

Общий регрессионный и корреляционный анализ экспериментальных данных по искусственному свечению ионосферы, полученных на стенде СУРА в течении 24-го цикла солнечной активности

И.А. Насыров¹, В.О. Дементьев², Д.А. Когогин¹, А.В. Шиндин³, А.Б. Белецкий⁴

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18.

E-mail: Igor.Nasyrov@kpfu.ru

² АО «НПО Государственный институт прикладной оптики», 420000, г. Казань, ул. Липатова, 2, корп. 1.

³ Научно-исследовательский радиофизический институт, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950, г. Н. Новгород, ул. Большая Печорская, 25/12а.

⁴ Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291.

В работе приводятся результаты общего регрессионного и корреляционного анализа экспериментальных данных по искусственному свечению ионосферы в линии 630 нм, полученных на стенде СУРА в период 24-го цикла солнечной активности. Факторными признаками являются: разность критической частоты ионосферы и частоты волны накачки (Δf), толщина резонансного слоя ионосферы (Δh), высота отражения волны накачки (h), а также глобальные индексы гелио-геомагнитной активности (K_p ; A_p ; AE ; Dst ; RZ ; $F10.7$; W_p). Выявлено, что наиболее статистически значимыми факторами, влияющими на частоту появления и яркость пятна искусственного оптического свечения ионосферы, являются разность критической частоты ионосферы и частоты волны накачки (Δf), а также глобальный индекс ионосферной возмущённости (W_p).

Ключевые слова: ионосфера, искусственное оптическое свечение ионосферы, мощное радиоизлучение, стенд СУРА, общий регрессионный и корреляционный анализ, коэффициент корреляции, ионосферная погода, индексы гелио-геомагнитной активности.

General regression and correlation analysis of experimental data on artificial airglow of the ionosphere collected over the 24th cycle of Solar activity at the SURA facility

I.A. Nasyrov¹, V.O. Dementiev², D.A. Kogogin¹, A.V. Shindin³, A.B. Beletsky⁴

¹ Kazan Federal University.

² JSC "Scientific and production amalgamation State Institute of Applied Optics".

³ N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod.

⁴ Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS.

The results of general regression and correlation analysis of experimental data on the artificial ionospheric airglow at the 630 nm line collected over the 24th cycle of solar activity at the SURA facility are presented. The components features are: the difference between the critical frequency of the ionosphere and the frequency of the pump wave (Δf) the thickness of the resonant layer of the ionosphere (Δh), the height of the reflection of the pump wave (h), as well as the global indices of helio-geomagnetic activity (K_p ; A_p ; AE ; Dst ; RZ ; $F10.7$; W_p). It was found that the most statistically significant factors affecting the frequency of occurrence and brightness of the spot of artificial ionospheric airglow are the difference between the critical frequency of the ionosphere and the frequency of the pump wave (Δf), as well as the global index of ionospheric disturbance (W_p).

Keywords: ionosphere, artificial ionospheric airglow, powerful radio emission, the SURA facility, general regression and correlation analysis, correlation coefficient, ionospheric weather, indices of helio-geomagnetic activity.

Введение

Эффективным методом исследования крупномасштабной структуры возмущённой области является измерение стимулированного свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода ($\lambda = 630$ нм), связанного с переходом электронов с уровня $O(^1D)$ в основное состояние $O(^3P)$. Потенциал возбуждения уровня $O(^1D)$, наиболее низкий из всех наблюдаемых линий стимулированного свечения, составляет 1.96 эВ, а его радиационное время жизни $\tau_r(O(^1D)) = 107$ с. Снимки возмущённой области ионосферы в линии 630 нм, сделанные при помощи ПЗС-камер с соответствующими светофильтрами, указывают на существование крупномасштабной структуры пятен стимулированного свечения с угловыми размерами порядка $1^\circ \div 10^\circ$ (что соответствует размерам $5 \div 50$ км на высотах $250 \div 280$ км над поверхностью Земли. В части исследования явления искусственного оптического свечения ионосферы на мировой сети нагревных стендов, в том числе и стенда СУРА, написано достаточно большое количество статей [1].

В настоящее время при изучении нелинейных явлений, появляющихся во время воздействия мощного радиоизлучения КВ-диапазона на $F2$ -слой ионосферы, с помощью оптического оборудования в части исследования искусственного оптического свечения получено: при наклоне диаграммы направленности антенны стенда СУРА на 12° в южном направлении в плоскости магнитного меридиана встречаются в наибольшей степени ионосферные возмущения и наибольшая интенсивность искусственного оптического свечения по сравнению с излучением вертикально в зенит [2]; с использованием портретов ночного неба с двух пространственно-разнесённых ПЗС-камер в работе [3] была получена трёхмерная модель пятна искусственного свечения ионосферы; в работах [4, 5] приводится методика и результаты анализа изменения полного электронного содержания ионосферы согласно экспериментальным данным с приёмников спутниковых сигналов, где представляется оценка изменения электронной концентрации в области диаграммы направленности антенной системы стенда СУРА во время воздействия волны накачки.

Однако достаточно мало информации имеется именно о статистике и связи интенсивности оптического свечения с параметрами космической и ионосферной погоды. В связи с этим возникла необходимость проведения оценки статистической связи интенсивности искусственного оптического свечения, стимулированного мощным радиоизлучением стенда СУРА, с ионосферными параметрами и различными гелиогеофизическими факторами.

Актуальность проведённого исследования обуславливается тем, что установление статистической связи между интенсивностью искусственного оптического свечения и остальными параметрами ионосферной погоды позволят более глубоко изучить физику взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой, а также наиболее эффективно планировать проведение новых экспериментальных компаний.

Формирование рядов данных к проведению статистического анализа

В период с 2009 по 2019 год (24-й цикл солнечной активности) на стенде СУРА было проведено восемнадцать экспериментальных кампаний, в которых было выполнено около ста пятидесяти сеансов наблюдений стимулированного свечения ионосферы с использованием ПЗС-камер. Однако только в шести сеансах были удовлетворены все необходимые условия для проведения успешных оптических

измерений: 15.03.2010, 17.03.2010, 12.03.2013, 24.08.2014, 26.08.2014, 29.08.2016. В 2009, а также в 2017–2019 годах, удачных сеансов регистрации искусственного свечения не было, что в первую очередь связано с минимумом солнечной активности, который наблюдался в указанные годы. Начиная с 2014 измерения искусственного оптического свечения ионосферы проводились из двух пространственно разнесённых пунктов: Магнитная обсерватория КФУ (140 км к востоку от стенда СУРА); радиополигон Васильсурск. Во время проведения оптических измерений состояние ионосферы контролировалось при помощи ионозондов Базис (2009, 2010 гг.) и CADI (2013–2019 гг.), расположенных в непосредственной близости от антенной системы стенда СУРА.

Во всех случаях воздействие на ионосферу осуществлялось циклами – нагрев-пауза. Длительность циклов воздействия варьировалась от 6 до 12 мин в различных экспериментальных компаниях: 2 мин – нагрев, 3 мин – пауза; 3 мин – нагрев, 3 – мин пауза; 4 мин – нагрев, 8 мин - пауза. Частота передатчиков f_0 подбиралась в диапазоне от 4.3 МГц до 5.64 МГц исходя из ионосферных условий ($f_0 \leq f_oF2$). Эффективная излучаемая мощность на выбранных частотах варьировалась в пределах от 65 до 120 МВт. При создании возмущённой области ионосферы использовалось КВ-радиоизлучение обыкновенной поляризации (О-волна). Длительность непрерывного нагрева превышала радиационное время жизни $\tau_{\text{O}}(^1D)$, то есть за время непрерывного нагрева интенсивность свечения в красной линии (630 нм) успевала достигнуть стационарного уровня.

Для каждого из перечисленных выше дней были выбраны подходящие циклы накачки, в которые искусственное оптическое свечение возникло синхронно с включением нагрева стенда и пропадало с отключением нагрева. Циклы, во время которых в кадры регистрирующей оптическое свечение аппаратуры попадали облака и прочие факторы, мешающие определению значения интенсивности, были исключены из рассмотрения. Кроме этого, в отдельных циклах были исключены некоторые кадры, в поле которых попадали метеоры. Таким образом, для формирования выборки по величине искусственного свечения ионосферы было отобрано 68 циклов накачки. Далее, с помощью методики, описанной в работе [3], для каждого дня была получена величина интенсивности искусственного оптического свечения ионосферы (b) в релях (Рл). Характерное время развития и релаксации свечения в красной линии 630 нм, по ранее проведённым фотометрическим измерениям, составляет порядка 90 и 20 с соответственно [6]. Таким образом, значение величины интенсивности свечения за один цикл накачки можно определить как среднее начиная с 90 с от начала включения до выключения волны накачки, как это показано на рис. 1.

Контроль состояния ионосферы в период проведения оптических измерений на стенде СУРА осуществлялся при помощи ионосферной станции. До 2011 г. на радиополигоне Васильсурск работал ионозонд «Базис-3», который в 2012 был заменён на ионозонд CADI. Ионозонд регистрировал ионограммы с периодичностью от 5 до 20 мин, в зависимости от программы измерений. В ряде случаев, для уточнения параметров ионосферной погоды, привлекались данные, полученные на ионозонде «Циклон» (п. Ореховка, Зеленодольский район, Республика Татарстан, ~170 км к востоку от стенда СУРА). Ионозонд «Циклон» регистрировал ионограммы с периодичностью 1 мин. Всего за шесть экспериментальных дней было обработано 743 ионограммы, из которых 23 по ионозонду «Базис-3», 107 по ионозонду CADI, и 613 по ионозонду «Циклон». Из ионограмм по методике, описанной в работе [7], для каждого цикла воздействия на ионосферу начиная с 90 секунды от начала и до конца интервала накачки, были получены усреднённые значения локальных ионосферных параметров (Δh , h , Δf).



Рис. 1. Формирование выборки для величины интенсивности свечения (b) за один цикл накачки. Интенсивность свечения b вычисляется как среднее между двумя точками на красной линии, указанными для каждого цикла воздействия (синяя линия). По данным за 15.03.2010 г.

Значения соответствующих гелиогеофизических индексов (D_{st} , A_p , K_p , AE , SN , $F_{10.7}$) для выбранных шести дней были получены через Мировой центр данных [8], а глобальный индекс возмущённости ионосферы доступен на сайте ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова [9].

Статистическая связь между величиной интенсивности свечения и основными индексами состояния ионосферной погоды

Для установления статистической взаимосвязи между величиной интенсивности искусственного оптического свечения (b), и локальными и глобальными ионосферными и гелиогеофизическими параметрами были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона, Спирмена и Кендала для уровня значимости $\alpha = 0.05$ (доверительный интервал 95%). Для примера на рис. 2 приведён корреляционный коэффициент Пирсона.

Из анализа гистограмм, приведённых на рис. 2 понятно, что наибольшее влияние на увеличение уровня интенсивности искусственного оптического свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода (b) оказывает планетарный индекс возмущённости ионосферы (W_p). Причём, с уменьшением индекса возмущённости ионосферы вероятность проведения успешных оптических измерений существенно увеличивается. Кроме этого, из рис. 2 видно, что изменения глобальных геофизических параметров (D_{st} , AE , K_p , A_p) не оказывают существенного влияния на уровень интенсивности искусственного свечения ионосферы. Необходимо сказать, что коэффициенты корреляции Спирмена и Кендала дают похожие результаты.

Согласно методике, подробно описанной в работе [10] для двух выборок интенсивности искусственного оптического свечения ионосферы (b) и индекса возмущённости ионосферы (W_p), был проведён общий регрессионный анализ. Результаты регрессионного анализа приведены на двумерной гистограмме (b , W_p), показанной на рис. 4. Цветом обозначена эмпирическая частота циклов накачки, общее количество которых в сформированных рядах данных для указанных параметров составляет 68.

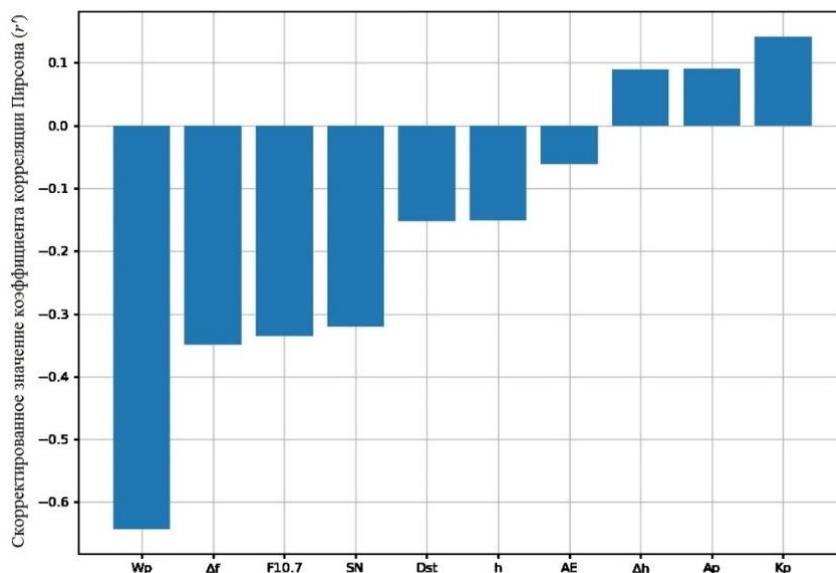


Рис. 2. Значения коэффициента корреляции Пирсона для интенсивности оптического свечения b с каждым отдельным параметром

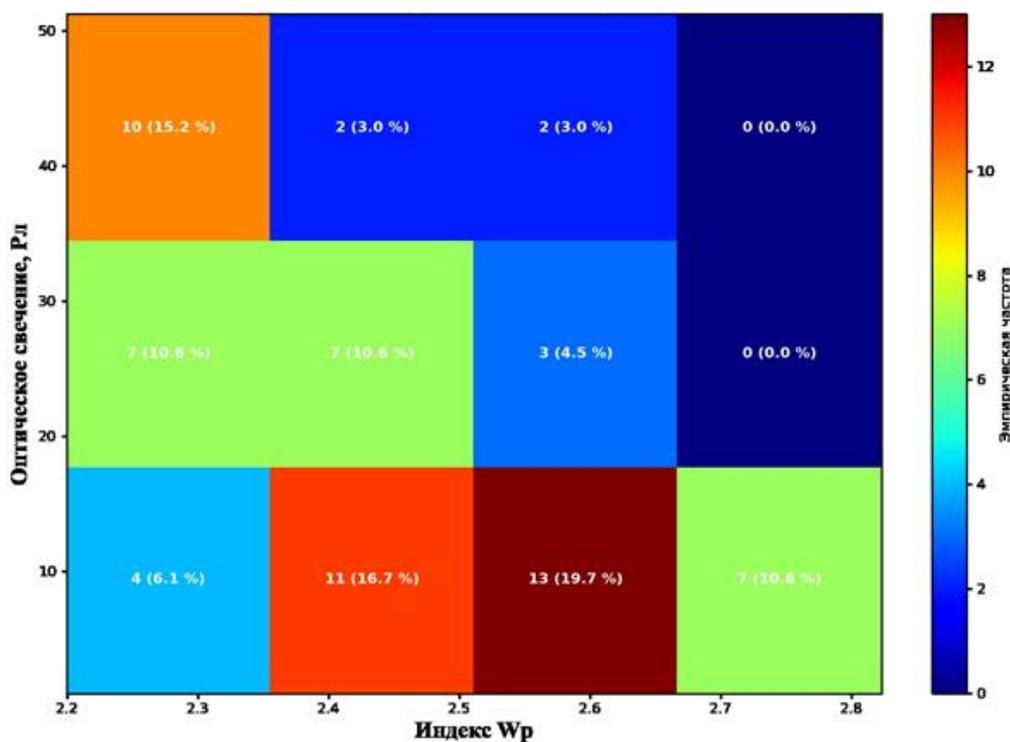


Рис. 4. Двумерная гистограмма распределения интенсивности свечения (b) и планетарного индекса возмущённости ионосферы W_p

По визуальной оценке двумерной гистограммы (b ; W_p) можно заключить, что наибольшее количество циклов накачки, при которых наблюдалось наиболее интенсивное свечение, было выполнено в спокойных ионосферных условиях ($2.2 \leq W_p \leq 2.35$) – 21% случаев, при этом в 10% случаев интенсивность свечения достигала величин ~ 50 Рл. В условиях более возмущённой ионосферы ($2.65 \leq W_p \leq 2.85$) искусственное свечение ионосферы наблюдалось только в 7% случаев, а интенсивность свечения не превосходила 15 Рл.

В результате проведённого регрессионного анализа было установлено, что наиболее подходящей аппроксимацией при уровне значимости $\alpha = 0.05$ для показателей $(\Delta f; b)$ и $(\Delta h; b)$ является парабола. Аппроксимация показателей $(h; b)$ линейным уравнением и уравнением параболы оказалась статистически недостоверной.

На рис. 5 показана диаграмма рассеяния (верхняя панель) и двумерная гистограмма (нижняя панель) величин Δf и b по объединённым данным ионозонд Базис и Cadi. Каждое нанесённое на график значение $(\Delta f, b)$ соответствует одному циклу накачки в зависимости от дня эксперимента (циклы каждого отдельного дня помечены маркерами одного цвета).

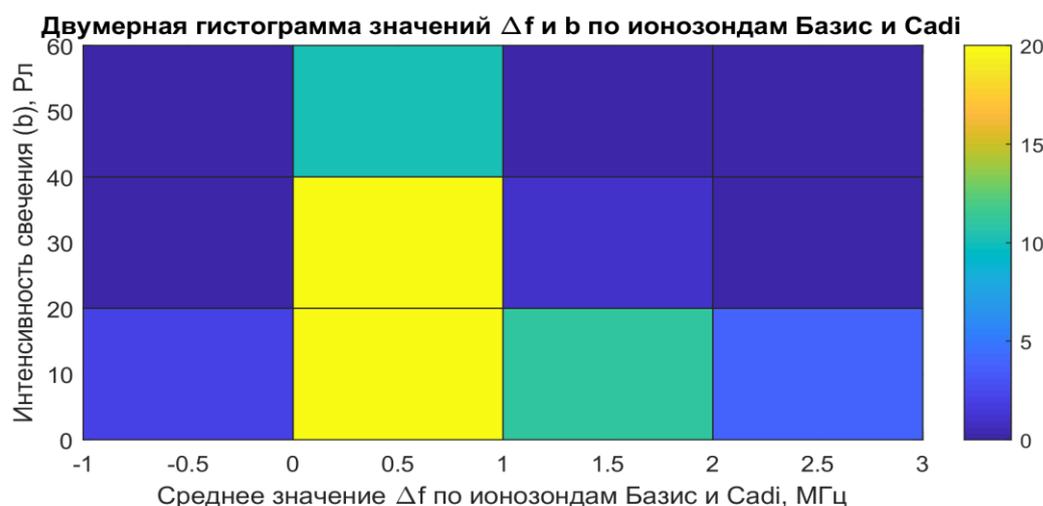
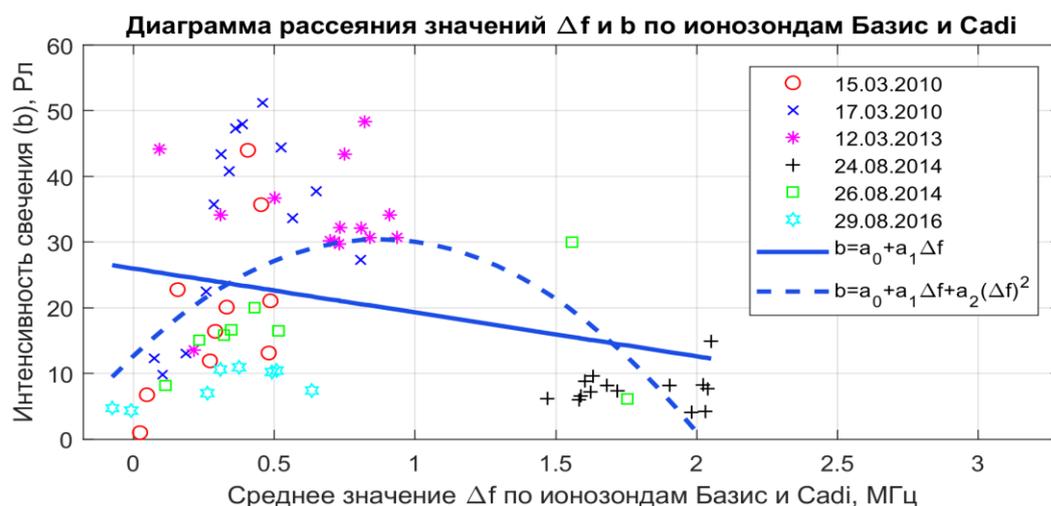


Рис. 5 Результаты регрессионного анализа (верхняя часть) и двумерная гистограмма (нижняя часть) Δf и b по данным ионозонд Базис и Cadi

На верхней панели рис. 5, соответствующей диаграмме рассеяния величин Δf и b , нанесены два типа уравнений – линейное уравнение и уравнение параболы, коэффициенты найдены с помощью метода наименьших квадратов. На нижней панели рис. 5, соответствующей двумерной гистограмме величин Δf и b , цветом обозначена эмпирическая частота циклов накачки, общее количество которых в сформированном ряду данных по ионозондам Базис и Cadi составляет 68. По визуальной оценке двумерной гистограммы можно заключить, что наибольшее количество циклов накачки (40 из 68) сосредоточено в диапазоне Δf отстройки частоты накачки от критической

частоты ионосферы от 0 до 1 МГц и в диапазоне интенсивности оптического свечения от 0 до 40 Рл. Таким образом, 58.82% циклов накачки были проведены при Δf от 0 до 1 МГц с b с 0 до 40 Рл.

Уравнение параболы, полученное методом наименьших квадратов, имеет следующий вид:

$$b = -12.65 + 40.57 \cdot \Delta f - 23.188 \cdot (\Delta f)^2 \quad (1)$$

Максимальное значение интенсивности оптического свечения, согласно уравнению (1), составляет 30.4 Рл при $\Delta f = 0.877$ МГц. Данное уравнение так же, как и линейное уравнение, является статистически значимым ($\alpha = 0.05$), однако имеет большее значение R^2 по сравнению с линейным уравнением. Эмпирическое значение больше примерно в 8 раз критического значения. Уравнение параболы соответствует эмпирическим значениям на 33.6% и лучше описывает статистическую связь между величиной разности критической частоты ионосферы и частоты волны накачки $\Delta f = f_0 F2 - f_0$ и величиной интенсивности оптического свечения b по сравнению с линейным уравнением.

Выводы

В процессе выполнения работы получено, что наиболее статистически значимыми факторами, влияющими на частоту появления и яркость пятна искусственного оптического свечения ионосферы при воздействии на неё мощным радиоизлучением стенда СУРА, являются разность критической частоты ионосферы и частоты волны накачки (Δf), а также глобальный индекс ионосферной возмущённости (W_p).

Показано, что наиболее интенсивное искусственное свечение ионосферы, стимулированное мощным радиоизлучением стенда СУРА, наблюдается при $2.2 \leq W_p \leq 2.35$ и отстройке частоты волны накачки (f_0) от критической частоты слоя $F2$ ионосферы ($f_0 F2$) на $\sim 0.5 \div 1$ МГц. Максимальное значение интенсивности искусственного оптического свечения наблюдается при $\Delta f \approx 0.9$ МГц.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-12-00197.

Литература

1. Грач С.М., Насыров И.А., Когогин Д.А., Шиндин А.В., Клименко В.В., Белецкий А.Б., Гумеров Р.И., Комраков Г.П., Сергеев Е.Н. Исследования искусственного оптического свечения на стенде СУРА (обзор) // Распространение радиоволн: труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции (Казань, 1–6 июля 2019 г.): в 2 т. - Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2019. - Т. I. - с. 58-66.
2. Когогин, Д.А. Динамика естественных и стимулированных мощным радиоизлучением ионосферных неоднородностей с масштабами $5 \div 50$ км по данным радио и оптических измерений: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 / Д.А. Когогин. – Казань, 2018. – 145 с.
3. 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» // Известия вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 11. С. 949–966.
4. Nasyrov I.A., Kogogin D.A., Shindin A.V., Zagretidinov R.V. The measurement of the ionospheric total content variations caused by a powerful radio emission of «Sura» facility on a network of GNSS-receivers // Advances in Space Research. – 2016 – Vol. 57, no. 4. – P. 1015 - 1020.

5. Когогин Д.А., Насыров И.А., Грач С.М., Шиндин А.В., Загретдинов Р.В. Динамика крупномасштабных ионосферных неоднородностей, стимулированных мощным коротковолновым излучением стенда "Сура", по данным измерений на сети наземных станций глобальных навигационных спутниковых систем // Геомагнетизм и аэрономия. - 2017. - Т. 57, № 1. - С. 100 - 115.
6. Клименко В. В., Грач С.М., Сергеев Е. Н., Шиндин А. В. О характеристиках искусственного свечения ионосферы при омическом нагреве и при ускорении электронов плазменной турбулентностью, инициированными мощным КВ радиоизлучением стенда «Сура» // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. - 2017. - Т. 60, № 6. - С. 481–501.
7. Когогин Д.А., Насыров И.А., Шиндин А.В., Грач С.М., Максимов Д.С., Загретдинов Р.В., Дементьев В.О. Динамическая картина стимулированной мощным радиоизлучением области ионосферы, полученная по результатам совместного анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций полного электронного содержания // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. - 2020. - Т. 63. № 2. - С. 89-104.
8. Мировой центр данных - http://www.wdcb.ru/stp/geomag/indices_description.ru.html (Дата обращения: 09.10.2021).
9. Ионосферная погода: планетарные бури полного электронного содержания - <http://www.izmiran.ru/services/iweather/storm> - (Дата обращения: 09.10.2021).
10. Дементьев В.О. Общий статистический анализ данных измерений искусственного оптического свечения, полученных на стенде «Сура» в период с 2010 по 2016 гг.: научно-квалификационная работа. Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 2019. – 114 с.