

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕННОЙ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА СНИМКОВ НОЧНОГО НЕБА И ДВУМЕРНЫХ КАРТ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

¹В.В. Емельянов, ¹Д.А. Когогин, ¹Д.С. Максимов, ¹И.А. Насыров, ³А.Б. Белецкий, ²А.В. Шиндин, ²С.М. Грач, ¹Р.В. Загреддинов

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
evv960722@gmail.com

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

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

STUDYING THE IONOSPHERE REGION DISTURBED BY POWERFUL RADIATION, BASED ON JOINT ANALYSIS OF NIGHT-SKY IMAGES AND 2D MAPS OF TEC VARIATIONS

¹V.V. Emelyanov, ¹D.A. Kogogin, ¹D.S. Maksimov, ¹I.A. Nasyrov, ³A.B. Beletsky, ²A.V. Shindin, ²S.M. Grach, ¹R.V. Zagretdinov

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia
evv960722@gmail.com

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

³Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. В работе проведено исследование области ионосферы, возмущенной мощным радиоизлучением стенда «Сура» в экспериментах 2021 г. на основе совместного анализа вариаций оптических эффектов и вариаций карт полного электронного содержания. Показано, что области стимулированного свечения ионосферы, так же как и области подавления фонового свечения, сопровождаются уменьшением значений полного электронного содержания (ПЭС).

Ключевые слова: ионосфера, искусственное свечение, 630 нм, ГНСС, ПЭС, карты ПЭС, стенд «Сура».

Abstract. We carried out an investigation of the ionosphere region disturbed by the powerful radio emission of the “Sura” facility in the experiments of 2021, based on a joint analysis of variations in optical effects and in total electron content maps. It is shown that the areas of stimulated ionospheric airglow, as well as the areas of background airglow suppression, are accompanied by a decrease in values of the total electron content.

Keywords: ionosphere, induced airglow, 630 nm, GNSS, TEC, TEC maps, “Sura” facility.

ВВЕДЕНИЕ

В августе–сентябре 2021 г. на стенде «Сура» было проведено шесть экспериментальных серий по изучению оптических эффектов, происходящих в ионосфере в результате воздействия на нее мощной радиоволны стенда «Сура», расположенного в лаборатории НИРФИ «Васильсурск» (56.15° N, 46.10° E) Нижегородской области [Шиндин, 2017]. Воздействие на ионосферу во всех сеансах осуществлялось радиоволной на частоте 4.3 МГц в импульсном режиме с периодом 6 минут: 2.5 мин — излучение, 3.5 мин — пауза.

Регистрация оптических эффектов производилась с использованием ПЗС-камер, расположенных в двух пространственно-разнесенных пунктах наблюдения. Один пункт расположен в непосредственной близости (~850 м) от антенной системы стенда «Сура», другой — на расстоянии ~170 км к востоку на территории магнитной обсерватории КФУ (55.56° N, 48.45° E) [Насыров, 2021]. На обеих камерах были установлены светофильтры на длину волны 630 нм. Регистрация изображений производилась в периодическом режиме с периодом 30 с и экспозицией 25 с.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для выделения оптических эффектов на снимках ночного неба использовалась методика, подробно описанная в работе [Шиндин и др., 2017]. Дополнительно данная методика была усовершенствована

путем добавления нескольких этапов обработки: 1) удаление тренда, связанного с уменьшением фонового свечения при заходе Солнца; 2) компенсация неравномерности регистрации света матрицей ПЗС-камеры. Это позволило значительно улучшить качество получаемых изображений. Следующим этапом была реализована привязка пикселей изображения к географическим координатам. Для этого использовалась методика, аналогичная изложенной в статье [Сыренова и др., 2021] с некоторыми дополнениями и изменениями.

По результатам обработки портретов ночного неба в экспериментах 2021 г. можно считать все шесть экспериментальных дней (5, 10, 11 августа; 3, 5, 6 сентября 2021 г.) удачными, поскольку оптические эффекты удалось выделить на изображениях, соответствующих всем экспериментальным дням. Примечательно, что, помимо привычного для такого рода экспериментов оптического свечения, имеется также ряд дней, когда наблюдался противоположный эффект, а именно, подавление фонового свечения ионосферы. Области подавления так же, как и области свечения возникают на высоте от 250 до 300 км, однако размер областей подавления примерно в два раза превышает размер областей свечения. Особого внимания заслуживает эксперимент 6 сентября, когда диаграмма направленности стенда «Сура» была ориентирована в магнитный зенит (наклон на 12° к югу от вертикали). В этом случае эффекты свечения и подавления наблюдаются одновременно.

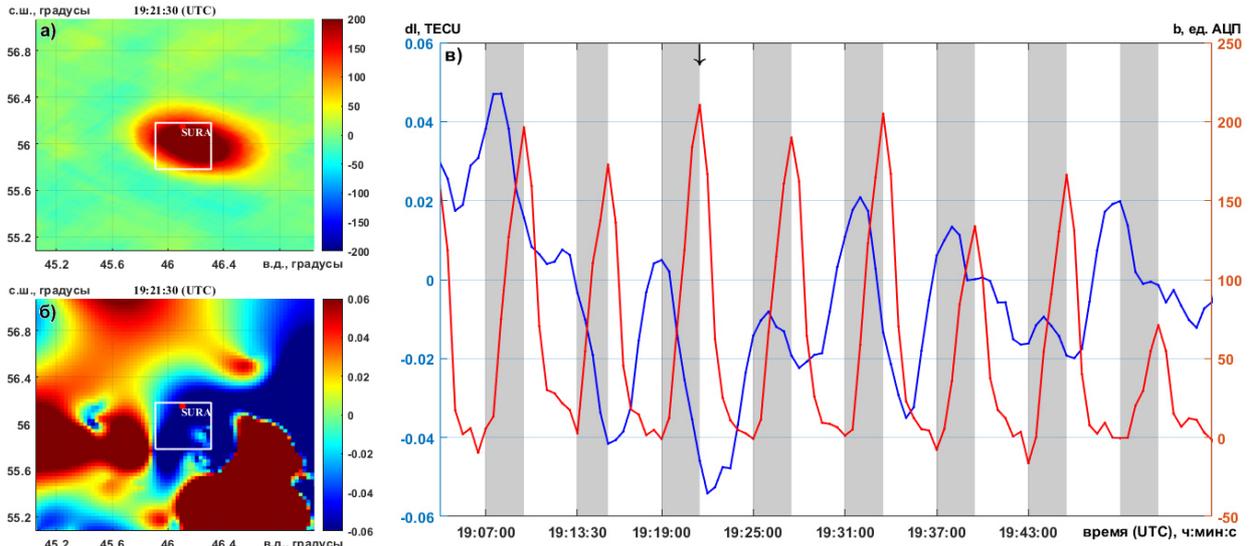


Рис. 1. Область оптического свечения (а), карта вариаций ПЭС (б) и зависимость вариаций интенсивности свечения возмущенной области ионосферы и вариаций ПЭС от времени (в) для эксперимента 5 августа 2021 г.

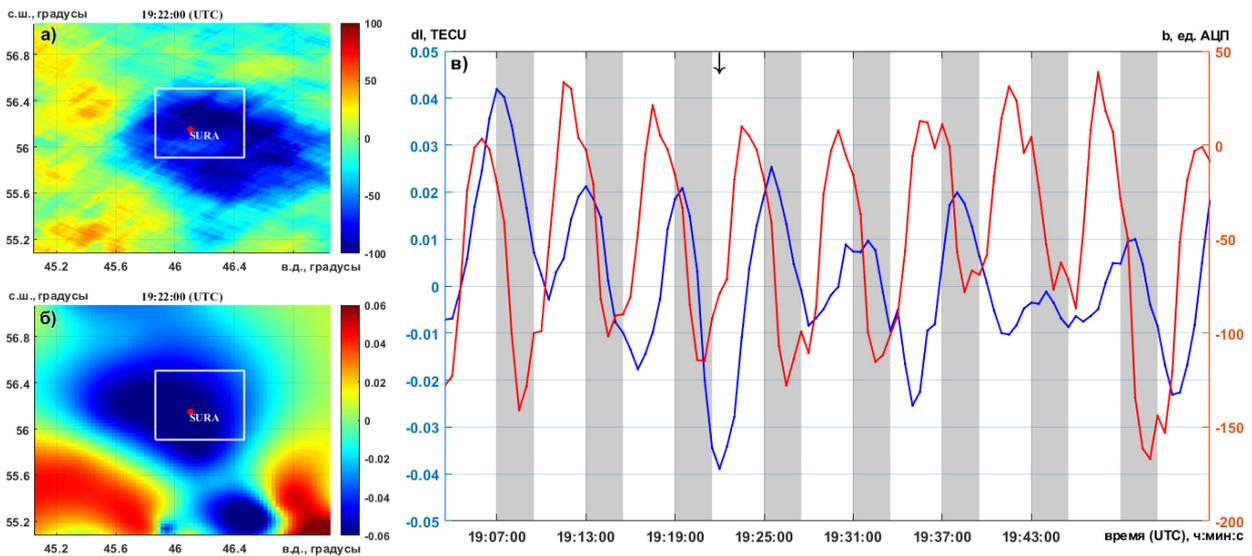


Рис. 2. То же, что на рис. 1 для эксперимента 10 августа 2021 г.

Методика построения карт пространственно-временного распределения интенсивности вариаций полного электронного содержания (ПЭС) основана на том, что в каждый момент времени каждый луч спутник — приемник характеризуется значением ПЭС, азимутом и углом места, а также положением подионосферной точки в географических координатах. Нанося значение вариаций вертикального ПЭС, кодируемых глубиной цвета в соответствии с географическим положением подионосферной точки для каждого луча спутник — приемник для всех станций, доступных в выбранном регионе, можно получать карты вариаций ПЭС с интервалом, равным интервалу времени записи исходных данных на ГНСС-станции. Методика обработки ПЭС для каждого луча спутник — приемник была стандартная и включала в себя вычитание тренда из наклонного ПЭС, приведение наклонного ПЭС к вертикальному и фильтрация скользящим средним [Когогин и др., 2020; Maletckii et al., 2020].

Для сравнительного анализа снимки ночного неба и ПЭС-карты были преобразованы к системе географических координат. На рис. 1, показаны снимок ночного неба с выделенной областью свечения (а); соответствующая карта вариаций ПЭС (б); зависимость вариаций интенсивности свечения возмущенной области ионосферы b (красная линия) в единицах АЦП камеры и вариации полного электронного содержания dl (синяя линия) в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$) от времени эксперимента 5 августа 2021 г., когда наблюдался эффект свечения ионосферы (в). Значения вариаций рассчитаны как среднее значение всех точек, попавших в прямоугольную площадку (белый прямоугольник на панелях а, б) размером $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ с центром в точке, соответствующей центру пятна свечения. Серые прямоугольники соответствуют интервалам времени, когда осуществлялось воздействие на ионосферу. Стрелкой отмечен момент времени, соответствующий изображениям на панелях а, б.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из анализа рис. 1 видно, что наблюдается корреляция между вариациями оптического свечения, вариациями ПЭС и циклами воздействия мощным радиоизлучением. Возникновение эффекта свечения ионосферы сопровождается уменьшением значений ПЭС. Таким образом, можно сделать вывод, что стимулированное свечение ионосферы возникает в областях, соответствующих областям пониженной электронной концентрации. Полученные результаты согласуются с результатами, полученными ранее в работе [Maletckii, 2020].

На рис. 2 показана аналогичная зависимость вариаций оптических эффектов и ПЭС для эксперимента 10 августа 2021 г., когда наблюдалось подавление фонового свечения ионосферы. Значения вариаций здесь рассчитаны аналогичным образом, но по площадке размером $0.3^\circ \times 0.3^\circ$, так как область подавления имеет большие размеры.

Для эксперимента 10 августа 2021 г. также наблюдается корреляция между вариациями подавления фонового свечения, вариациями ПЭС и циклами воздействия. Видно, что включение воздействия станда «Сура» приводит к понижению значений ПЭС. Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что возникновение областей подавления фонового свечения, также сопровождается уменьшением значений ПЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен совместный анализ снимков ночного неба и карт вариаций ПЭС возмущенной мощным радиоизлучением области ионосферы. Обнаружено возникновение как эффекта стимулированного свечения ионосферы, так и подавления фонового свечения. На основе анализа пространственного положения и поведения во времени возникающих оптических эффектов получено, что области свечения ионосферы и области подавления фонового свечения сопровождаются уменьшением значений ПЭС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-00043. Эксперименты на стенде «Сура» проведены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-12-00197. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2020. Т. 63, № 2. С. 89–104.

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.

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.

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 станда «Сура». *Изв. вузов. Радиофизика*. 2017. Т. 60, № 11. С. 949–966.

Maletckii B.M., Yasyukevich Y.V., Vesnin A.M. Wave signatures in total electron content variations: filtering problems. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 8. P. 1340.

URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru>.