

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСКУССТВЕННОГО
ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЛИНИИ 630 нм НА СТЕНДЕ СУРА
В 2021 г. ПРИ РЕГИСТРАЦИИ В ТРЕХ ПРИЕМНЫХ ПУНКТАХ**

**¹Ю.К. Легостаева, ¹С.М. Грач, ¹А.В. Шиндин, ¹К.К. Грехнева, ¹В. Павлова,
¹В.Р. Хашев, ²Д.А. Когогин, ²И.А. Насыров, ³А.Б. Белецкий**

¹Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
julilegostaeva@gmail.com

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

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

**PRELIMINARY RESULTS OF STUDIES OF IONOSPHERIC ARTIFICIAL OPTICAL AIRGLOW
IN THE 630 nm LINE AT THE SURА FACILITY
DURING REGISTRATION AT THREE RECEIVING POINTS IN 2021**

**¹Yu.K. Legostaeva, ¹S.M. Grach, ¹A.V. Shindin, ¹K.K. Grekhneva, ¹V.A. Pavlova,
¹V.R. Khashev, ²D.A. Kogogin, ²I.A. Nasyrov, ³A.B. Beletsky**

¹National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
julilegostaeva@gmail.com

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

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

Аннотация. Представлены предварительные результаты анализа данных экспериментов по исследованию поведения оптического свечения ночного неба в красной линии атомарного кислорода 630 нм при воздействии на ионосферу мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА, выполненных в августе и сентябре 2021 г. Измерения оптического свечения проводились в трех разнесенных пунктах: непосредственно на стенде СУРА (Нижегородская обл., п. Васильсурск, 56.15° N, 46.10° E), Магнитная обсерватория Казанского университета (55.56° N, 48.45° E) и д. Заключная (Нижегородская обл., Перевозский р-н, 55.54° N, 44.53° E). Исследованы пространственное расположение и размеры областей генерации искусственного оптического свечения и подавления фона естественного свечения при воздействии.

Ключевые слова: ионосфера; ВЧ-нагрев, оптическое свечение, красная линия.

Abstract. This paper presents preliminary results of the analysis of experimental data on the study of behavior of the optical nightglow in the red line of atomic oxygen (630 nm) when the ionosphere is pumped by high-power HF radio waves from the SURА facility; the experiments were performed in August and September 2021. Airglow was measured at the three separated sites — the SURА facility (the Nizhny Novgorod region, 56.15° N, 46.10° E), Kazan University Magnetic Observatory (55.56° N, 48.45° E), and village Zaklyuchnaya (the Nizhny Novgorod region, 55.54° N, 44.53° E). We studied the spatial location and sizes of the areas where artificial optical airglow is generated and the background is suppressed upon pumping.

Keywords: ionosphere; HF heating; optical airglow, red line.

ВВЕДЕНИЕ

Искусственное свечение ионосферы наблюдается в F-области под воздействием мощного электромагнитного излучения в результате следующей цепочки явлений: (1) взаимодействие волны накачки обыкновенной поляризации (O) на частоте f_0 , меньшей критической частоты F2-слоя ионосферы f_{0F2} , с ионосферной плазмой приводит к генерации плазменных волн в области отражения волны накачки; (2) плазменные волны эффективно ускоряют свободные электроны; (3) электроны, приобретающие в результате ускорения необходимую энергию $E > E_n$, при столкновениях возбуждают определенные энергетические уровни нейтральных атомов ионосферного газа (кислорода); (4) в процессе релаксации возбужденного атома до основного состояния происходит высвечивание фотона.

Подавление фонового свечения ионосферы возникает вследствие уменьшения коэффициента диссоциативной рекомбинации α_c с ростом T_e , что приводит, следовательно, к уменьшению концентрации возбужденных атомов, ответственных за генерацию свечения.

Основной наблюдаемой линией свечения на нагревном стенде СУРА является красная линия 630 нм, связанная с излучением атомарного кислорода при переходе электрона с уровня $O(^1D)$ в основное состояние O^3P с энергией возбуждения $E_n = 1.96$ эВ и временем жизни $\tau = 107$ с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В августе и сентябре 2021 г. на стенде СУРА были проведены эксперименты по регистрации свечения ионосферы в линии 630 нм при воздействии на ионосферу мощным КВ-радиоизлучением в трех разнесенных пунктах наблюдения: стенд СУРА, Магнитная обсерватория Казанского университета и д. Заключная.

В случае регистрации искусственного свечения в нескольких разнесенных в пространстве пунктах появляется возможность оценки пространственных характеристик светящейся области. В данном докладе приводятся результаты анализа, полученные в сеансах воздействия, при которых оптическое свечение либо его подавление фона наблюдалось одновременно, по крайней мере, в двух пунктах наблюдения.

Воздействие на ионосферу осуществлялось с помощью КВ-радиоизлучения обыкновенной поляризации при вертикальной ориентации диаграммы направленности стенда либо при наклоне диаграммы на юг на 12° в плоскости магнитного меридиана на частоте $f_0=4\ 300$ кГц, эффективная излучаемая мощность составляла $P_{эф}\sim 100$ МВт. Измерения на стенде СУРА и в д. Заключение проводились с помощью камеры SBIG-8 300M (далее SBIG); размер кадра 3326×2504 пикселей с объективом Canon EF 50 мм $f/(1.2L)$ USM с полем зрения $20^\circ\times 15^\circ$ со светофильтром на длину волны $\lambda=630$ нм с полосой пропускания $\Delta\lambda=10$ нм. Пункт наблюдения в Казани был оснащен камерой KEO Sentinel (далее KEO); размер кадра 2048×2048 пикселей с объективом с полем зрения 150° со светофильтром на длину волны $\lambda=630$ нм с полосой пропускания $\Delta\lambda=2$ нм. Воздействие осуществлялось в режиме 2.5 мин непрерывное излучение / 3.5 мин пауза. В экспериментах длительность экспозиции камер SBIG и KEO составляла 25 с.

Проводилась астрометрическая калибровка, которая дает возможность убрать засветку камеры звездами и определить положение пятен свечения и подавления на небосводе.

Анализ изображений сводился к следующему. Из набора снимков выбирались опорные кадры, зарегистрированные непосредственно перед включением стенда СУРА, на которых заведомо отсутствовало влияние мощных радиоволн на яркость свечения. Для всех остальных снимков формировались темновые кадры с помощью усреднения с определенными весами двух ближайших опорных кадров. При этом каждый из опорных кадров поворачивался в соответствии с вращением небесной сферы относительно полюса мира таким образом, чтобы положение звезд на них совпало с положением звезд на анализируемом снимке. Веса при суммировании определялись интервалами времени между анализируемым снимком и опорными кадрами [Грач, 2012]. После этого из анализируемого кадра вычитался темновой кадр. В результате достигалась плавная компенсация излучения звезд и фонового свечения атмосферы, на итоговом изображении оставались только изменения яркости свечения, вызванные излучением стенда СУРА и быстрыми изменениями прозрачности атмосферы и помехами (спутниками, метеорами и т. п.). И, наконец, для сглаживания шумов использовалась текущая медианная фильтрация по полю снимка.

На рис. 1 показаны обработанные оптические изображения, полученные в приемных пунктах: на стенде СУРА и в магнитной обсерватории в Казани, зарегистрированные одновременно 05.09.2021 в 18:51:00 UT (вертикальный нагрев). В этом сеансе $f_{oF2}=4.8$ МГц. В обоих пунктах наблюдения присутствует заметное увеличение яркости оптического свечения.

Для обработки изображений использовалась программа [Шиндин, 2018], в которой была использована модель области свечения в виде сферы. Предварительно получено, что высота центра пятна свече-

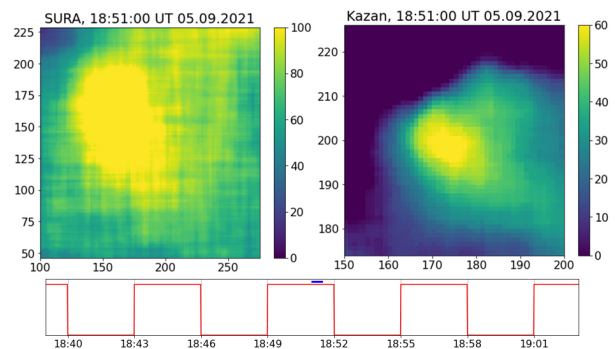


Рис. 1. Обработанные оптические изображения, зарегистрированные 05.09.2021 в 18:51:00 UT в пункте наблюдения СУРА (слева) и в магнитной обсерватории в Казани

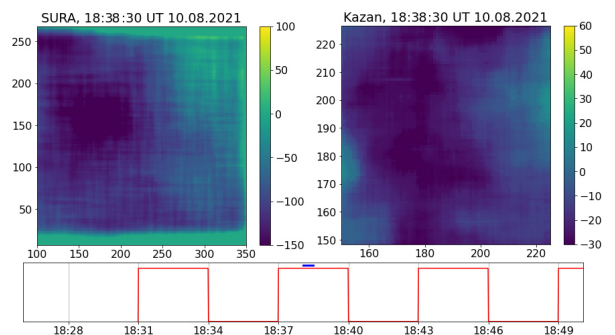


Рис. 2. Портреты ночного неба, зарегистрированные 10.08.2021 в 18:38:00 UT в пункте наблюдения СУРА (слева) и в магнитной обсерватории в Казани

ния составляла ~ 270 км, что примерно соответствовало высоте плазменного резонанса (поперечный размер пятна составлял 30 км).

На рис. 2 показан эффект подавления оптического свечения ионосферы — портреты ночного неба, полученные для пунктов наблюдения в Васильсурске и Казани, зарегистрированные одновременно 10.08.2021 в 18:38:00 UT (нагрев с наклоном на юг на 12°). По предварительным результатам обработки размер области подавления составляет 13 км, высота ~ 230 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным предварительного анализа сеанса измерения 5 сентября в 18:51 UT пятно искусственного свечения наблюдалось одновременно в Казани и на стенде СУРА, пятно было расположено на высоте 270 км, а его поперечный размер составлял 30 км. По данным с сеанса 10 августа в 18:38 наблюдалось подавление оптического свечения, область подавления составляла 13 км на высоте 230 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 20-12-00197.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грач С.М., Клименко В.В., Шиндин А.В. и др. Оптическое свечение при воздействии на ионосферу радиоизлучением стенда СУРА: результаты экспериментов 2010 г. *Изв. вузов*. 2012. Т. 55, № 1-2. С. 36–56.
- 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*. 2017. Т. LX, № 11. С. 949–966.