

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕХПОЗИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ В КРАСНОЙ ЛИНИИ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА НА НАГРЕВНОМ СТЕНДЕ СУРА

Ю.К. Легостаева, А.В. Шиндин, С.М. Грач, В.Р. Хашев

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия; e-mails: julilegostaeva@gmail.com, shindin@rf.unn.ru, sgrach@rf.unn.ru, xashev2013@gmail.com*

**Аннотация.** Представлены результаты анализа данных экспериментов по исследованию воздействия мощного радиоизлучения стенда СУРА на свойства оптического свечения ночного неба (ионосферы) в красной линии атомарного кислорода ( $\lambda=630$  нм), выполненных в 2022 г. Регистрация искусственного свечения в линии  $\lambda = 630$  нм при воздействии мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА проводилась в трех разнесённых пунктах наблюдения – стенд СУРА (географические координаты 56.15° с.ш., 46.10° в.д.), Магнитная обсерватория Казанского университета (55.56° с.ш., 48.45° в.д.) и деревня Заключная (Перевозский район Нижегородской обл., 55.54° с.ш., 44.53° в.д.), на расстояниях ~ 120-170 км друг от друга. Регистрация свечения и первичная обработка данных проводилась сотрудниками ННГУ, КП(Ф)У и ИСЗФ СО РАН. При трехпозиционных наблюдениях полученные снимки ночного неба позволяют определять высоту и размер области генерации свечения, а также восстанавливать крупномасштабную структуру области генерации свечения.

### Введение

В F-области ионосферы наблюдается искусственное свечение под воздействием мощного радиоизлучения, которое возникает в результате ряда последовательных процессов. Первоначально волна накачки (ВН) обыкновенной поляризации на частоте  $f_0$  взаимодействует с ионосферной плазмой, обеспечивая генерацию плазменных волн. Электроны, приобретающие в результате ускорения необходимую энергию, при столкновениях возбуждают определённые энергетические уровни нейтральных атомов ионосферного газа (кислорода); в процессе релаксации возбуждённого атома до основного состояния происходит высвечивание фотона.

Кроме этого, существует конкурирующий эффект, который связан с подавлением фонового свечения ионосферы. Он возникает вследствие уменьшения коэффициента диссоциативной рекомбинации с ростом температуры электронов при нагреве плазменными волнами, что приводит к уменьшению концентрации возбуждённых атомов, следовательно, уменьшению яркости фонового свечения. Наиболее низким порогом возбуждения (1.96 эВ) обладает красная линия атомарного кислорода  $O(^1D)$  ( $\lambda = 630$  нм, радиативное время жизни  $\tau = 107$  с).

В 2021-2024 гг. эксперименты по регистрации искусственного свечения при воздействии мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА в линии  $\lambda = 630$  нм проводились в трех разнесённых пунктах наблюдения – стенд СУРА (географические координаты 56.15° с.ш., 46.10° в.д.), Магнитная обсерватория Казанского университета (55.56° с.ш., 48.45° в.д.) и деревня Заключная (Перевозский район Нижегородской обл., 55.54° с.ш., 44.53° в.д.). Расстояние между пунктами составляло: СУРА – Магнитка 167 км, СУРА – д. Заключная – 119 км, д. Заключная – Магнитка 270 км. 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 частотах  $f_0 = 5380$  кГц, 5200 кГц, 4785 кГц, 4300 кГц, эффективная излучаемая мощность составляла  $P_{эф} \sim 80 - 100$  МВт. Частота  $f_0$  выбиралась в зависимости от критической частоты ионосферы. Воздействие осуществлялось в режиме 3 минуты – непрерывное излучение, 3 минуты – пауза. Методика регистрации и анализа портретов ночного неба в линии  $O(^1D)$  описана в [1, 2].

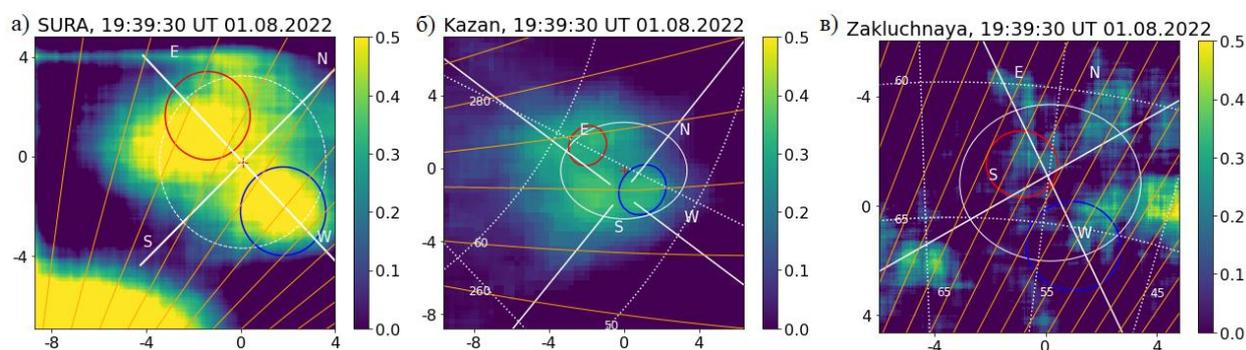
С помощью регистрации искусственного свечения в нескольких разнесённых пунктах можно оценить

структуру и пространственные характеристики возмущенной области ионосферы. Из-за большого расстояния между регистрационными пунктами ( $>100$  км) возможность зафиксировать свечение в разных местах (из-за облачного покрова) была далеко не всегда. В течение двух кампаний 2021 года не было ни одного сеанса, когда свечение или подавление фона наблюдались одновременно в трех пунктах. В 2022 году благоприятные погодные условия позволили зарегистрировать свечение во всех трех пунктах, хотя яркость изображений могла быть различной из-за прозрачности атмосферы.

### Результаты измерений

В большинстве случаев, когда свечение интенсивное, возникает одно пятно, занимающее всю область нагрева. Но бывает, что возникают полосы (страты), по предположениям вытянутые вдоль магнитного поля. Примеры кадров ночного неба со стратами приведены на рис. 1 и 2.

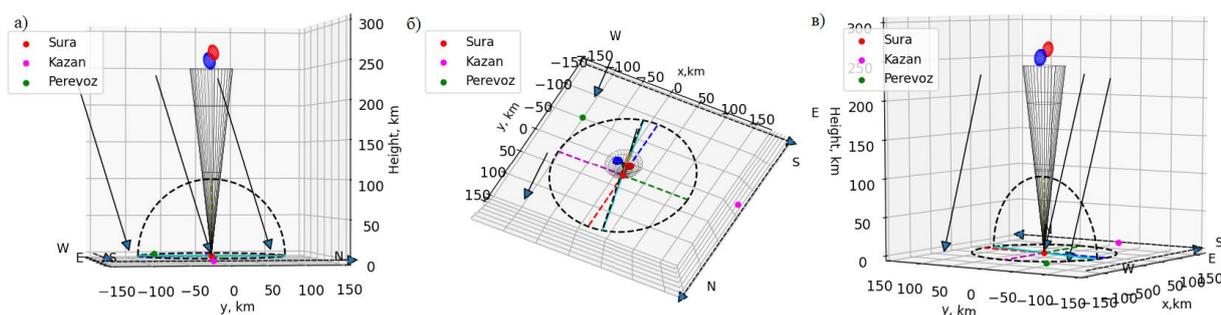
На рисунке 1 показаны снимки ночного неба, сделанные в разных приемных пунктах, в линии  $\lambda = 630$  нм, сделанные 1 августа 2022 года в 19:39:30 UT с экспозицией 25 секунд, через 2.5 минуты после включения стенда СУРА. Время начала съемки и местоположение пункта регистрации указаны сверху панели. Для построения трехмерной модели области свечения на видимые снимке пятна свечения накладывались модельные контура области в форме эллипсов. Эти эллипсы обозначены красными и синими контурами, представленными на рис.1. Координаты центра эллипсов и размеры его полуосей подбирались так, чтобы обеспечить возможно близкое совпадение эллипсов с областью пятна, зарегистрированной в трех разных пунктах в одно и то же время, и одновременно представляли собой проекции трехмерной модели области свечения (см. рис.2) на плоскость кадров каждой из регистрирующих камер, расположенных в приемных пунктах. Полученные параметры контуров для различных областей свечения (красный/синий) на рис 1 составляют:  $56.10^\circ/56.14^\circ$  с.ш.,  $46.36^\circ/45.93^\circ$  в.д., высота 250 км/255 км, большая полуось эллипса 9 км/11 км, малая полуось 7 км/8 км. Оранжевые линии соответствуют проекциям силовых линий геомагнитного поля на плоскость изображения. На снимках также отмечены направления сторон света (белые линии), радиальные линии и азимутальные круги (пунктирные белые линии), и схематичное изображение диаграммы направленности стенда СУРА (белый эллипс). При этом большое южное «пятно» на панели а) соответствует облаку во время регистрации снимка пролетавшему над регистрирующей камерой.



**Рисунок 1.** Обработанные оптические изображения, зарегистрированные 01.08.2022 в 19:39:30 UT. Панель а) стенд СУРА, панель б) Магнитная обсерватория Казанского университета, панель в) пункт в д. Заключная.

На рисунке 2 представлен результат 3D-моделирования области свечения. Панели а), б), в) на рис.2 соответствуют виду на область свечения со стороны Магнитной обсерватории КФУ (приблизительно с востока), снизу со стенда СУРА и с юго-западной стороны д. Заключной. Моделирование проводилось с использованием специально разработанного программного обеспечения. На основе наиболее подходящих параметров контуров с рисунка 1 были построены объемные сфероиды, вытянутые вдоль магнитного поля. Стрелки указывают направление магнитных силовых линий и стороны света. По модели IGRF 2022 г. над стендом Сура на высоте 250 км магнитное склонение составляет  $12.119^\circ$ , а магнитное наклонение  $-72.19^\circ$ . Параметры моделирования выбирались, опять же, для достижения наилучшего совпадения проекций трехмерных сфероидов на плоскости кадров различных камер. Пунктирный круг на рис. 2 обозначает круг компаса, где красная линия соответствует северу, синяя — югу, зеленая — востоку, а розовая — западу. Бирюзовая линия представляет собой проекцию магнитных силовых линий на горизонтальную плоскость, соответствующую магнитному меридиану. Серый конус отображает диаграмму направленности стенда Сура. На основе полученных данных и дальнейшего анализа планируется определить реальное расположение пятен

свечения в пространстве и исследовать пространственную структуру области возмущения.



**Рисунок 2.** Панель а) вид с востока (со стороны Казани); панель б) вид снизу на стэнд СУРА; панель в) вид с юго-запада (деревня Заклuchная).

### Заклuchение

В 2021-2024 гг. был накоплен значительный объем экспериментальных данных по трехпозиционному исследованию области искусственного свечения ионосферы над стэндом СУРА. На основе выработанного алгоритма построения модели трехмерной области свечения и проведенных трёхпозиционных измерений был проведен анализ четырех 6-ти минутных сеансов воздействия, причем общее число сеансов, требующих анализа, составляет несколько сотен. В представленном сообщении продемонстрирован результат анализа одного из сеансов, где наблюдалось искусственное свечение ионосферы. Из четырех проанализированных сеансов, в трех наблюдалось искусственное свечение ионосферы, и в одном наблюдалось одновременное подавление фонового свечения ионосферы и генерация искусственного свечения ионосферы одновременно в разных областях снимка. В дальнейшем предполагается провести анализ всего имеющегося объема накопленных данных и исследования зависимости структуры областей свечения ионосферы от условия эксперимента.

Авторы выражают благодарность сотрудникам КФУ И.А. Насырову, Д.А. Когогину и В.В. Емельянову, сотрудникам ИСЗФ СО РАН А.Б. Белецкому и И.Д. Ткачёву, сотруднице ННГУ К.К. Грехневой и техническому персоналу стэнда СУРА за участие в проведении эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-12-00197П.

### Литература

1. Шиндин А.В., Клименко В.В., Когогин Д.А., Белецкий А.Б., Грач С.М., Насыров И.А., Сергеев Е.Н. // Изв. вузов. 2017. Том LX, № 11, С. 949.
2. Грач С.М., Клименко В.В., Шиндин А.В., Насыров И.А., Сергеев Е.Н., Яшнов В.А., Погорелко Н.А. // Изв. вузов. 2012. Т. 55(1–2). С. 36.
3. Grach S.M., Nasyrov I.A., Kogogin D.A., Shindin A.V., Sergeev E.N., Razi Mousavi S.A. // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. P. 12,749–12,756. <https://doi.org/10.1029/2018GL080571>