

**Оценка статистической взаимосвязи интенсивности искусственного свечения ионосферы на длине волны 630 нм с индексами состояния ионосферы и космической погоды в рамках экспериментов на стенде «СУРА» в период 2021-2022 гг.**

В.О. Дементьев<sup>1</sup>, И.А. Насыров<sup>1</sup>, А.Б. Белецкий<sup>2</sup>, Д.А. Когогин<sup>1</sup>, В.В. Емельянов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

E-mail: inasyrov@kpfu.ru

<sup>2</sup>ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики

Сибирского отделения Российской академии наук

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А

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

*Представлены результаты статистического анализа экспериментальных данных по интенсивности искусственного оптического свечения ионосферы при воздействии мощного коротковолнового излучения. Выявлены закономерности интенсивности оптического свечения в зависимости от состояния возмущённости ионосферы и индексов космической погоды.*

*Ключевые слова: ионосфера, стенд Сура, статистика, оптическое свечение, космическая погода*

**Estimate of the statistical relationship between the artificial ionospheric airglow intensity at a 630 nm wavelength and the indices of ionosphere and space weather conditions within the frame of experiments conducted at the SURA facility in 2021 and 2022**

V.O. Dementiev<sup>1</sup>, I.A. Nasyrov<sup>1</sup>, A.B. Beletsky<sup>2</sup>, D.A. Kogogin<sup>1</sup>, V.V. Emelyanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kazan (Volga region) Federal University

<sup>2</sup> Institute of Solar–Terrestrial Physics SB RAS

*It presents the results of a statistical analysis of experimental data on artificial optical ionospheric airglow intensity under the influence of intense short-wave radiation. Patterns of optical airglow intensity depending on ionospheric storminess and space weather indices have been discovered.*

*Keywords: ionosphere, Sura facility, statistics, airglow, space weather*

**Введение**

В период 2021-2022 гг. на стенде «Сура» проведены эксперименты по воздействию мощного коротковолнового излучения на ионосферу. Электромагнитное излучение осуществлялось циклами накачки и паузы, и во время накачки возникало искусственное оптическое свечение ионосферы в красной линии атомарного кислорода ( $\lambda = 630$  нм).

За указанный период 10 дней экспериментов оказались удачными в плане ионосферных условий. По этим дням накоплен массив данных по искусственному оптическому свечению ионосферы, состоянию ионосферы, космической погоде, и появилась необходимость по выявлению статистических закономерностей между ними.

Оптическое свечение регистрировалось за все 10 дней с помощью ПЗС-камеры КЕО Sentinel. Регистрация портретов ночного неба проводилась с выдержкой 25 с.

Состояние ионосферы диагностировалось с помощью ионозонда CADI, установленного непосредственно рядом со стендом «Сура», в моменты отсутствия

излучения накачки. По зарегистрированным ионограммам определялась критическая частота ионосферы  $foF2$ .

Восстановление профиля электронной концентрации осуществлялось с использованием Международной справочной модели ионосферы IRI с учётом критической частоты ионосферы  $foF2$  и индексов космической погоды  $Rz$ ,  $F_{10.7}$ .

Высота отражения волны накачки определялась методом расчёта лучевых траекторий, распространяющихся в трёхмерной неоднородной изотропной модели ионосферы.

Данные по состоянию геомагнитной активности и космической погоды взяты из открытых источников [3, 6, 8, 9].

### **Набор экспериментальных данных, используемый для анализа**

Для анализа использовались экспериментальные данные 10 дней, в которых зарегистрировано 118 циклов свечения. По полученным данным проведён корреляционный и регрессионный анализ.

В качестве факторных признаков использовались параметры, характеризующие состояние ионосферы и индексы космической погоды:

- критическая частота  $foF2$  по ионограммам ионозонда CADI;
- отстройка частоты волны накачки  $f_0$  от критической частоты ионосферы  $fof2$ :  
 $\Delta f = fof2 - f_0$ ;
- толщина области плазменных резонансов ионосферы  $\Delta h = h_L - h_{UH}$ , т.е. слоя между высотными границами ленгмюровского и верхнегибридного резонанса [2];
- высота максимума  $hmF2$  слоя  $F_2$  ионосферы с использованием Международной справочной модели ионосферы IRI-2016 [5];
- высота отражения волны накачки  $h_r$ , полученная методом расчёта лучевых траекторий изотропной модели ионосферы;
- индексы  $Kp$  и  $Ap$ , характеризующие геомагнитную активность по всей планете [6];
- индексы, отражающие интенсивность магнитной возмущенности от вполне определенного источника:  $AE$  [9] и  $Dst$  [8];
- индекс солнечной активности  $F_{10.7}$  – поток радиоизлучения с длиной волны 10.7 см (2800 МГц) [6];
- количество солнечных пятен (суточное значение чисел Вольфа)  $Rz$  [6];
- планетарный индекс Гуляевой  $Wp$ , используемый для составления каталога ионосферно-плазмосферных бурь [3];

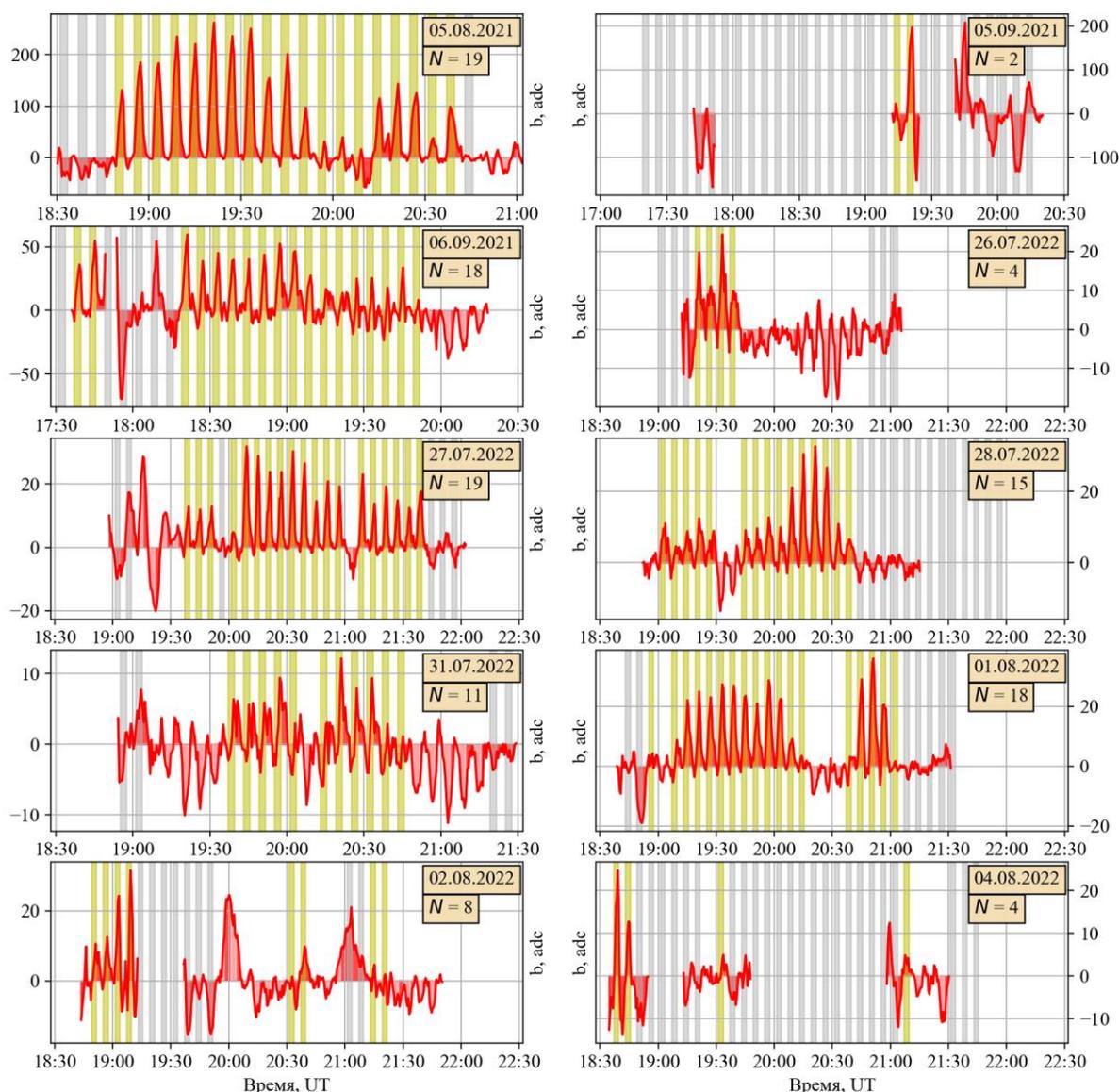
Результативным признаком является серия значений  $b$  интенсивности оптического свечения, полученных в результате обработки изображений портретов ночного неба.

### **Данные по искусственному оптическому свечению**

В общей картине учтено 118 циклов накачки, в которых зарегистрировано оптическое свечение. На рис. 1 приведены ряды искусственного оптического свечения  $b$  в приборных единицах для десяти дней: 19 циклов для 05.08.2021, 2 – для 05.09.2021, 18 – для 06.09.2021, 4 – для 26.07.2022, 19 – для 27.07.2022, 15 – для 28.07.2022, 11 – для 31.07.2022, 18 – для 01.08.2022, 8 – для 02.08.2022, 4 – для 04.08.2022. Серым и жёлтым выделением обозначены циклы накачки коротковолновым радиоизлучением станда на частоте  $f_0$ . В частности, жёлтым цветом обозначены циклы накачки, в которых зарегистрировано искусственное оптическое свечение.

Остальные циклы накачки, отмеченные серым цветом, не учитывались в расчётах из-за наличия облаков в кадре, пролетающих метеоритов, сбоя в работе передатчиков и некоторых других эффектов, требующих дополнительного исследования. Красной линией показаны ряды оптического свечения  $b$  в приборных единицах.

Наиболее яркое оптическое свечение наблюдалось 05.08.2021 и 05.09.2021; самое слабое свечение было зарегистрировано 31.07.2022.



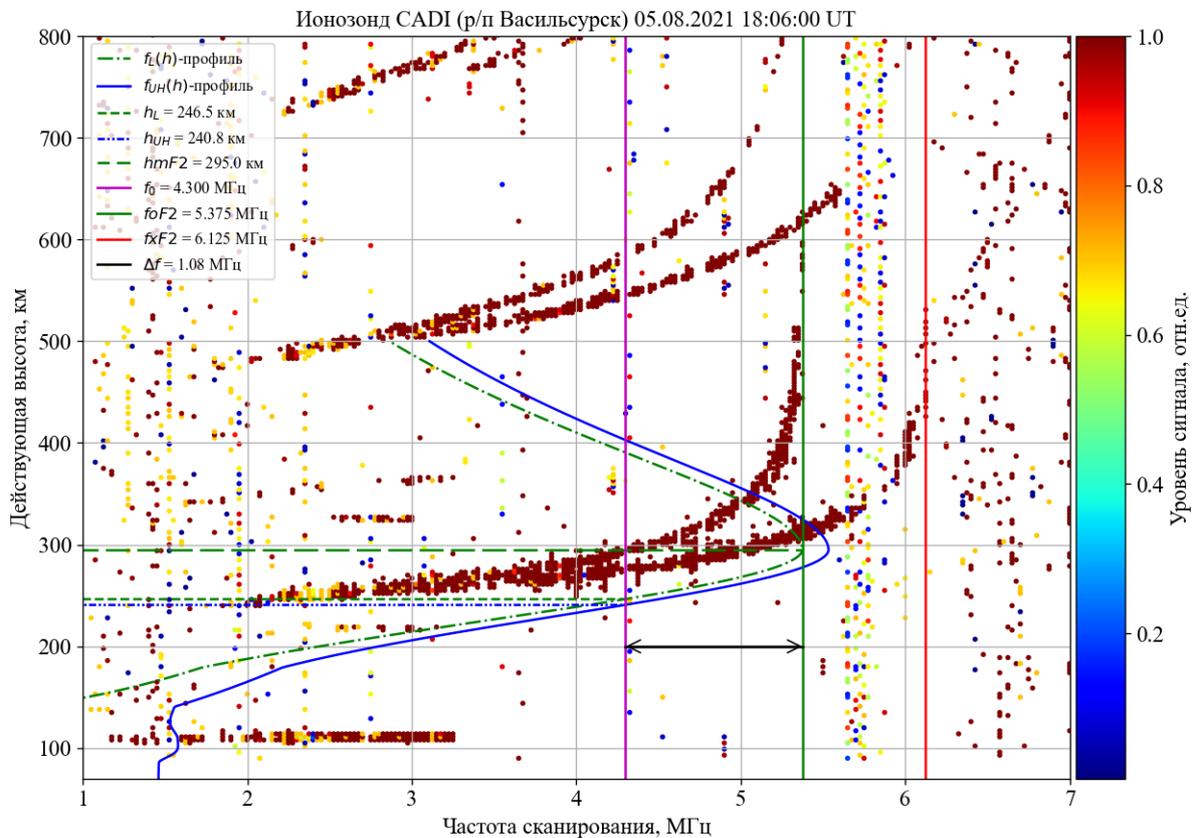
**Рис. 1. Ряды оптического свечения  $b$ , зарегистрированного во время циклов накачки**

Ряды оптического свечения являются серией обработанных изображений ПЗС-камеры: каждому кадру соответствует одно значение  $b$ . Подробная методика обработки кадров описана в статье [4]. Для статистического анализа из каждого цикла накачки, включающего несколько последовательных значений  $b$ , выбиралось значение с максимальной интенсивностью свечения с точки зрения эффективного воздействия радиоизлучения на ионосферу.

#### **Данные по состоянию ионосферы**

На рис. 2 приведён пример ионограммы, снятой ионозондом CADI в непосредственной близости со стендом «Сура». Вертикальными линиями показаны частота накачки  $f_0$ , критические частоты  $foF2$  и  $fxF2$ . С использованием модели IRI (с учётом параметров  $foF2$ ,  $Rz$ ,  $F_{10.7}$ ) был получен высотный профиль электронной

концентрации  $N(h)$  и пересчитан в профиль плазменной (ленгмюровской)  $f_L(h)$  и верхнегибридной  $f_{UH}(h)$  частоты [2, 5]. В точках пересечения высотных профилей ленгмюровской и верхнегибридной частоты с частотой волны накачки  $f_0$  были найдены высоты ленгмюровского и верхнегибридного резонанса, разность которых является областью плазменных резонансов  $\Delta h = h_L - h_{UH}$ .



**Рис. 2.** Пример ионограммы CADI и определения параметров  $\Delta f$ ,  $hmF2$ ,  $\Delta h = h_L - h_{UH}$

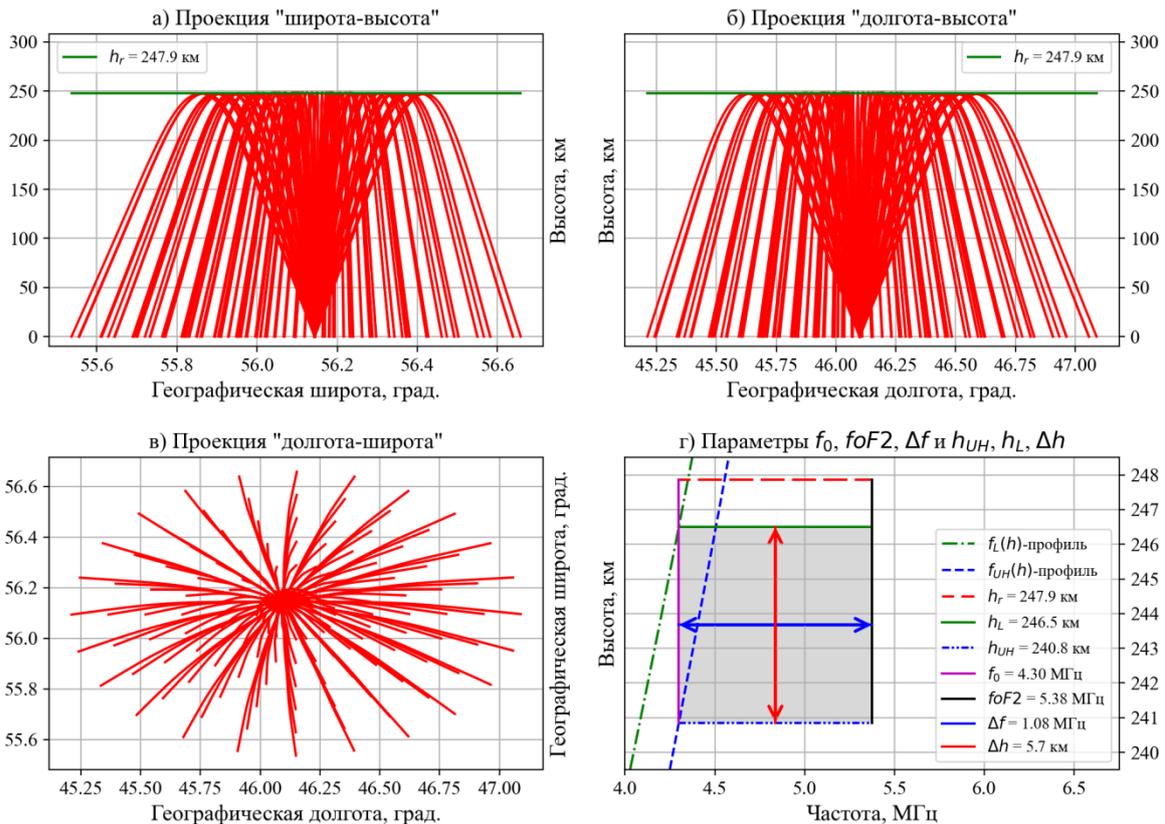
Отстройка  $\Delta f$  частоты волны накачки  $f_0$  от критической частоты  $foF2$  определяется как разность частот критической частоты ионосферы  $foF2$  и волны накачки  $f_0$ , которая показывает, насколько близко к критической частоте ионосферы осуществляется излучение нагревного стенда.

Высота, на которой достигается максимальное значение электронной концентрации, эквивалентной плазменной частоте, является высотой максимума  $F_2$ -слоя, и на ионограмме обозначена как  $hmF2$ .

На ионограмме также присутствует спорадический  $Es$ -слой с частотой  $foE = 3.250$  МГц, однако при построении профилей  $f_L(h)$  и  $f_{UH}(h)$  он не учитывался.

На рис. 3 приведён пример расчёта лучевых траекторий декаметровых радиоволн обыкновенной компоненты, распространяющихся в трёхмерной изотропной модели ионосферы для 05.08.2021 18:06:00 UT. Начальное направление траекторий задавалось по азимуту в диапазоне от  $0^\circ$  до  $345^\circ$  с шагом  $15^\circ$  и по углу места в диапазоне от  $84^\circ$  до  $89^\circ$  с шагом  $1^\circ$ . На рис. 3а, 3б, 3в показаны траектории лучей в трёх проекциях широта-высота, долгота-высота, долгота-широта. На рис. 3а и 3б средняя высота отражения всех 144 траекторий соответствует высоте отражения  $h_r = 247.9$  км. Система дифференциальных уравнений, описывающих траекторию луча, приводится в [1].

На рис. 3г показано расположение области плазменных резонансов  $\Delta h$ , аналогично графику ионограммы (рис. 2), только в увеличенном масштабе.



**Рис. 3. Пример определения высоты отражения  $h_r$  методом расчёта лучевых траекторий, и параметров  $\Delta f$  и  $\Delta h$  для 05.08.2021 18:06:00 UT**

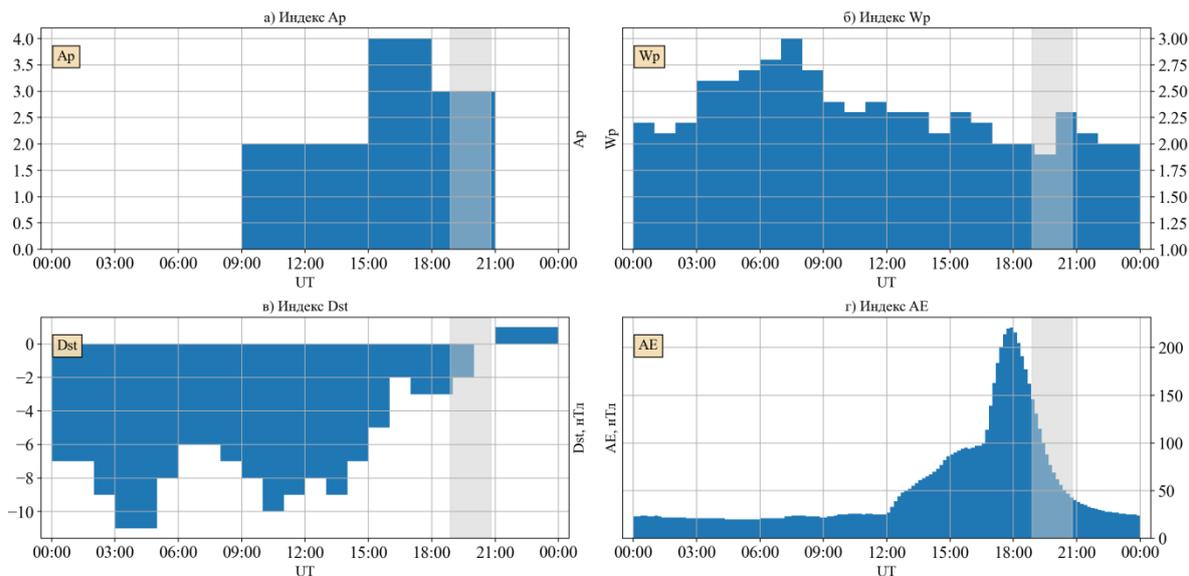
### Данные по геомагнитной активности и состоянию космической погоды

На рис. 4 приведён пример значений индексов  $A_p$ ,  $W_p$ ,  $Dst$ ,  $AE$  для 05.08.2021 по данным, размещённым в [3, 6, 8, 9]. Индекс  $A_p$  – трёхчасовой,  $W_p$  и  $Dst$  – часовые,  $AE$  – десятиминутный. Трёхчасовой индекс  $K_p$ , также используемый в анализе, не приводится, поскольку его значения схожи с индексом  $A_p$ . В целом, в этот день наблюдается спокойное состояние ионосферы. Серым выделением показан интервал работы стенда «Сура». Начало программы работы стенда для 05.08.2021 – 18:31:00 UT, окончание – 20:57:30 UT. В этот день проведено 25 циклов с режимом накачки 2.5 мин – нагрев, 3.5 мин – пауза. Значение индекса  $A_p$  за период работы стенда в этот день было равно 3, индекс Гуляевой  $W_p$  находился в пределах 1.9÷2.3, индекс  $Dst$  – в пределах -3÷0 нТл, индекс  $AE$  – в пределах 40÷177 нТл.

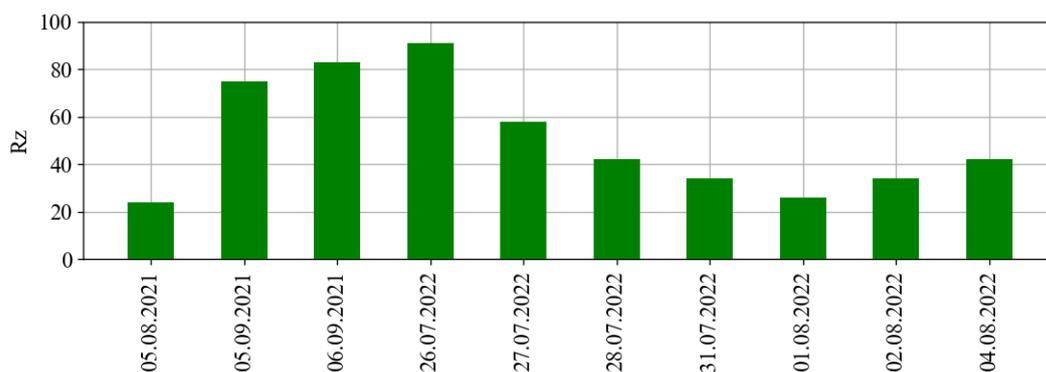
На рис. 5 и рис. 6 показаны значения индексов космической погоды  $R_z$  и  $F_{10.7}$  [6]. Согласно диаграмме, приведённой на рис. 5, дни с меньшим количеством солнечных пятен – 05.08.2021, 31.07.2022, 01.08.2022, 02.08.2022, с наибольшим количеством – 05.09.2021, 06.09.2021, 26.07.2022.

Согласно диаграмме, приведённой на рис. 6, день с наименьшим значением потока радиоизлучения Солнца с длиной волны 10.7 см (2800 МГц) – 05.09.2021, с наибольшим значением – 04.08.2022.

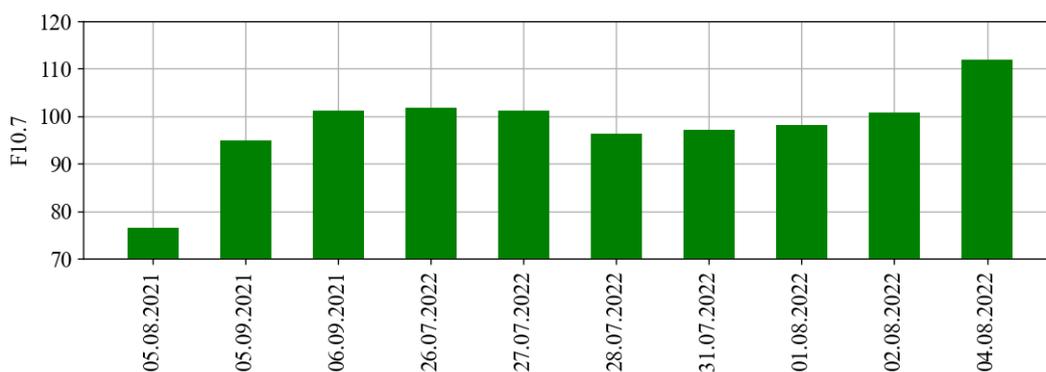
Для статистических расчётов использовались значения индексов в те моменты времени, в которые наблюдалась максимальная интенсивность свечения ионосферы  $b$  в выбранных для анализа циклах накачки.



**Рис. 4. Индексы  $A_p$ ,  $W_p$ ,  $Dst$ ,  $AE$ . Серым полупрозрачным прямоугольником обозначен период проведения измерений на стенде СУРА**



**Рис. 5. Числа Вольфа  $R_z$  (суточное количество солнечных пятен)**



**Рис. 6. Поток радиоизлучения Солнца с длиной волны 10.7 см (2800 МГц)**

### Результаты статистического анализа

При последовательном сравнении всех факторных признаков с результативным признаком можно получить оценку статистической взаимосвязи результативного и факторного признаков.

На рис. 7 представлена диаграмма скорректированных коэффициентов корреляции Пирсона  $r'$  факторных признаков  $\Delta f$ ,  $\Delta h$ ,  $h_r$ ,  $hmF2$ ,  $foF2$ ,  $Ap$ ,  $Kp$ ,  $Wp$ ,  $Dst$ ,  $AE$ ,  $F_{10.7}$ ,  $Rz$  с результивным признаком  $b$ .

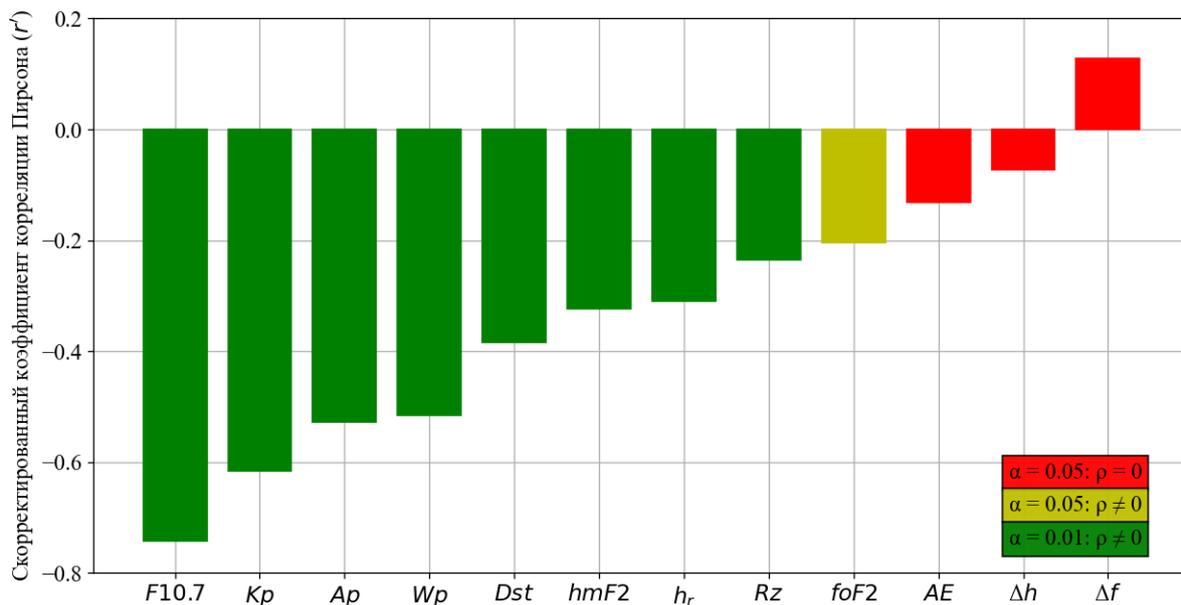


Рис. 7. Скорректированный коэффициент корреляции Пирсона факторных признаков с  $b$

Проверка гипотезы на статистическую значимость  $r'$  осуществлялась с помощью критерия Стьюдента. Статистически значимая взаимосвязь наблюдается у параметров  $F_{10.7}$ ,  $Kp$ ,  $Ap$ ,  $Wp$ ,  $Dst$ ,  $hmF2$ ,  $h_r$ ,  $Rz$  с  $b$  с уровнем значимости  $\alpha = 0.01$  и у параметра  $foF2$  с  $b$  с уровнем значимости  $\alpha = 0.05$ .

У параметров  $AE$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta f$  статистически значимой взаимосвязи с  $b$  с уровнем значимости  $\alpha = 0.05$  не наблюдается, несмотря на наличие слабой отрицательной корреляции  $AE$  и  $\Delta h$  с  $b$ , и на наличие слабой положительной корреляции  $\Delta f$  с  $b$ .

Можно сделать вывод, что с увеличением значений индексов и высоты отражения волны накачки наблюдается снижение яркости оптического свечения.

На рис. 8а показана диаграмма рассеяния параметров  $(Ap, b)$ , гистограмма распределения индекса  $Ap$  и линия регрессии. Скорректированный коэффициент корреляции Пирсона  $r' = -0.53$  и отрицательный наклон линии регрессии говорит о тенденции снижения яркости оптического свечения  $b$  с увеличением значения индекса  $Ap$ .

На рис. 8б показана двумерная гистограмма параметров  $(Ap, b)$ . Цветом показана эмпирическая частота в циклах (общее количество циклов  $N = 118$ ). Циклы накачки с наиболее ярким свечением попадают в диапазон  $2 \leq Ap \leq 3$ , что говорит о том, что наиболее яркое оптическое свечение возникало при отсутствии возмущений геомагнитного поля Земли и при невозмущённом состоянии ионосферы. Также значительное количество циклов накачки с наблюдаемым эффектом свечения располагается в диапазоне  $6 \leq Ap \leq 7$ . Меньшая часть циклов расположена в пределах  $9 \leq Ap \leq 12$ .

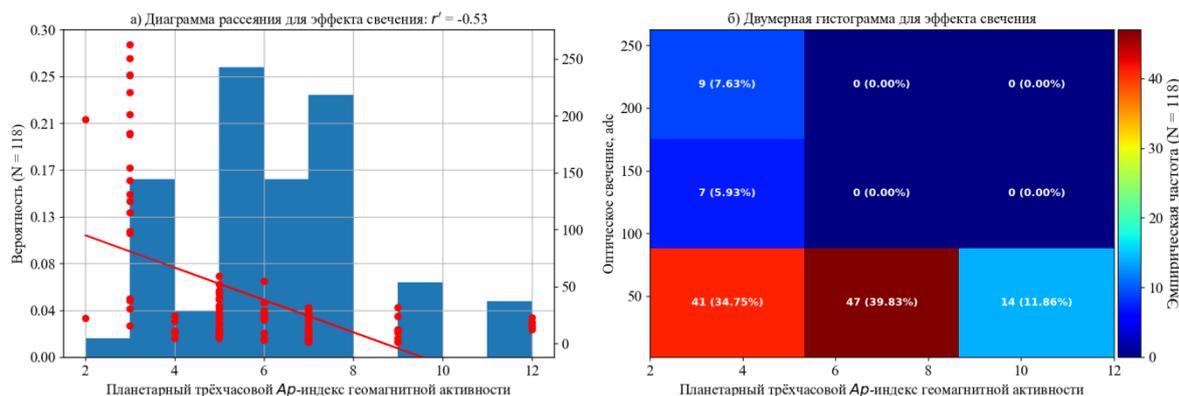


Рис. 8. Диаграмма рассеяния и двумерная гистограмма параметров ( $A_p, b$ )

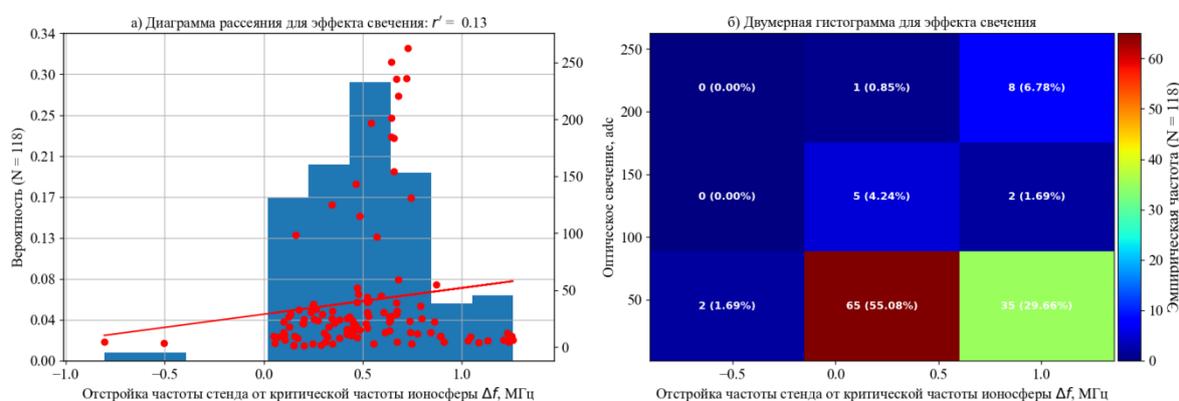


Рис. 9. Диаграмма рассеяния и двумерная гистограмма параметров ( $\Delta f, b$ )

На рис. 9а показана диаграмма рассеяния параметров ( $\Delta f, b$ ), гистограмма распределения  $\Delta f$  и регрессионное уравнение. Скорректированный коэффициент корреляции Пирсона  $r' = 0.13$ , но не является статистически значимым. Тем не менее, по двумерной гистограмме распределения параметров ( $\Delta f, b$ ) на рис. 9б можно заметить, что большинство циклов накачки сосредоточено в диапазоне  $0 \leq \Delta f \leq 0.5$  МГц – это можно считать одним из приемлемых условий эффективного взаимодействия мощного коротковолнового излучения с ионосферой.

Данная картина согласуется с ранее полученными результатами по статистическому анализу подобных экспериментальных данных за период 2010 – 2016 гг, опубликованных в статье [7].

### Выводы

В результате проведённого статистического анализа установлено, что при сильно выраженной возмущённости ионосферы слабее проявлялся эффект искусственного оптического свечения. Аналогичный вывод для спокойного состояния ионосферы – здесь наблюдалось наиболее яркое оптическое свечение. Это означает, что яркое свечение ионосферы достигалось при меньшей степени ионизации и большей концентрации нейтральных атомов в ионосфере.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-27-00323.

## Литература

1. Болдовская И.Г., Егоров И.Б., Кияновский М.П. Программа расчёта траекторий луча в изотропной сферически слоистой параболической ионосфере // Современные проблемы физики. – Серия: Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. Перевод с английского под редакцией М.П. Кияновского. – М: Наука, Физматлит, 1971. – С. 280 – 283.
2. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. // УФН. 2007. Т. 177, №11. С. 1145 – 1177.
3. Ионосферная погода: Планетарные бури полного электронного содержания [Электронный ресурс] // ФГБУН ИЗМИРАН. URL: <https://www.izmiran.ru/services/iweather/storm/> (дата обращения: 13.03.2024).
4. 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 станда «Сура». // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 11. С. 949–966.
5. CCMC Instant Run System [Электронный ресурс] // Community Coordinated Modeling Center. URL: <https://kawaii.ccmc.gsfc.nasa.gov/instantrun/iri/> (дата обращения: 13.03.2024).
6. Data Kp index [Электронный ресурс] // Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. URL: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/data> (дата обращения: 13.03.2024).
7. Dementyev V., Nasyrov I., Kogogin D. et al. Estimate of Statistical Relationship between the Intensity of Artificial Airglow and Ionospheric Parameters Using the Data Obtained at the Sura Facility over the Period of 2010 to 2016 // IEEE Xplore Digital Library. August 2019. Vol.1. P. 296 – 299.
8. Final Dst index [Электронный ресурс] // World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. URL: [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html) (дата обращения: 13.03.2024).
9. Real Time Forecast Model of AE Index [Электронный ресурс] // National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences. URL: <http://eng.sepc.ac.cn/AEIndex.php> (дата обращения: 13.03.2024).