

Первые результаты трехпозиционных измерений искусственного оптического свечения в красной линии атомарного кислорода на нагревном стенде СУРА в 2021 и 2022 гг.

С.М. Грач¹⁾, Ю.К. Легостаева¹⁾, В. В. Емельянов²⁾, Д.А.Когогин²⁾, И.А. Насыров¹⁾, А.В. Шиндин¹⁾, А.Б. Белецкий³⁾, К.К. Грехнева¹⁾, В.А. Павлова¹⁾, В.Р. Хашев¹⁾.

¹ *Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

603022, г.Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23

E-mail: sgrach@rf.unn.ru

² *Казанский (Приволжский) федеральный университет,*
420008, Россия, РТ, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18.

E-mail: Igor.Nasyrov@kpfu.ru

³ *Институт солнечно-земной физики СО РАН,*
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291

E-mail: beletsky@mail.iszf.irk.ru

Представлены первые результаты экспериментов по исследованию воздействия мощного радиоизлучения стенда СУРА на свойства оптического свечения ночного неба (ионосферы) в красной линии атомарного кислорода ($\lambda=630$ нм), выполненного в 2021-2022 гг. Регистрация проводилась в трёх пространственно разнесённых пунктах, расположенных на расстояниях более 120 км друг от друга. Установлено, что полученные снимки ночного неба позволяют определять высоту и размер области генерации свечения, области подавления свечения, а также восстанавливать крупномасштабную структуру области генерации свечения.

Ключевые слова: Мощное радиоизлучение, стенд СУРА, искусственное оптическое свечение, подавление фонового свечения, ионосфера

The first results of three-position measurements of artificial optical glow in the red line of atomic oxygen on the SURA heating facility in 2021 and 2022

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

¹ *State University of Nizhny Novgorod*

² *Kazan Federal University.*

³ *Institute Of Solar-Terrestrial Physics*

The first results of experiments on the study of the impact of powerful radio emission from the SURA facility on the properties of the optical glow of the night sky (ionosphere) in the red line of atomic oxygen ($\lambda=630$ nm), carried out in 2021-2022, are presented. The glow was registered at three spatially separated points located at distances of more than 120 km from each other. It has been established that the obtained images of the night sky make it possible to determine the height and size of the glow generation region, the glow suppression region, and also to restore the large-scale structure of the glow generation region.

Keywords: Powerful radio radiation, SURA facility, artificial optical airglow, suppression of the background airglow, ionosphere

Введение

В экспериментах с воздействием на ионосферу мощным пучком высокочастотных радиоволн оптические эффекты в большинстве случаев наблюдаются в красной и

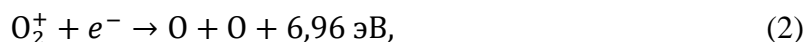
зелёной линиях атомарного кислорода с длинами волн $\lambda = 630$ нм (переход $O^1D_2 \rightarrow O^3P_2$) и $\lambda = 557,7$ нм (переход $O^1S_0 \rightarrow O^1D_2$) [1-6]. Увеличение интенсивности оптического свечения ионосферы при воздействии радиоволны накачки обыкновенной поляризации (далее — искусственное оптическое свечение, ИОС) связано с ускорением электронов плазменными волнами, возникающими при развитии различных параметрических неустойчивостей и возбуждение атомов кислорода при столкновениях с такими электронами:



По измерениям искусственного оптического свечения на различных длинах волн (соответственно, с различными потенциалами возбуждения) можно судить о функции распределения и концентрации таких электронов [2-6]. Искусственное оптическое свечение измеряют также для определения положения пятен свечения на небосводе, в зависимости от наклона диаграммы направленности нагревного стенда, неоднородной структуры возмущённой области, перемещений плазмы в возмущённой области ионосферы и т.д. [2-5].

В основном исследования ИОС проводятся при облучении ионосферы волной О-поляризации. Следует, однако, отметить, что в последнее десятилетие активно исследуется генерация ИОС волной накачки Х-поляризации [7,8]. Результаты таких исследований находятся, однако, за пределами настоящего доклада.

Наряду с ИОС имеет место конкурирующий эффект — подавление фонового свечения ионосферы. Излучение в атмосферных линиях кислорода всегда имеет место в качестве фонового свечения неба, вызванного возбуждением атомов в ионно-молекулярных реакциях [3,9,11]. В F2-области ночной ионосферы основным источником возбуждения является реакция диссоциативной рекомбинации электронов с ионами молекулярного кислорода



в которой высвобождается достаточно энергии для возбуждения атомов в состоянии $O(^1D)$ и с меньшей вероятностью в состоянии $O(^1S)$. Вследствие уменьшения коэффициента диссоциативной рекомбинации α_e с ростом электронной температуры T_e имеет место конкурирующий эффект — подавление фонового свечения ионосферы возникает, что приводит, следовательно, к уменьшению концентрации возбужденных атомов, ответственных за генерацию свечения (см., например, [9,10]).

В настоящем докладе кратко изложены результаты кампаний, проведенных в августе, сентябре 2021 г. и июле-августе и августе-сентябре 2022 г., в которых были проведены эксперименты по регистрации свечения ионосферы в линии $\lambda = 630$ нм при воздействии радиоизлучением стенда СУРА в трех разнесённых пунктах наблюдения — стенд СУРА (Нижегородская область, пос. Васильсурск, географические координаты 56,15° с. ш., 46,10° в. д.), Магнитная обсерватория Казанского университета (Казань, географические координаты 55,56° с.ш., 48,45° в. д., 170 км от стенда) и д. Заключная (Перевозский район, географические координаты 55.54° с. ш., 44.53° в. д., 115 км от стенда).

При регистрации искусственного свечения в нескольких разнесённых в пространстве пунктах появляется возможность оценить структуру и пространственные характеристики возмущенной области ионосферы.

Постановка эксперимента. Методика обработки данных.

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, частоты волны накачки варьировались в зависимости от состояния ионосферы от $f_0 = 4,3$ МГц до $f_0 = 5,64$ МГц, эффективная излучаемая мощность составляла $P_{эф} \sim 100$ МВт.

Измерения свечения на стенде СУРА и в д. Заключение проводились с помощью ПЗС камер SBIG-8300M (далее SBIG). (размер кадра $3\,326 \times 2\,504$ пикселей) с объективом Canon EF 50mm $f/1.2L$ 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 КЕО) (размер кадра $2\,048 \times 2\,048$ 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 следующем режиме: 1 минута – импульсное излучение (длительность импульса – 50 мс, период повторения – 3 с), далее – 2,5 минуты непрерывное излучение, и далее – 3,5 минуты пауза. Запуск всех участвующих в эксперименте ПЗС камер производился синхронно в нулевую и тридцатую секунду с экспозицией 27 с (мертвое время между кадрами 3 с). Для увеличения чувствительности анализ портретов ночного неба велся с использованием бинирования (объединения пикселей) 9×9 для камер SBIG и 4×4 для камеры КЕО.

Поскольку область свечения вращается вместе с Землёй, а ориентация камер не менялась в течение эксперимента, то для целей настоящего исследования необходима астрометрическая калибровка, связанная с определением по координатам пиксела изображения горизонтальных координат: высоты (угла места) и азимута объекта. Программа по осуществлению астрометрической калибровки была разработана в [11].

С помощью пакета Astro etry.net автоматически составлялась таблица ярких (опорных) звёзд, имеющих на снимке. Каждой звезде ставились соответствие две пары координат: (x, y) в системе координат, связанной с плоскостью кадра, и (α, δ) в экваториальной системе координат эпохи J2 000. Для камеры КЕО для получения подобной таблицы требовалось вручную идентифицировать звёзды на снимке и получить их экваториальные координаты из звёздного каталога. Затем экваториальные координаты преобразовывались в горизонтальные – высоту и азимут (h, A) . Из полученной таблицы пар координат $(x, y) \rightarrow (h, A)$ ярких звёзд можно установить функциональную связь между системами координат. Астрометрическая калибровка дает возможность убрать засветку камеры звездами, которые мешают анализу данных, и определить положение пятен свечения 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 определёнными 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 звёзд на них совпало с положением звёзд на анализируемом снимке. Веса при суммировании определялись интервалами времени между анализируемым снимком и опорными кадрами [3]. После этого из анализируемого кадра вычитался темновой кадр. В результате достигалась плавная компенсация излучения звёзд и фонового свечения атмосферы, и 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.

Полученные результаты

В ходе экспериментов 2021 и 2022 гг. наблюдались как генерация ИОС в красной линии, так и подавление фонового свечения. Примеры регистрации портретов ночного неба в линии $\lambda=630$ нм, зарегистрированные на регистрационном пункте в Магнитной обсерватории, показаны на рис. 1 для вертикального излучения мощной волны. Представлены фрагменты снимков ночного неба размером 110×110 пикселей, сделанных камерой КЕО. На верхних панелях показаны сеансы, в которых генерируется ИОС, на нижних – сеансы в которых происходит подавление фонового свечения. Дата и время регистрации портретов ночного неба снимка показаны вверху панелей. Время регистрации снимков соответствуют 2,5 мин и 2 мин после включения мощной волны (верхний ряд и нижний ряды, соответственно). Отметим, что на всех рисунках яркость указана в единицах АЦП матрицы соответствующей камеры.

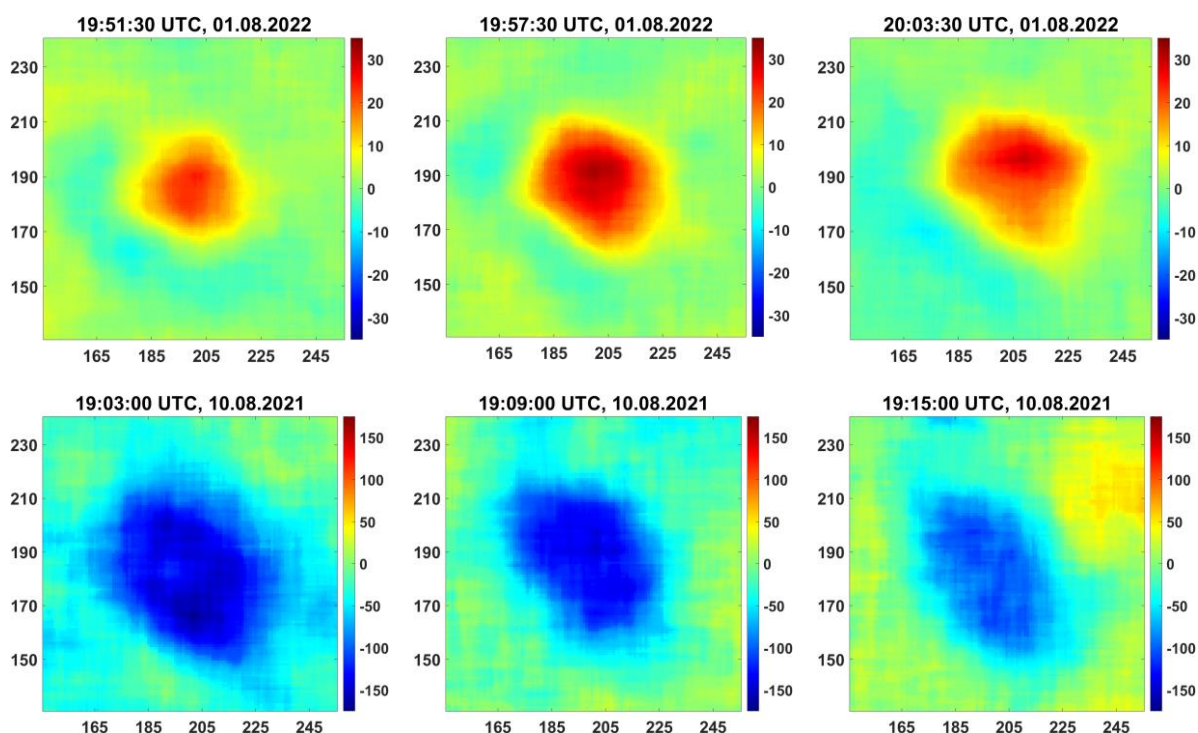


Рис. 1

Видно, что положение пятен ИОС и подавления на снимках приблизительно совпадают, хотя пространственный размер областей подавления в среднем примерно в 2 раза превышает размер областей свечения. Согласно [3,9], ИОС либо подавление фонового свечения при вертикальном воздействии преобладают в разные дни наблюдений, в зависимости от ионосферных условий. В ряде экспериментов 2022 года присутствовали также дни, когда области свечения и подавления сменяли друг друга в пределах одного эксперимента (в нескольких циклах нагрева наблюдался эффект свечения, в нескольких – подавления). Для выяснения причин такого поведения необходим более детальный анализ ионосферных условий.

На рис. 2 представлены примеры регистрации портретов очного неба при наклоне диаграммы направленности стенда к югу на 12° в плоскости геомагнитного меридиана. На этих снимках координаты пикселей изображения преобразованы в географические координаты (широта отложена по вертикали, долгота – по горизонтали). линиями изображены линии географической сетки, красными – проекции силовых линий магнитного поля на плоскость кадра в месте расположения камеры КЕО. Видно, что в

разных участках небосвода имеет место появление областей генерации ИОС и подавления фонового свечения. Согласно [3], яркое пятно ИОС появляется в области магнитного зенита, на луче зрения камеры, расположенной непосредственно на стенде, направленном вдоль геомагнитного поля. Область подавления фонового свечения смещена к северу от пятна свечения. Впервые такое одновременное появление пятен ИОС и смещенных к северу областей подавления отмечалось в [14].

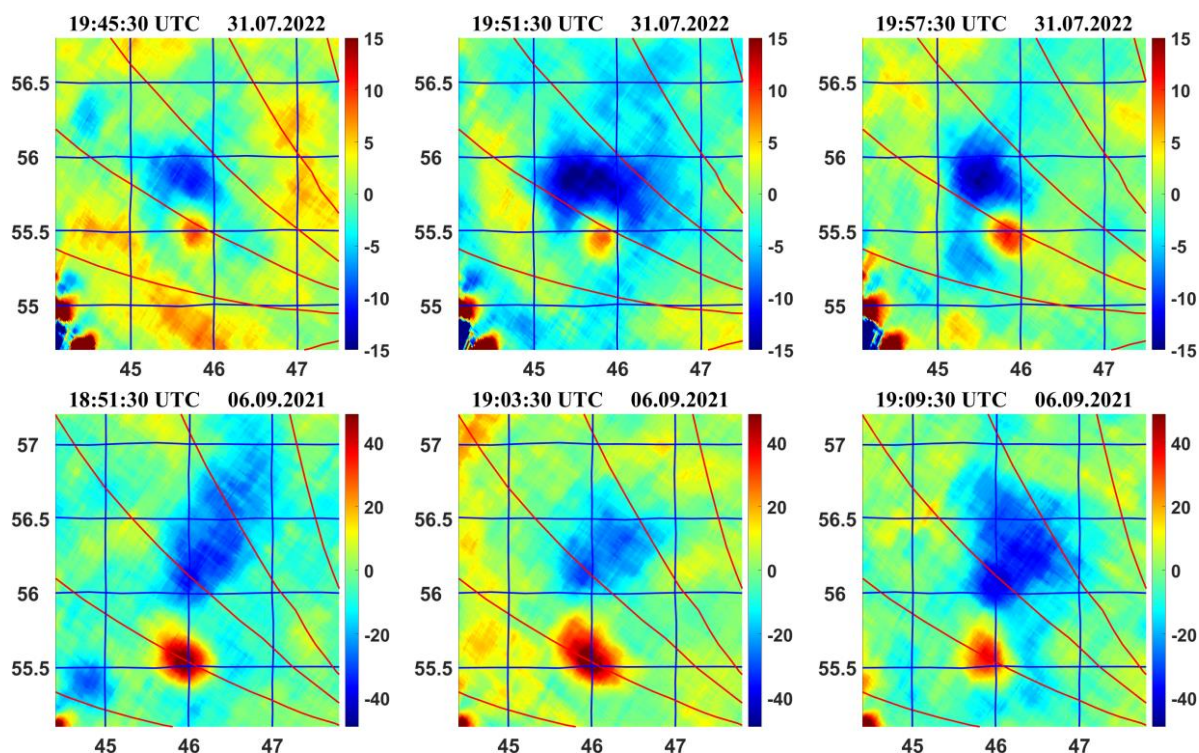


Рис. 2

В силу большого расстояния между регистрационными пунктами существование удачных условий для регистрации свечения (облачный покров) в различных пунктах оказывается весьма редким явлением. Так в течение двух кампаний 2021 г. не было ни одного сеанса воздействия, когда эффект генерации ИОС (либо эффект подавления фона) наблюдался сразу в трех пунктах. В то же время, в нескольких сеансах эффекты генерации или подавления наблюдались одновременно в регистрационных пунктах СУРА и Магнитная обсерватория КФУ.

Пример такой одновременной регистрации ИОС представлен на рис. 3, пример одновременного подавления – на рис. 4.

По предварительным результатам моделирования, проведенного по методике, изложенной в [11], высота центра пятна свечения составляла в сеансе 05.09.21 ~270 км (что примерно соответствовало высоте плазменного резонанса), а ее радиус – 30 км. размер области подавления 10.08.21 составлял 13 км, а высота ~230 км.

В эксперименте 01.08.22 погодные условия были более удачными и ИОС удалось зарегистрировать во всех трех пунктах наблюдения, хотя, по-видимому, прозрачность атмосферы, и, следовательно, яркость изображений на снимках, были различными. Примеры регистрации портретов ночного неба в красной линии приведены на рис. 5 и 7. Красными прямоугольниками внизу рисунков отмечено время работы стенда СУРА, синим отрезком – время экспозиции снимка.

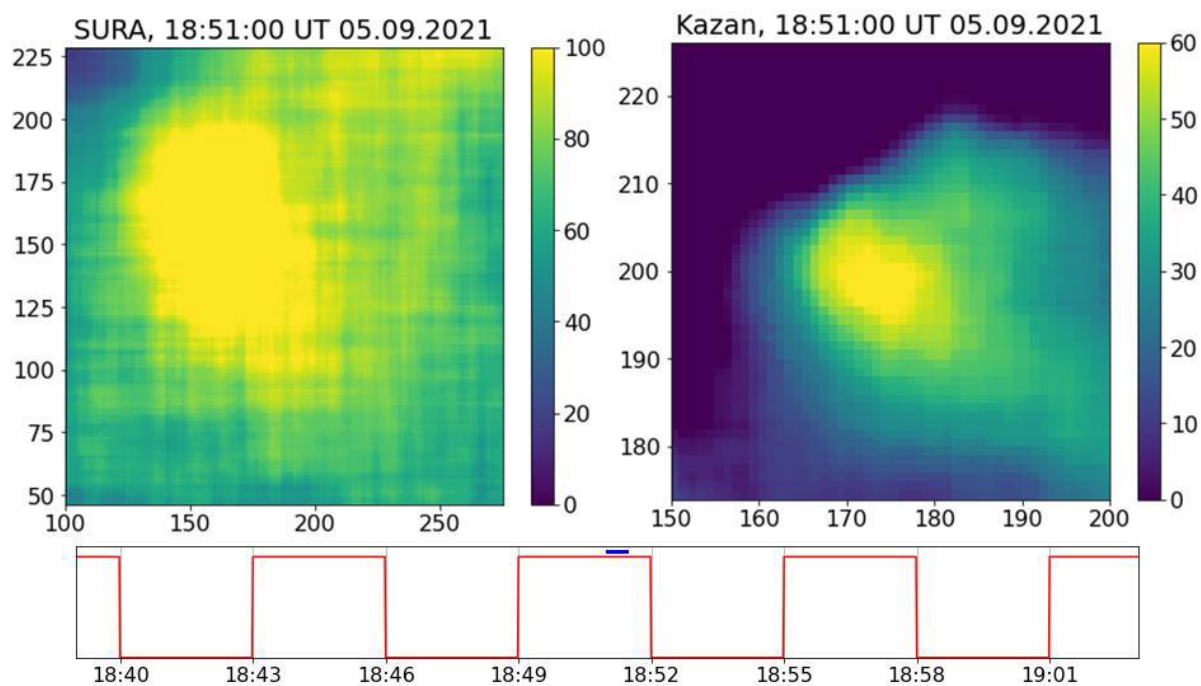


Рис. 3

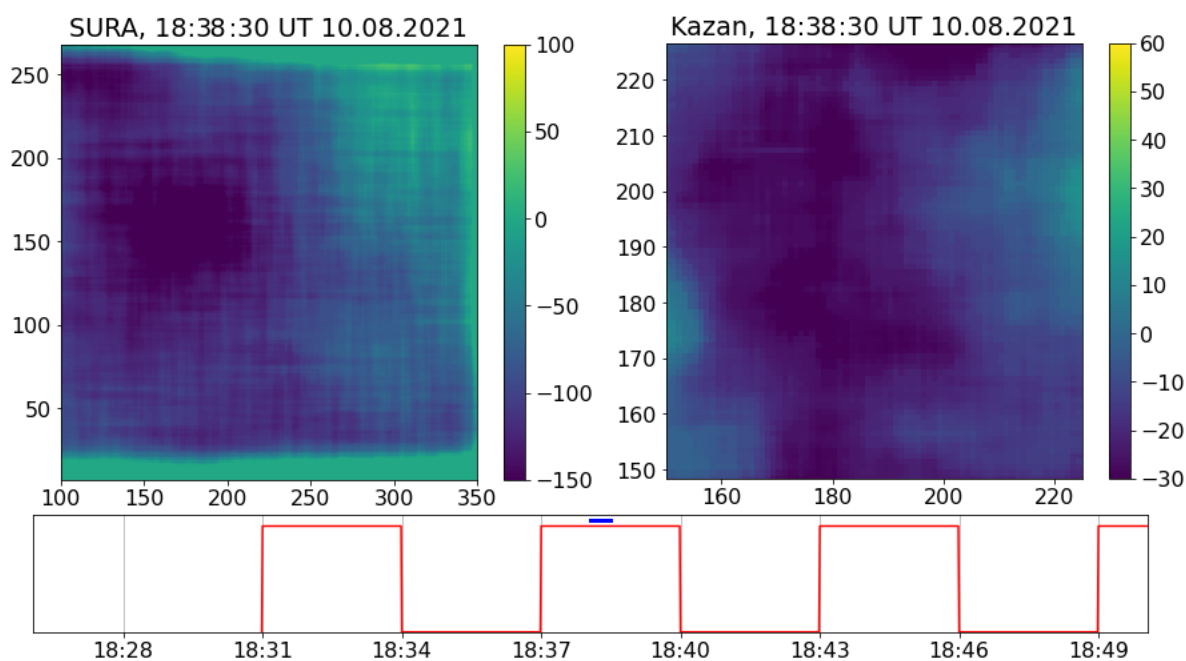


Рис. 4

Следует отметить, что изображения на рис. 1 (верхняя левая панель) и рис. 6 (левая панель) зарегистрированы камерой КЕО в одно и то же время. Однако, появление интенсивных полос свечения, вытянутых вдоль геомагнитного поля, на изображении, приведенном на рис. 1, не различается. Это связано с различной шириной медианного фильтра, использовано при обработке.

Дальнейшей задачей при анализе трех изображений, полученных с разных направлений и под разными углами зрения является установка соответствия между различными пятнами на снимках. В результате анализа такое соответствие было установлено. Оно показано на рис. 5 и 6 красными стрелками. В настоящее время

проводится моделирование с целью восстановления крупномасштабной структуры пятен свечения в области ионосферы, возмущенной мощным радиоизлучением.

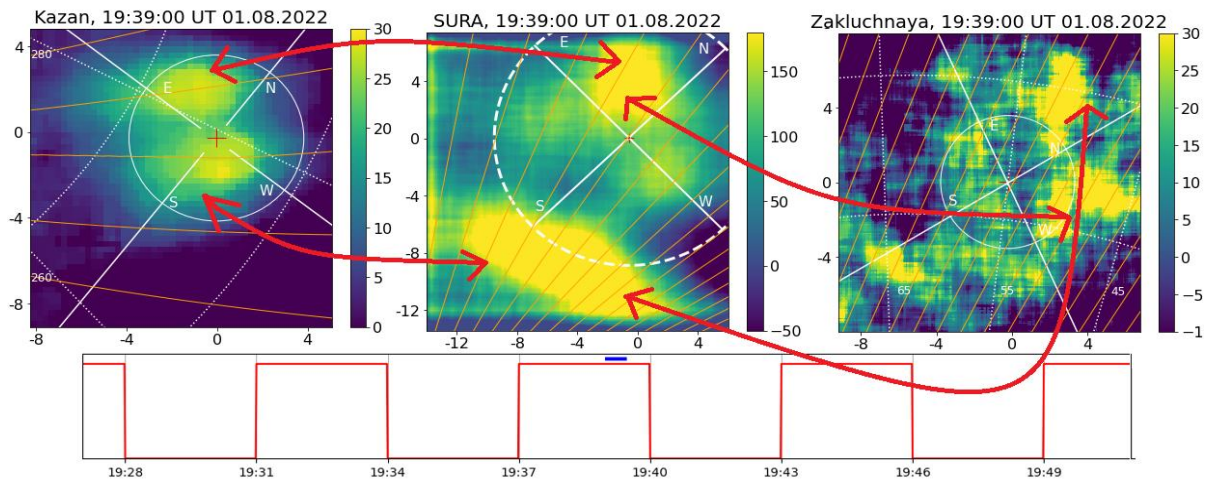


Рис. 5.

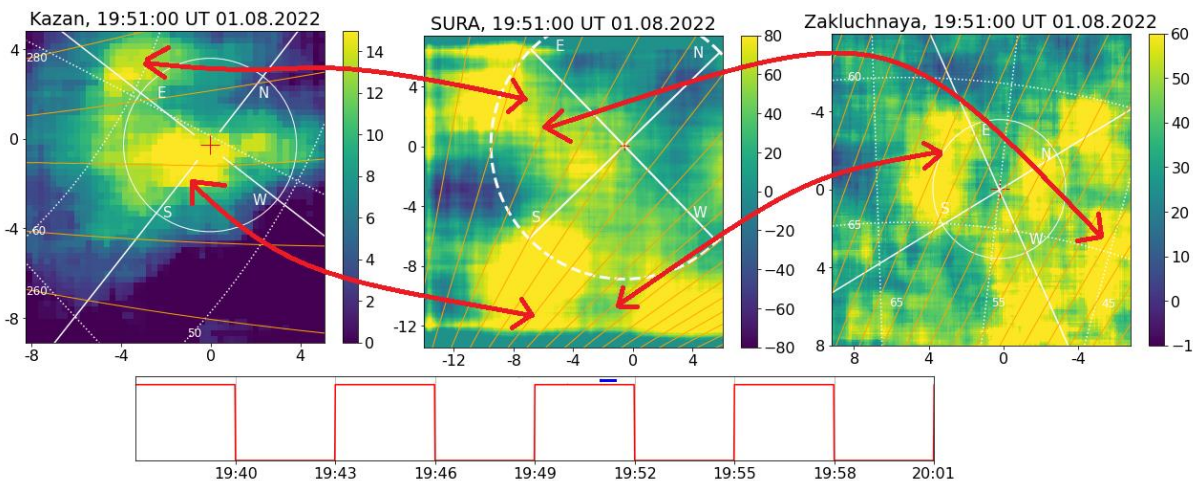


Рис. 6.

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

Литература

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере// Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145 -1172.
2. Грач С М, Сергеев Е Н, Мишин Е В, Шиндин А В. Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированной воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения// Успехи физ. Наук, 2016, Т. 186, № 11. С.1189–1228.
3. Грач С. М, В. В. Клименко, А. В. Шиндин, И. А. Насыров, Е. Н. Сергеев, В. А. Яшнов, Н. А. Погорелко. Оптическое свечение при воздействии на ионосферу радиоизлучением стенда «СУРА»: результаты экспериментов 2010 года// Известия вузов. Радиофизика. 2012. Т.55, №1-2. С. 36-56.
4. M.J. Kosch, T. Pedersen a, M.T. Rietveld d, B. Gustavsson, S.M. Grach, T. Hagfors. Artificial optical emissions in the high-latitude thermosphere induced by powerful radio waves: An observational review// Advances in Space Research (2007), V. 40. P. 365–376.

5. Gustavsson, B., Sergienko, T., Rietveld, M.T., Honary, F., Steen, A., BraËndstroËm, B.U.E., Leyser, T.B., Aruliah, A.L., Aso, T., Ejiri, M., Marple, S. First tomographic estimate of volume distribution of HF pump enhanced airglow emission. *J. Geophys. Res.* (2001) 106, 29105–29124.
6. Gustavsson, B., Sergienko, T., Kosch, M.J., Rietveld, M.T., BraËndstroËm, B.U.E., Leyser, T.B., Isham, B., Gallop, P., Aso, T., Ejiri, M., Grydeland, T., Steen, A., LaHoz, C., Kaila, K., Jussila, J., Holma, H. The electron distribution during HF pumping, a picture painted with all colours. *Ann. Geophys.* (2005) 23, 1747–1754.
7. Blagoveshchenskaya, N. F., T. D. Borisova, M. Kosch, T. Sergienko, U. Bräändström, T. K. Yeoman, and I. Häggström (2014), Optical and ionospheric phenomena at EISCAT under continuous X-mode HF pumping, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, doi:10.1002/2014JA020658.
8. Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. Особенности возбуждения искусственной ионосферной турбулентности при O- и X-нагреве вблизи критической частоты слоя F2. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 1. С. 22–32. DOI: 10.12737/szf-91202303.
9. Клименко В. В., С.М. Грач, Е.Н. Сергеев, А.В. Шиндин. Характеристики искусственного свечения ионосферы при омическом нагреве и при ускорении электронов плазменной турбулентностью, инициированными мощным радиоизлучением стенда «СУРА» // *Известия вузов. Радиофизика*. 2017, Т.60, № 6, С. 481-501.
10. Легостаева Ю. К., А. В. Шиндин, С. М. Грач. Реакция фонового оптического свечения ионосферы на нагрев мощным радиоизлучением // *ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ*, 2021, том 61, № 3, с. 379–389
11. Шиндин А. В, В.В. Клименко, Д.А. Когогин, А.Б. Белецкий, С.М. Грач, И.А. Насыров, Е.Н. Сергеев. Пространственные характеристики области генерации искусственного свечения ионосферы в линии 630 нм при воздействии радиоизлучением стенда «СУРА» // *Известия вузов. Радиофизика*. 2017. Т.60, №11. С. 949-966.
12. Шиндин А. В, С. М. Грач, В .В. Клименко, И.А. Насыров, Е.Н. Сергеев Д.А. Когогин, А.Б. Белецкий, М. А. Тацилин, Р. И. Гумеров. Оптическое свечение на длинах волн 630 и 557,7 нм при воздействии на ионосферу коротковолновым излучением стенда "СУРА" в области 4-й гармоники электронного гирорезонанса// *Известия вузов. Радиофизика*. 2014. Т.57, №11. С. 849-864.