В) и при наклоне диаграммы направленности на 12° от зенита на юг в плоскости магнитного меридиана т.е. в направлении «магнитного зенита» (МЗ) [1].

Регистрация снимков ночного неба в линии 630 нм осуществлялась с использованием ПЗС-камеры с объективом типа «рыбий глаз», полем зрения 145° и светофильтром на длину волны 630 нм. Размер изображения камеры составляет 2048×2048 пикселей, но для увеличения соотношения сигнал/шум дополнительно производилось объединение пикселей 4×4 , в результате изображения ночного неба имели размеры 512×512 пикселей. Оптическая система была установлена в 170 км к востоку от УНУ стенд СУРА на территории магнитной обсерватории КФУ (55.56 с. ш., 48.45 в. д.) [2]. Регистрация изображений производилась синхронно с режимом работы стенда каждые 30 секунд с экспозицией 25 секунд. ГНСС данные, используемые для расчёта вариаций полного электронного содержания, получены из файлов RINEX от наземных ГНСС приемников, расположенных в окрестности УНУ стенд СУРА.

Методика обработки данных

За период 2021-2023 гг. было проведено более двадцати экспериментальных дней по изучению оптических эффектов, стимулированных воздействием мощного радиоизлучения УНУ стенд СУРА на ионосферу. Для проведения совместного анализа интенсивности свечения и вариаций полного электронного содержания было выбрано 11 экспериментальных дней, когда удалось уверенно наблюдать эффект усиления яркости фонового свечения в линии 630 нм на интервале более чем пяти циклов.

Для выделения областей свечения на снимках ночного неба использовалась методика, описанная в работе [3]. Дополнительно в данную методику были добавлены такие этапы как удаление тренда для уменьшения фонового свечения, связанного с заходом солнца и компенсация неравномерности регистрации света матрицей камеры. Далее был осуществлен переход от координат пикселей изображения к географическим координатам, т.е. строились проекции снимков на поверхность Земли. Для этого была применена методика, аналогичная изложенной в статье [4], которая так же была дополнена некоторыми этапами. Таким образом были получены снимки ночного неба в географических координатах с выделенными на них областями оптического свечения ионосферы.

На следующем этапе обработки каждому полученному снимку ставилась в соответствие карта вариаций полного электронного содержания (ПЭС). Значения ПЭС рассчитывались по данным радиозондирования ионосферы сигналами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), записанным на распределенной сети наземных приемных станций. Для каждого луча спутник-приемник ограниченного углом места более 30 градусов с периодом 30 с рассчитывались значения наклонного ПЭС, из которых вычитался полином шестой степени с целью удаления тренда связанного с движением спутника [5,6]. На следующем этапе каждому наклонному значению ПЭС сопоставлялись координаты подионосферной точки для заданной высоты, соответствующей высоте центра области свечения. Далее наклонные значения ПЭС пересчитывались в вертикальные, после чего из полученного ряда данных ПЭС методом

скользящего среднего с окном 6 минут были отфильтрованы вариации, соответствующие периоду воздействия на ионосферу, равному одному циклу излучения волны накачки. Таким образом был получен набор неравномерно распределенных точек на географической плоскости. На заключительном этапе для получения непрерывного изображения карт вариаций ПЭС проводилась интерполяция данного набора точек бигармоническими сплайнами.

Результаты

В результате применения описанной выше методики обработки данных были получены пары изображений (портрет ночного неба с выделенной областью свечения и карта вариаций ПЭС) одной и той же области пространства за один и тот же интервал времени (рис.1).

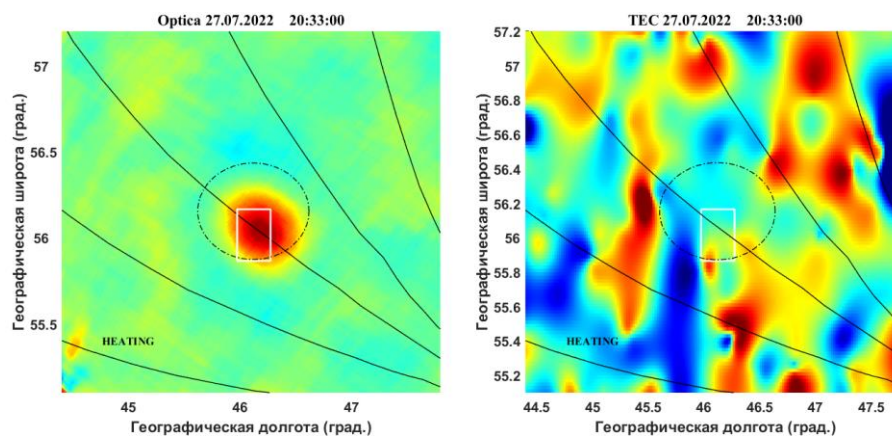


Рис. 1. Снимок ночного неба с выделенной областью свечения (слева) и соответствующая ему карта ПЭС (справа) в проекции на географические координаты. Сплошными линиями показаны проекции линий магнитного поля, черный круг – проекция диаграммы направленности стэнда СУРА.

Такие пары изображений были построены для всех 11 дней, когда наблюдался эффект усиления яркости фонового свечения ионосферы. По полученным изображениям были построены графики зависимости интенсивности искусственного свечения и вариаций ПЭС от времени (рис.2). Значения интенсивностей рассчитывалось по площадке 0.3×0.3 градуса (белый прямоугольник на рис. 1) с центром, соответствующим максимуму области свечения. Для расчета интенсивности вариаций ПЭС выбиралась площадка того же размера и пространственного положения на ПЭС карте. По полученным зависимостям наблюдается явное периодическое изменение интенсивности свечения ионосферы, коррелированное с режимом воздействия. Но для вариаций ПЭС такой однозначной зависимости не наблюдается. Для выявления общих закономерностей был использован метод наложения эпох. Метод был использован как для вариаций интенсивности искусственного свечения, так и для вариаций ПЭС.

Для реализации метода весь имеющийся набор данных разбивался на шестиминутные циклы, соответствующие режиму излучения волны накачки. Причем выбирались только те циклы, когда эффект усиления яркости свечения был явно выражен. Всего удалось выделить 167 таких циклов за все 11 экспериментальных дней 2021- 2023 гг. На рис. 3 показаны результаты применения метода наложения эпох для данных интенсивности искусственного свечения и вариаций ПЭС на всей выборке. Поведение кривой интенсивности искусственного свечения (красная линия на рис.3) можно описать как близкое к линейному увеличению в первые 2 минуты излучения волны накачки с дальнейшим выходом на плато до конца интервала излучения и далее

более плавное возвращение к фоновому уровню в паузу. Общее поведение кривой интенсивности свечения в линии 630 нм, представленной на рис.3, согласуется с ранее проведёнными оптическими и фотометрическими измерениями в данной линии на УНУ стенд СУРА [7]. Поведение кривой интенсивности вариаций ПЭС (синяя линия на рис.3) можно описать как, плавный рост в течение первых 40 сек, и далее плавное уменьшение до уровня ниже фонового в следующие 3.5 минуты с последующим восстановлением к фоновому уровню ближе к началу нового цикла.

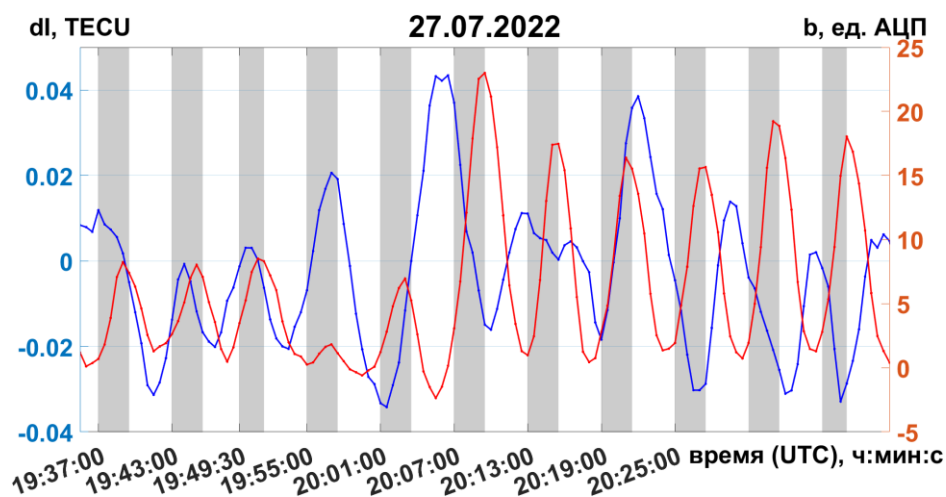


Рис. 2. Зависимость интенсивности искусственного свечения (красная линия) и вариаций ПЭС (синяя линия) от времени. Серыми прямоугольниками показаны интервалы включения воздействия на ионосферу.

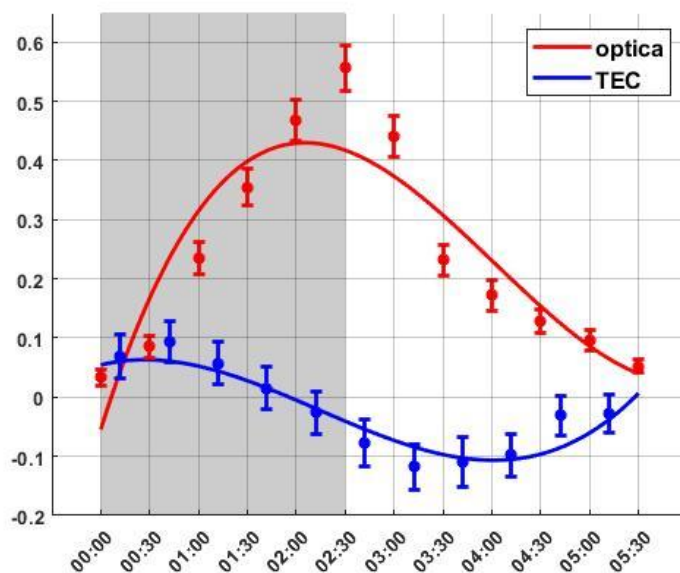


Рис. 3. Изменения интенсивности искусственного свечения (красная линия) и интенсивности вариаций ПЭС (синяя линия) в пределах одного цикла воздействия на ионосферу

Аналогичные зависимости построены так же для всех 11 дней по отдельности. В целом можно сказать, что зависимости выглядят морфологически схожим образом и для вариаций интенсивности свечения, и для вариаций ПЭС.

Заключение

В работе проведен совместный анализ снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций ПЭС в экспериментах по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением УНУ стенд СУРА, проведенных в 2021-2023 гг. Построены зависимости вариаций нейтральной (искусственное свечение в линии 630 нм) и заряженной (вариации ПЭС) компонент ионосферной плазмы. Выявлены их временные изменения в пределах цикла излучения волны накачки. Получено, что интенсивность искусственного свечения линейно растёт после начала излучения волны накачки с последующим выходом на плато после 2-х минут излучения и плавно возвращается к фоновому уровню в паузу. Вариации ПЭС в свою очередь достигают максимального значения примерно после 40 сек с момента начала излучения волны накачки и далее плавно в течение 3.5 минут спадают до минимума, после чего возвращаются к фоновому уровню к концу цикла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10029. Эксперименты на УНУ стенд СУРА были проведены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-12-00197. Обработка снимков ночного неба в линии 630 нм выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-27-00323.

Литература

1. Грач С. М., Клименко В. В., Шиндин А. В. и др. Оптическое свечение при воздействии на ионосферу радиоизлучением стенда «Сура»: результаты экспериментов 2010 года // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 36.
2. Насыров И.А., Когогин Д.А., Шиндин А.В. и др. 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.
3. Шиндин А.В., Клименко В.В., Когогин Д.А. и др. Пространственные характеристики области генерации искусственного свечения ионосферы в линии 630 нм при воздействии радиоизлучением стенда «Сура» // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 11. С. 949-966.
4. Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. Географическая привязка кадров широкоугольных оптических систем // Журнал технической физики. 2021. Т. 91, № 12 С. 1990-1996.
5. Когогин Д.А., Насыров И.А., Шиндин А.В. и др. 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 // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 2. С. 89-104.
6. Maletckii V.M., Yasyukevich Y.V., Vesnin A. M. Wave Signatures in Total Electron Content Variations: Filtering Problems // Remote Sensing. 2020. V. 12, No. 8. P. 1340.
7. 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 стенда «Сура» // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 6. С. 481–501.