

ДИАГНОСТИКА ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ГНСС РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

В.В. Емельянов¹, Д.А. Когогин¹, Д.С. Максимов¹, И.А. Насыров¹, А.Б. Белецкий³,
А.В. Шиндин², С.М. Грач², Р.В. Загреддинов¹

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

DIAGNOSTICS OF A DISTURBED REGION OF THE IONOSPHERE BASED ON OPTICAL MEASUREMENTS AND GNSS RADIO SOUNDING

V.V. Emelyanov¹, D.A. Kogogin¹, D.S. Maksimov¹, I.A. Nasyrov¹, A.B. Beletsky³,
A.V. Shindin², S.M. Grach², R.V. Zagretdinov¹

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 2021–2023 гг. на основе совместного анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций полного электронного содержания. Выявлены временные изменения нейтральной и заряженной компонент ионосферной плазмы как в течение всего эксперимента, так и в пределах одного цикла воздействия.

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

Abstract. We carried out an investigation of the region of the ionosphere disturbed by powerful radio emission from the Sura facility in the 2021–2023 experiments based on a joint analysis of images of the night sky in the 630 nm line and maps of the total electron content variations. Temporal changes in the neutral and charged components of the ionosphere plasma were revealed both during the entire experiment and within one cycle of exposure.

Keywords: ionosphere, airglow patches, 630 nm, GNSS, TEC, TEC maps, Sura facility.

ВВЕДЕНИЕ

За период 2021–2023 гг. на стенде «Сура», расположенном на радиофизическом полигоне «Васильсурск» (географические координаты 56.15° с.ш., 46.10° в.д.) Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Лобачевского (ННГУ) проводились регулярные эксперименты по изучению процессов взаимодействия мощного высокочастотного радиоизлучения с ионосферой. В работе представлены результаты оптических экспериментов, а именно возникновения искусственного свечения ионосферы в красной линии $\lambda = 630$ нм, связанное с релаксационным переходом атомов кислорода из возбужденного состояния $O(^1D_2)$ в основное состояние $O(^3P_2)$ [Грач и др., 2023].

Воздействие на ионосферу осуществлялось коротковолновым радиоизлучением обыкновенной поляризации. Диаграмма направленности стенда «Сура» имела два варианта ориентации: излучение вертикально вверх (В) и в «магнитный зенит» (МЗ) — наклон на 12° на юг в плоскости магнитного меридиана. Частота излучения изменялась в интервале от $f_0 = 4300$ кГц до $f_0 = 5828$ кГц в зависимости от состояния ионосферы. Воздействие осуществлялось шестиминутными периодами: 2.5 мин непрерывное излучение, 3.5 мин пауза, эффективная мощность излучения составляла порядка $P_{эф} \sim 100$ МВт.

Для регистрации снимков ночного неба использовалась камера КЕО Sentinel с ПЗС матрицей. Оптическая система камеры была оснащена красным

светофильтром на длину волны $\lambda = 630$ нм с полосой пропускания $\Delta\lambda = 2$ нм и объективом типа «рыбий глаз» с полем зрения 145°. Размер изображения камеры с учетом биннинга составлял 512×512 пикселей. Регистрация изображений была синхронизирована с режимом воздействия на ионосферу стенда «Сура» и производилась в периодическом режиме каждые 30 с в нулевую и тридцатую секунды с экспозицией 25 с. Камера была расположена в пригороде Казани на территории магнитной обсерватории КФУ (географические координаты 55.56° с.ш., 48.45 в.д.) примерно в 170 км к востоку от стенда «Сура».

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Всего в 2021–2023 гг. было проведено более 20 экспериментальных серий по наблюдению эффекта стимулированного оптического свечения ионосферы. Из них для анализа были выбраны 11 дней, когда эффект свечения в красной линии удалось уверенно наблюдать не менее чем на пяти циклах воздействия. Для выделения областей свечения на снимках ночного неба использовалась методика, описанная в статье [Шиндин и др., 2017]. Данная методика дополнительно была расширена добавлением нескольких этапов, позволивших повысить качество обработки. На следующем этапе обработки изображения с выделенными на них областями свечения были преобразованы из координат пикселей в географические координаты (широта, долгота), т.е. были получены проекции снимков

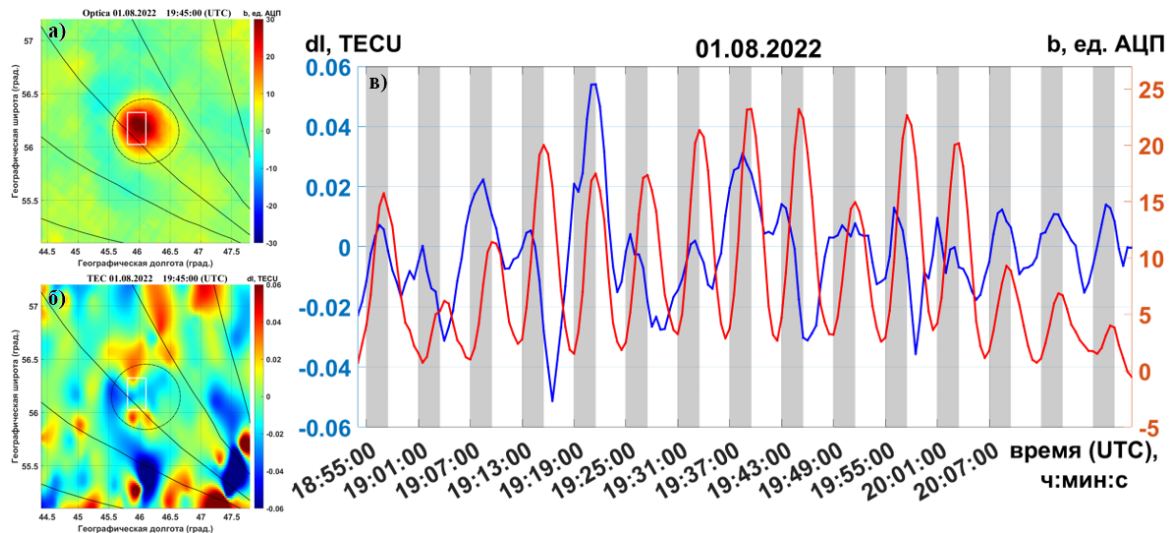


Рис. 1. Снимок ночного неба с выделенной областью свечения в проекции на географические координаты (а) и соответствующая ему карта вариаций ПЭС (б). Сплошными линиями показаны проекции линий магнитного поля, черный круг — проекция диаграммы направленности станда «Сура». (в) — зависимость интенсивности стимулированного свечения ионосферы b (красная линия) и вариаций ПЭС dI (синяя линия) от времени для эксперимента 1 августа 2022 г. Серыми прямоугольниками показан режим воздействия на ионосферу станда «Сура»

ночного неба поверхность Земли. Для этого использовалась методика аналогичная изложенной в статье [Сыренова и др., 2021], которая так же была дополнена некоторыми этапами.

Таким образом были получены изображения ночного неба в географических координатах с выделенными на них оптическими эффектами стимулированного свечения (рис 1а). Каждому такому изображению сопоставлялась карта вариаций полного электронного содержания (ПЭС) (рис 1б). Значения ПЭС рассчитывались по данным радиозондирования ионосферы сигналами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), записанным на широкой распределенной сети наземных станций. Для построения карт ПЭС использовалась методика, описанная в статьях [Когогин и др., 2020, Maletckii et al., 2020].

Такие пары изображений построены для всех имеющихся данных 2021–2023 гг. По полученным изображениям построены графики зависимости изменений интенсивности стимулированного оптического свечения b и вариаций ПЭС dI от времени (рис. 1в). Значения интенсивности свечения рассчитывались как медианные значения по прямоугольной площадке $0.3 \times 0.3^\circ$ (белый прямоугольник на рис. 1) с центром, соответствующим центру области свечения. Значения вариаций ПЭС рассчитывались аналогичным образом.

По полученным описанным выше образом изображениям и графикам наблюдается четкая зависимость между изменениями интенсивности свечения ионосферы и режимами воздействия на нее (увеличение в процессе воздействия и плавное уменьшение в паузу). Однако такой явной зависимости не прослеживается ни на картах вариаций ПЭС, ни на соответствующих им графиках. Поэтому для выделения периодических изменений в этом случае применялся метод наложения эпох. Для этого графики вариаций ПЭС разбивались на шестиминутные интервалы, соответствующие периоду режима воздействия с

последующим сложением и осреднением по значениям соответствующих точек из интервалов.

На рис. 2 показаны результаты применения метода наложения эпох для всех дней 2021–2023 гг. когда область свечения наблюдалась не менее чем на пяти экспериментальных циклах подряд. График построен для объединения всего набора данных 2021–2023 гг. и его поведение можно описать следующим образом: значения интенсивности оптического свечения растут в процессе воздействия на ионосферу, а затем плавно спадают до фонового уровня в паузу, что согласуется с ранее проведенными оптическими и фотометрическими измерениями [Клименко и др., 2017]. Зависимость вариаций ПЭС в свою очередь можно описать как небольшое увеличение в первые 30–40 с воздействия, затем плавное уменьшение в течение примерно 3.5 мин с последующим возрастанием до фонового уровня к началу нового цикла.

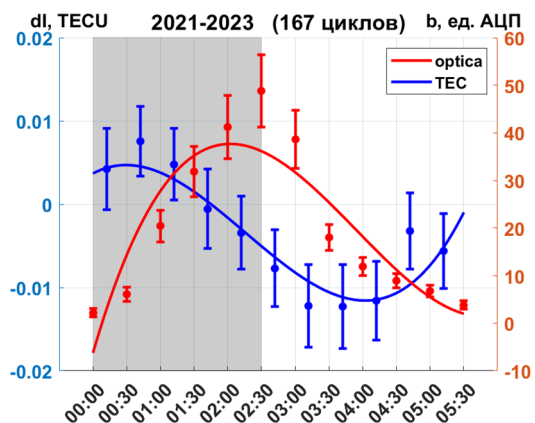


Рис. 2. Зависимость изменения интенсивности стимулированного свечения ионосферы b (красная линия) и вариаций ПЭС dI (синяя линия) в пределах одного цикла по результатам применения метода наложения эпох. Серый прямоугольник соответствует интервалу времени, когда воздействие включено

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ возмущенной области ионосферы в экспериментах на стенде «Сура», проведенных в 2021–2023 гг. Проанализированы данные оптических измерений в линии 630 нм, характеризующие поведение нейтральной составляющей ионосферной плазмы, и построены соответствующие им карты вариаций ПЭС, описывающие поведение заряженной компоненты. Выявлены периодические зависимости изменений интенсивности оптического свечения ионосферы и соответствующих вариаций ПЭС как в течение всего эксперимента, так и в пределах одного цикла воздействия. Получено, что интенсивность свечения в пределах цикла растет в процессе воздействия, а затем плавно спадает в паузу. Значения вариаций ПЭС в свою очередь возрастают в первые 30–40 с после начала воздействия, затем плавно спадают, достигая минимума примерно к середине паузы, после чего снова возрастают до фонового уровня к началу нового цикла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10029. Эксперименты на УНУ стенд СУРА проведены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-12-00197. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Клименко В.В., Грач С.М., Сергеев Е.Н. и др. Характеристики искусственного свечения ионосферы при

омическом нагреве и при ускорении электронов плазменной турбулентностью, инициированными мощным радиоизлучением стенда «Сура» // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 6, № 6. С. 481–501.

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

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

Maletckii V.M., Yasyukevich Y.V., Vesnin A.M. Wave signatures in total electron content variations: filtering problems // Remote Sensing. 2020. V. 12, N. 8. P. 1340.

Грач С.М., Легостаева Ю.К., Емельянов В.В. и др. Первые результаты трехпозиционных измерений искусственного оптического свечения в красной линии атомарного кислорода на нагревном стенде «Сура» в 2021 и 2022 гг. // Всероссийские открытые Армандовские чтения [электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: МИ ВлГУ. 2023. С. 240–247.