

## **Предварительные результаты фотометрии эмиссий атомарного кислорода 557,7 и 630 нм, индуцированных радиоизлучением стенда “Сура”**

А.Б. Белецкий<sup>1</sup>, И.Д. Ткачев<sup>1</sup>, И.А. Насыров<sup>2</sup>, С.М. Грач<sup>3</sup>, Д.А. Когогин<sup>2</sup>, А.В. Шиндин<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН

г. Иркутск, 664033, Россия.

E-mail: [beletsky@mail.iszf.irk.ru](mailto:beletsky@mail.iszf.irk.ru)

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет

г. Казань, 420008, Россия.

E-mail: [igor.nasyrov@gmail.com](mailto:igor.nasyrov@gmail.com)

<sup>3</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

г. Нижний Новгород, 603950, Россия.

E-mail: [sgrach@rf.unn.ru](mailto:sgrach@rf.unn.ru)

*В работе представлены результаты предварительного анализа данных экспериментальной кампании 2021 г по регистрации свечения ионосферы, индуцированного мощным коротковолновым излучением стенда “Сура”. Оптические измерения проводились, в том числе, с помощью инструментов ИСЗФ СО РАН, расположенных непосредственно рядом со стендом “Сура” и в 170 км к востоку от стенда в магнитной обсерватории Казанского федерального университета. Проведены измерения быстрых вариаций интенсивности атмосферных эмиссий 557.7 нм, 630 нм и 391.4 нм с помощью трехканального фотометра и пространственно-временных вариаций эмиссий 557.7 нм и 630 нм с помощью ПЗС камер. Зарегистрировано увеличение интенсивности эмиссии 557.7 нм, индуцированного радиоизлучением стенда, во время развития спорадического E слоя с одновременным блокированием нагрева F области ионосферы. Впервые для стенда “Сура” удалось получить кадры перемещающихся областей увеличенной интенсивности атмосферной эмиссии 557.7 нм на высотах слоя Es.*

*Ключевые слова: активные эксперименты, ионосфера, атмосферные эмиссии*

## **Preliminary results from the analysis of the data of artificial airglow photometry of the ionosphere in the optic lines of 557.7 and 630 nm atomic oxygen stimulated by powerful radio emission of the “Sura” facility**

A.B. Beletsky<sup>1</sup>, I.V. Tkachev<sup>1</sup>, I.A. Nasyrov<sup>2</sup>, S.M. Grach<sup>3</sup>, D.A. Kogogin<sup>2</sup>, A.V. Shindin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Solar-Terrestrial physics of Siberian branch of Russian academy of sciences

<sup>2</sup> Kazan Federal University

<sup>3</sup> Lobachevsky State University

*The paper presents preliminary analysis of the data obtained during the 2021 experimental campaign on the ionospheric glow registration induced by powerful high-frequency radiation of the “Sura” facility. Optical measurements, among other things, were carried out using ISTP SB RAS instruments located directly next to the “Sura” facility and 170 km from the facility to the East at the magnetic observatory of Kazan Federal University. Fast variations measurements in the atmospheric emissions intensity at 557.7 nm, 630 nm and 391.4 nm were carried out using a three-channel photometer and spatio-temporal variations of emissions at 557.7 nm and 630 nm using CCD cameras. An increase in the intensity of the*

*557.7 nm emission induced by the “Sura” radiation was recorded during the sporadic E layer development with simultaneous blocking of the F region heating of the ionosphere. For the first time, for the “Sura” facility, it was possible to obtain frames of moving regions of increased intensity of the 557.7 nm atmospheric emission at the Es layer heights.*

*Keywords: active experiments, ionosphere, atmospheric emission*

## **Введение**

В августе и сентябре 2021 года были проведены две экспериментальные кампании по регистрации свечения ионосферы, индуцированного мощным коротковолновым радиоизлучением стенда “Сура”. С 5 по 10 сентября проводилась регистрация интенсивности атмосферных эмиссий атомарного кислорода 557.7 нм и 630.0 нм с помощью ПЗС камер и фотометров. Кроме этого, с помощью фотометра регистрировалась эмиссия  $\text{INGN}_2^+$  (0-0) 391.4 нм.

## **Постановка эксперимента**

В эксперименте использовались оптические инструменты ИСЗФ СО РАН:

1. Оптическая система Keo Sentinel, предназначенная для регистрации пространственной картины интенсивности эмиссии 630 нм. Поле зрения 145 градусов, время экспозиции 27 с. Полуширина пропускания интерференционного фильтра ~2 нм. Оптическая система была установлена на территории магнитной обсерватории Казанского федерального университета (КФУ) (55.56° с.ш., 48.45° в.д.) в 170 км к востоку от стенда “Сура”.

2. Непосредственно рядом со стендом “Сура” (~850 м от антенной системы стенда) был установлен фотометрический макет, предназначенный для регистрации быстрых вариаций интенсивности атмосферных эмиссий. Макет включает в себя 3-х каналный фотометр (каналы с центром пропускания интерференционных фильтров 391.4 нм, 557.7 нм и 630 нм. Полуширины фильтров 10 нм) и ПЗС-камеру с полем зрения ~17° (фильтр с центром пропускания 557.7 нм и полушириной 10 нм). Временное разрешение каналов фотометра 10 мс. Диаметр катода фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) - 25мм. ФЭУ оснащен счетчиком фотонов, высоковольтной цепью питания и микропроцессором. Рабочий спектральный диапазон ФЭУ от 300 нм до 850 нм с пиком чувствительности на 420 нм. Поле зрения фотометра ~10°.

Кроме вышеперечисленных инструментов в эксперименте использовались две ПЗС камеры Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ) с интерференционными светофильтрами 630 нм (полуширина полосы пропускания ~10 нм). Камеры были установлены рядом со стендом “Сура” и в пункте наблюдения Перевоз (55.36° с.ш., 44.33° в.д. удаление ~115 км). Для контроля параметров ионосферы использовались данные вертикального ионозонда, расположенного рядом со стендом “Сура”.

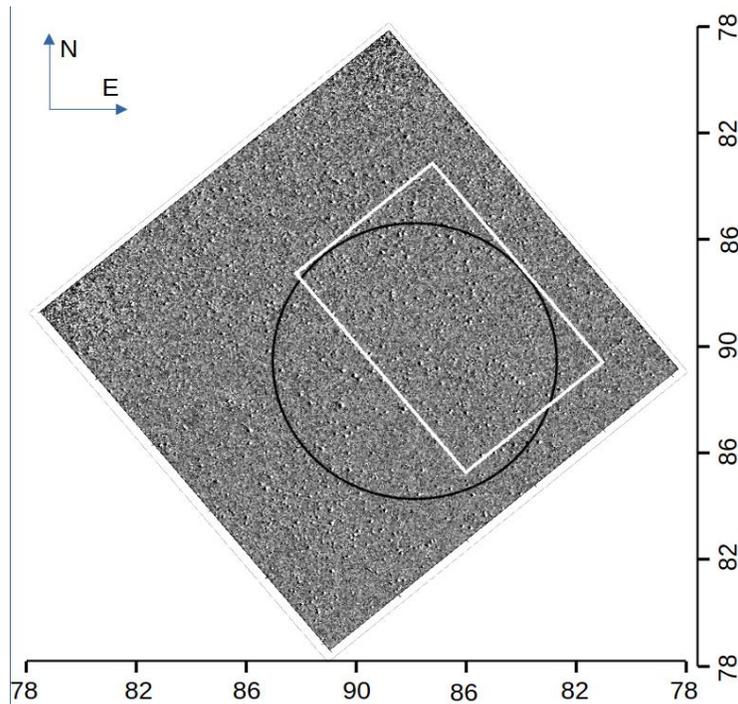
Запуск всех участвующих в эксперименте ПЗС камер производился синхронно в нулевую и тридцатую секунду с экспозицией 27 с (мертвое время между кадрами 3 с).

На рис. 1а показана оптическая система КЕО Sentinel, установленная на крыше здания в магнитной обсерватории КФУ. На рис. 1б и рис. 1в представлен общий вид фотометрического макета, установленного рядом со стендом “Сура”.



**Рис. 1. Общий вид оптической системы KEO Sentinel (а) и фотометрического макета, состоящего из 3-х канального фотометра и ПЗС камеры 557.7 нм (б, в).**

На рис. 2 приведен кадр ПЗС камеры 557.7 нм фотометрического комплекса и поле зрения канала фотометра 557.7 нм (черная окружность).

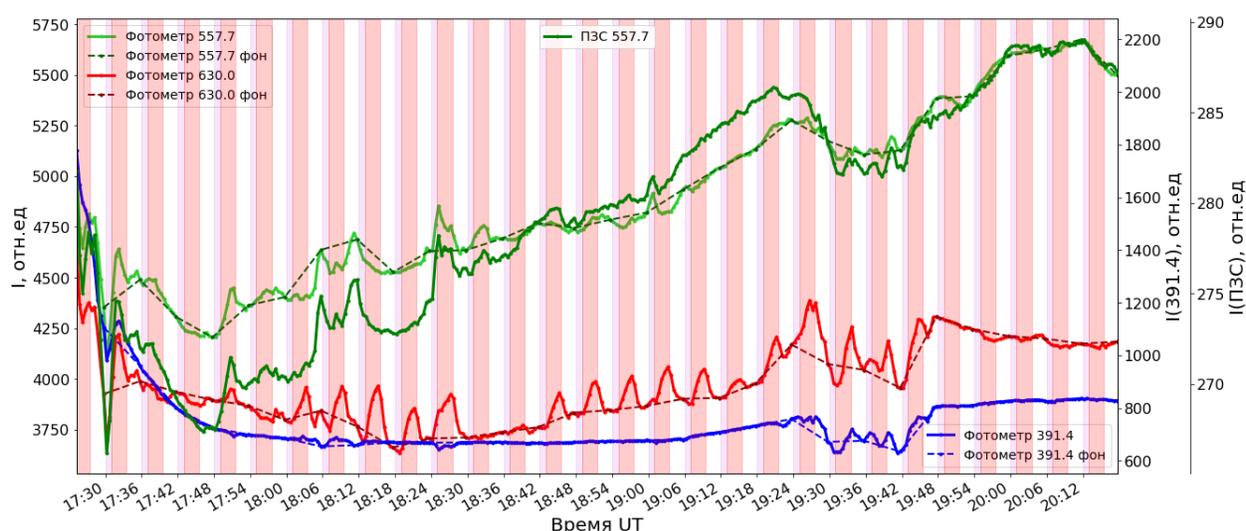


**Рис. 2. Кадр ПЗС камеры фотометрического макета, сориентированный по сторонам света. По осям отложены углы места (зенит -  $90^\circ$ ). Черным кругом обозначено поле зрения канала 557.7 нм фотометра. Белый прямоугольник - область с наибольшей реакцией на нагрев во время развития слоя Es.**

## Результаты измерений

В настоящей работе основное внимание уделено предварительному анализу данных, полученных с помощью фотометрического макета. Детальный анализ с привлечением данных всего комплекса оборудования и интерпретация полученных результатов предстоят в дальнейшем.

На рис. 3 приведены временные ряды интенсивности эмиссий 557.7 нм и 630 нм, зарегистрированные с помощью фотометрического макета 5 сентября 2021 г. Режим работы стенда “Сура” в эту ночь наблюдений был следующий: один рабочий цикл занимал 6 минут: 1-я минута - импульсы (длительность импульса 50 мс., период повторения - каждые 3 секунды), потом 2.5 минуты непрерывный нагрев, после - 2.5 минуты пауза. Частота радиоизлучения 4.3 МГц. Диаграмма направленности стенда была ориентирована вертикально вверх. Расчетная эффективная мощность излучения стенда ~100 МВт.



**Рис. 3. Данные ПЗС камеры 05.09.2021, усредненные по всему кадру (поле зрения ~17 градусов) и данные каналов фотометра 557.7 нм, 630 нм и 391.4 нм. Интегрирование данных фотометра по экспозиции ПЗС камеры (27 с). Пунктиром показан тренд соответствующих каналов фотометра. Цветом выделены периоды излучения импульсов и периоды непрерывного нагрева стенда “Сура”.**

На рис. 4 показаны вариации интенсивностей эмиссий 557.7 нм и 630 нм по данным фотометрического макета 5 сентября 2021 г с удаленным трендом. Для ПЗС камеры и для каналов фотометра тренд рассчитывался по одинаковой схеме. Для ПЗС камеры были получены опорные кадры, для фотометра усредненные за 27 с (соответствует экспозиции камеры) значения интенсивности. Опорные точки выбирались для моментов времени перед включением нагрева стенда. То есть в моменты времени с минимальным влиянием излучения стенда на ионосферу. Далее для каждого момента времени между двумя опорными точками рассчитывалось значение фона  $I_b$ .

(1)

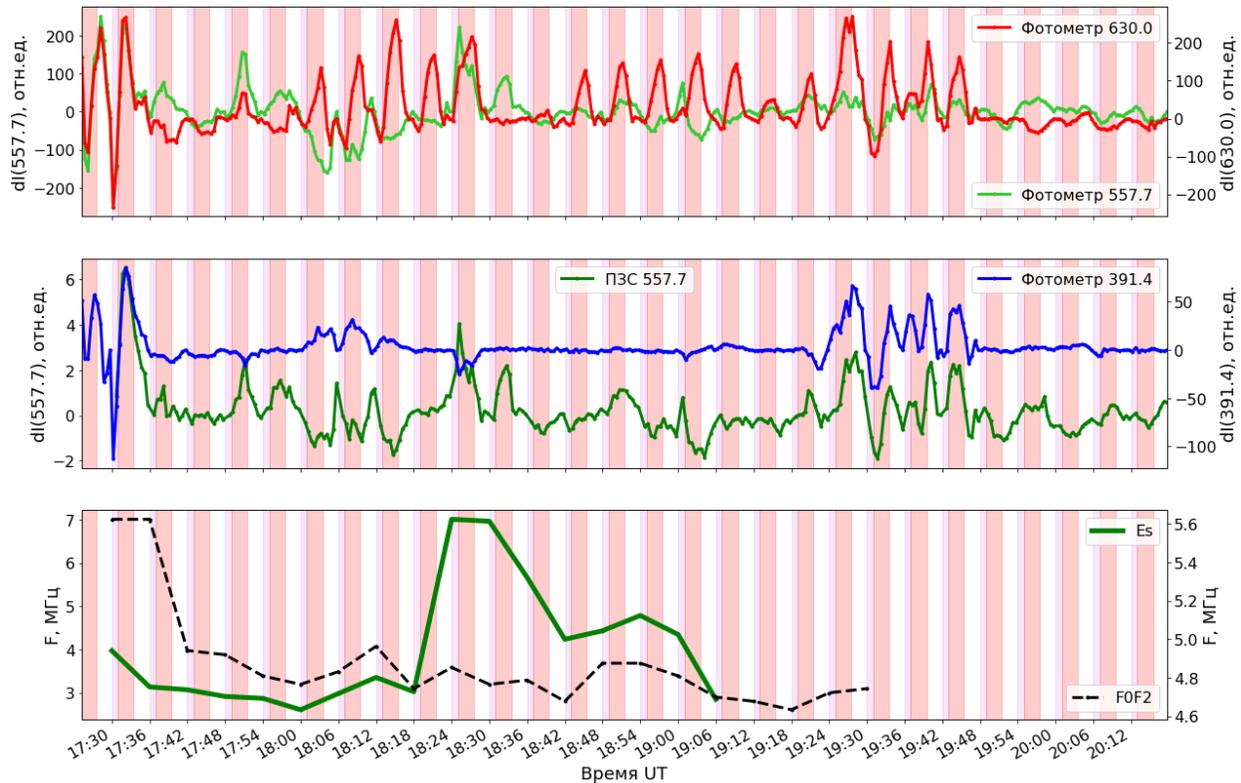
$$I_b = k_0 * I_{b0} + k_1 * I_{b1},$$

где  $I_{b0}$  - интенсивность опорной точки или кадр перед текущим циклом нагрева;  
 $I_{b1}$  - интенсивность опорной точки или кадр перед следующим циклом нагрева

$$k_0 = (t - t_0)/(t_1 - t_0), \quad (2)$$

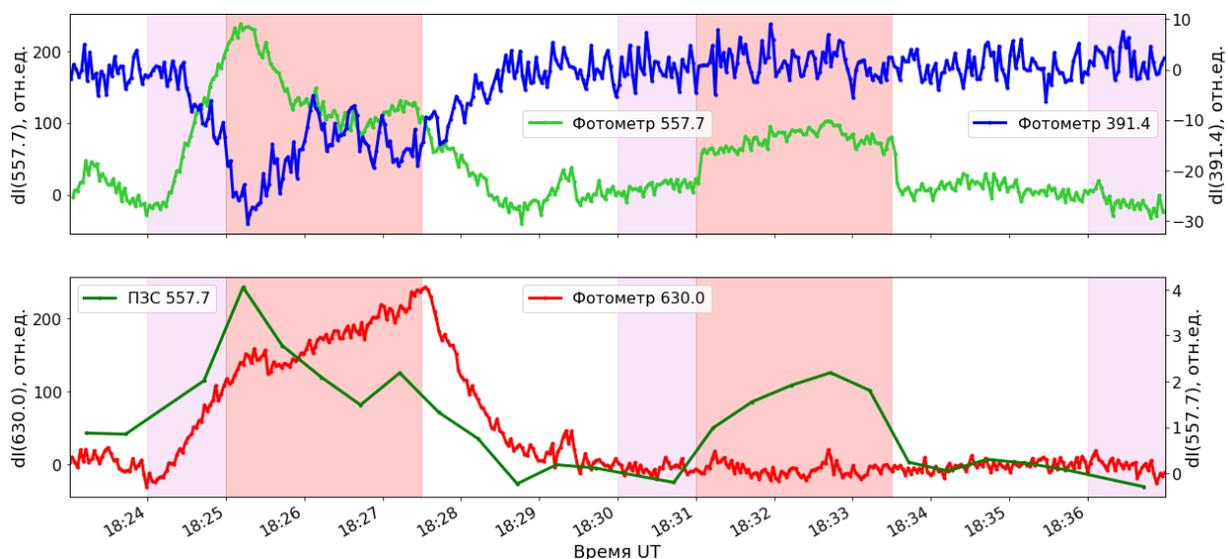
$$k_1 = (t_1 - t)/(t_1 - t_0), \quad (3)$$

где  $t$  - Время текущего отсчета  $I_b$ ;  
 $t_0$  - время опорного кадра  $I_{b0}$ ;  
 $t_1$  - время опорного кадра  $I_{b1}$



**Рис. 4. Вариации интенсивности свечения ночного неба в эмиссии 557.7 нм и 630 нм по данным фотометра с удаленным трендом (верхняя панель) за 05.09.2021. Интегрирование данных фотометра по экспозиции ПЗС камеры (27 с). На средней панели временной ход эмиссии 557.7 нм полученный с помощью ПЗС камеры (усреднение по области кадра (см. рис. 2), тренд удален), и эмиссии 391.4 нм по данным фотометра. На нижней панели критические частоты  $E_s$  и  $f_oF_2$ .**

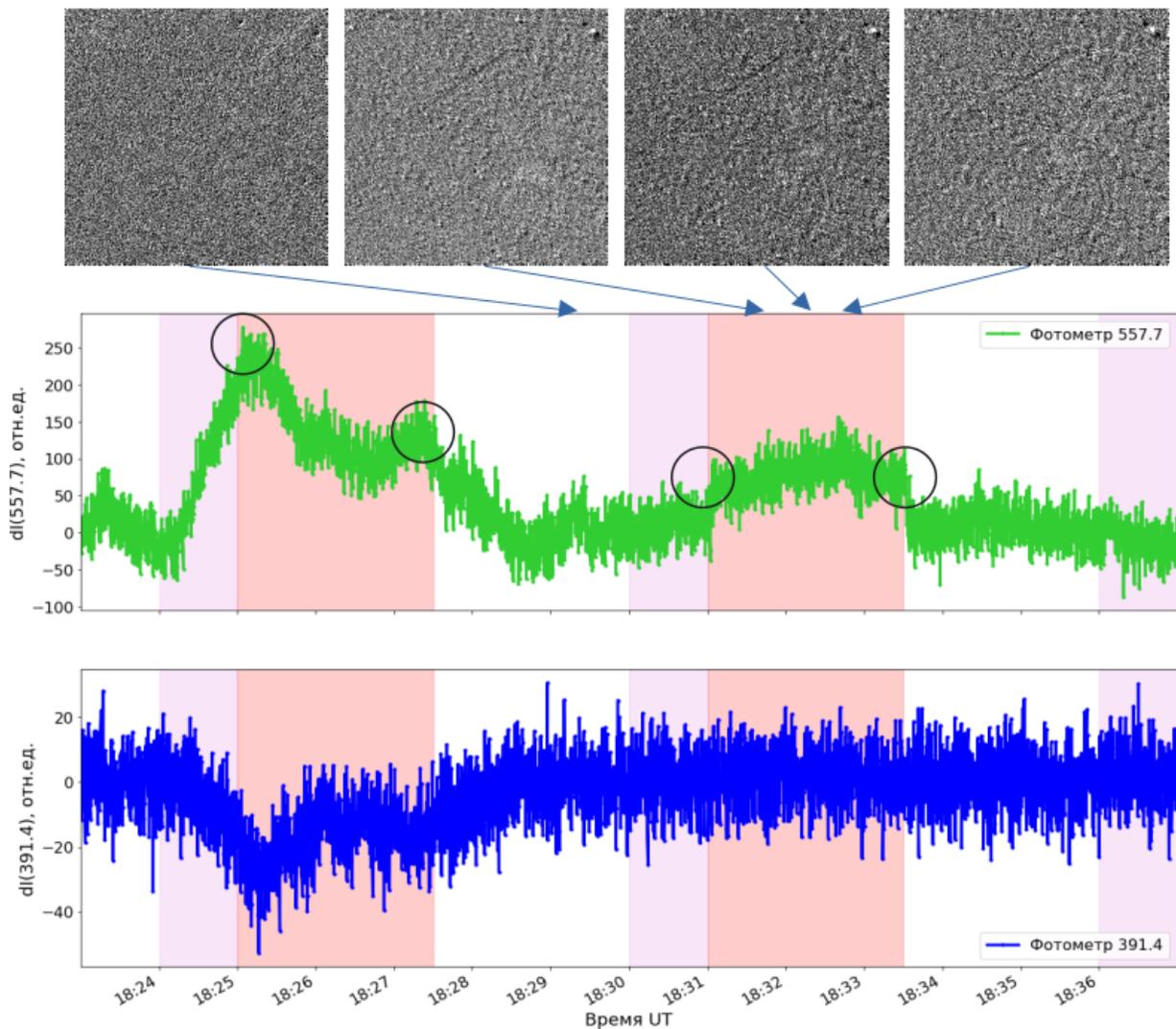
5 сентября 2021 г практически все время эксперимента наблюдается типичное поведение эмиссии 630 нм, обусловленное воздействием радиоизлучением стенда в F области ионосферы. Отличия наблюдаются во время циклов нагрева в 18:30 UT и 18:36 UT, которые скорее всего связаны с экранированием спорадическим E слоем.  $E_s$  слой с критической частотой значительно выше частоты излучения стенда 4.3 МГц наблюдался в это время по данным ионозонда (рис. 4). Также в цикле с началом непрерывного нагрева ионосферы радиоизлучением стенда в 18:31 UT зарегистрировано резкое увеличение интенсивности эмиссии 557.7 нм одновременно на фотометре и ПЗС камере (рис. 5).



**Рис. 5. Вариации интенсивности атмосферных эмиссий 391.4 нм, 557.7 нм и 630.0 нм по данным фотометра (интегрирование по времени 1 с) 05.09.2021 а также вариации интенсивности эмиссии 557.7 нм по данным ПЗС камеры (усреднение по области кадра, см. рис. 2). Цветом обозначены периоды включения стенда “Сура”.**

В цикле нагрева с 18:24 UT по 18:27:30 UT наблюдаются вариации интенсивности эмиссий, предположительно обусловленных появлением прозрачной дымки. На это указывает снижение интенсивности канала 391.4 нм фотометра при одновременном увеличении интенсивности эмиссий 557.7 нм и 630 нм. В среднеширотной верхней атмосфере в обычных условиях эмиссия 391.4 нм не наблюдается. Она характерна для полярных сияний при высыпаниях высокоэнергичных частиц [1] а также может наблюдаться при нагреве ионосферы мощным радиоизлучением [2]. То есть при возникновении дымки излучение ночного неба, регистрируемое в этом спектральном диапазоне, снизится. Атмосферные эмиссии 557.7 нм и 630 нм в средних широтах высвечиваются всегда. При возникновении дымки возможен эффект рассеяния на ней излучения со всей верхней полусферы. Соответственно, в таком случае фотометр регистрирует не только излучение атмосферы в его поле зрения, но и рассеянное на дымке излучение атмосферных эмиссий вне его поля зрения.

На рис. 6 более детально показаны вариации интенсивности эмиссий 557.7 нм и 630 нм с временным интегрированием 100 мс. Окружностями на рис. 6 выделены моменты времени включения и выключения непрерывного нагрева стенда. В обоих рассматриваемых циклах можно отметить схожее резкое изменение интенсивности в рассматриваемые моменты времени. Это может указывать на наличие увеличения интенсивности эмиссии 557.7 нм в цикле нагрева 18:24 UT - 18:27:30 UT, вызванного излучением стенда “Сура”, на фоне изменения прозрачности атмосферы.



**Рис. 6. Вариации интенсивности эмиссий 557.7 нм и 391.4 нм по данным фотометра 05.09.2021. Интегрирование по времени 100 мс. На кривой вариаций эмиссии 557.7 нм окружностями показаны моменты резкого изменения интенсивности во время включения/выключения непрерывного нагрева стэнда. В верхней панели приведены кадры ПЗС камеры 557.7 нм.**

ПЗС камера зарегистрировала слабые перемещающиеся пятна во время непрерывного излучения стэнда в цикле 18:31 UT - 18:33:30 UT. Кадры приведены в верхней панели рис. 6.

По данным работы [2] излучение линий атомарного кислорода 557.7 нм и 630 нм при воздействии мощных радиоволн на ионосферу в области F-слоя наблюдалось многократно на всех мощных станциях начиная со стэнда в Платтевилле. При этом интенсивность излучения в зеленой линии слабее, чем в красной. У красной линии низкий минимальный уровень возбуждения электронным ударом (1,96 эВ). Зеленая линия имеет более высокий минимальный потенциал возбуждения (4,17 эВ), зато высвечивается с очень малой задержкой. Так что свечение зеленой линии определяется только ее возбуждением ударами электро-нов [2]. Наблюдения с улучшенными оптическими приборами

показывают [3], что усиление интенсивности эмиссии 557.7 нм регулярно достигает 10–30% усиления эмиссии 630 нм.

### **Обсуждение результатов**

В экспериментальных кампаниях на стенде “Сура” регистрация индуцированного излучения эмиссии 557.7 нм на высотах F-слоя ионосферы происходила в единичных случаях с использованием фотометров с ФЭУ [4-7]. Увеличение интенсивности излучения эмиссии 557.7 нм на высотах спорадического слоя E в экспериментах на стенде “Сура” ранее не регистрировалось. В работах [8,9] представлены результаты эксперимента января 1998 в Аресибо, в ходе которого удалось единственный раз зарегистрировать изображение пятен увеличенной интенсивности на высотах Es слоя при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением. При этом усиление свечения было больше, чем при воздействии на F область ионосферы.

В работе [10] предполагается, что с помощью регистрации перемещающихся пятен излучения можно проследить горизонтальные нейтральные ветры вблизи высоты Es, поскольку движения плазмы в области E в основном обусловлены нейтральными движениями. Руководствуясь этой методикой, можно грубо оценить предполагаемую скорость нейтрального ветра на высоте слоя Es. 5 сентября 2021 г с 18:32 UT до 18:33 UT наблюдаемое на ПЗС камере 557.7 нм пятно переместилось на  $\sim 2.5^\circ$ . Для высоты 100 км это соответствует перемещению на  $\sim 4.4$  км за 60 с. Соответственно предполагаемая скорость нейтрального ветра  $\sim 70$  м/с. Направление на северо-запад (азимут  $\sim 320^\circ$ ).

В дальнейшем предстоит тщательный анализ данных всего комплекса использовавшегося в экспериментальной кампании 2021 года оборудования с привлечением спутниковых данных и данных о сопутствующей геофизической обстановке.

*Экспериментальные данные получены при финансовой поддержке гранта РФФИ №20-12-00197 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.*

*Анализ данных проведен при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).*

### **Литература**

1. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю., Излучение верхней атмосферы– индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с. ISBN 5-89118-330-7
2. Гуревич, А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. – № 11. – С. 1145-1178. – EDN IEZWPP.
3. Gustavsson B., Sergienko T., Kosch M.J., Rietveld M.T., Brändström 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 energy distribution during HF pumping, a picture painted with all colors // Annales Geophysicae, 23, 1747–1754, 2005
4. Гумеров Р.И., Капков В.Б., Комраков Г.П., Насыров А.М., "Искусственное свечение ионосферы при кратковременном воздействии мощного радиоизлучения," // Известия вузов. Радиофизика, Т. 42, № 6, 1999. С. 524- 527
5. Grach S.M., Sergeev E.N., Nasyrov A.M., Gumerov R.I., Shaimukhametov R.R., Nasyrov I.A., Komrakov G.P. Simultaneous observations of the 557.7 nm airglow and stimulated electromagnetic emission during HF pumping of the ionosphere with diagnostic schedule: First results // Advances in

Space Research (includes Cospas Information Bulletin). – 2004. – Vol. 34. – No 11. – P. 2422-2427. – DOI 10.1016/j.asr.2003.08.070

6. Грач С.М., Клименко В.В., Шиндин А.В., Насыров И.А., Сергеев Е.Н., Яшнов В.А., Погорелко Н.А. Оптическое свечение при воздействии на ионосферу радиоизлучением стенда "Сура: результаты экспериментов 2010 года // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 1-2. – С. 36-56.

7. Насыров И.А., Грач С.М., Гумеров Р.И., Клименко В.В., Шиндин А.В., Насыров А.М. Предварительные результаты измерений стимулированного 137 свечения ионосферы в зеленой линии оптического спектра (557.7 нм) при коротких временах воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура» // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Материалы V Всероссийской научной конференции. Муром. 2012. С. 82-86.

8. Djuth F.T., Bernhardt P.A., Tepley C.A., Gardner J.A., Kelley M.C., Broadfoot A.L., Kagan L.M., Sulzer M.P., Elder J.H., Selcher C., Isham B., Brown C. and Carlson H.C. Large airglow enhancements produced via wave-plasma interactions in sporadic E // Geophys. Res. Lett., 26, 1557–1560, 1999.

9. Kagan L.M., Kelley M.C., Garcia F., Bernhardt P.A., Djuth F.T., Sulzer M.P., Tepley C.A. The structure of electromagnetic wave-induced 557.7-nm emission associated with a sporadic- E event over Arecibo // Phys Rev Lett. 2000 Jul 3;85(1):218-21. doi: 10.1103/PhysRevLett.85.218.

10. Kagan L.M., Bakhmet'eva N.V., Belikovich V.V. and Tolmacheva A. V. Structure and dynamics of sporadic layers of ionization in the ionospheric E region // RADIO SCIENCE, VOL. 37, NO. 6, 1106, doi:10.1029/2001RS002534, 2002