

Том II, с. 60–63

УДК: 519.25 + 537.87

## ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ С ИОНОСФЕРНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПО ДАННЫМ, ПОЛУЧЕННЫМ НА СТЕНДЕ «СУРА» В 2010–2016 ГГ.

И. А. Насыров<sup>1</sup>, В. О. Дементьев<sup>1</sup>, Д. А. Когогин<sup>1</sup>, А. В. Шиндин<sup>2</sup>, С. М. Грач<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18  
E-mail: vdemen@yandex.ru

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,  
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

**Аннотация.** В работе приводятся результаты статистического анализа экспериментальных данных, полученных в ходе проведения нагревных экспериментов по регистрации искусственного свечения ионосферы при воздействии мощного коротковолнового излучения на стенде «Сура». При анализе были использованы величины интенсивности оптического свечения в красной линии кислорода, значения разности между критической частотой ионосферы и частотой волны накачки, значения толщины области плазменных резонансов ионосферы, а также высота отражения траекторий волны, рассчитанная методом математического моделирования. Ключевым результатом является обнаруженная взаимосвязь величины оптического свечения с разностью между критической частотой ионосферы и частотой волны накачки. Проведённый статистический анализ показывает, что взаимодействие коротковолнового электромагнитного излучения с ионосферой наиболее эффективно при величине разности критической частоты ионосферы и частоты волны накачки в диапазоне от 0 до 1 МГц.

**Ключевые слова:** искусственное оптическое свечение ионосферы; распространение радиоволн; ионосферная плазма; статистический анализ; расчёт лучевых траекторий дециметровых радиоволн

## 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

I. A. Nasyrov, V. O. Demytyev, D. A. Kogogin, A. V. Shindin, S. M. Grach

**Abstract.** The paper presents statistical analysis results of experimental data obtained via heating experiments in recording artificial ionospheric airglow exposed to powerful short-wave radiation using the Sura facility. The data used in the analysis include the intensity values of optical airglow in the red oxygen line, the difference between the critical frequency of ionosphere and the pump wave frequency, the thickness of plasma resonance regions of ionosphere and the height of reflection of wave trajectories calculated via mathematical modeling. The key result is the detected correlation between the optical airglow magnitude and the difference between the critical frequency of ionosphere and the pump wave frequency. The statistical analysis shows that the interaction of short-wave electromagnetic radiation with the ionosphere is most effective when the difference between the critical frequency of ionosphere and the pump wave frequency ranges from 0 to 1 MHz

**Keywords:** artificial optical airglow of the ionosphere; radio wave propagation; ionospheric plasma; statistical analysis; ray tracing of decameter radio waves

### Введение

В связи с накоплением достаточного количества данных за период проведения экспериментальных кампаний с 2010 по 2016 гг. по исследованию воздействия мощного коротковолнового излучения на ионосферу методом регистрации искусственного оптического свечения на стенде «Сура» появилась необходимость их сопоставления между собой. Целью работы является проведение регрессионного и корреляционного анализа имеющихся параметров ионосферы и выявление их общих закономерностей в случаях возникновения искусственного оптического свечения. Решаемые задачи: сбор и обработка исходных данных, создание модели ионосферы, выполнение расчётов, сопоставление имеющихся экспериментальных и расчётных данных, оценка и интерпретация полученных результатов.

### Методика обработки экспериментальных данных

Для проведения анализа были использованы следующие показатели: разность критической частоты ионосферы и частоты волны накачки  $\Delta f$  (МГц), толщина слоя области плазменных резонансов  $\Delta h$  (км), расчётная высота отражения  $h$  (км) и интенсивность искусственного оптического свечения ионосферы  $b$  (Рл) для шести дней: 15.03.2010 г., 17.03.2010 г., 12.03.2013 г., 24.08.2014 г., 26.08.2014 г., 29.08.2016 г.

Для получения значений интенсивности свечения использовались данные, зарегистрированные оптическим оборудованием на базе магнитной обсерватории КФУ (55.93°N; 48.75°E) и на базе стенда «Сура» (56.15°N; 46.10°E). В качестве исходных данных использовались ранее выполненные результаты обработки полученных кадров с помощью методики, приведённой в [1]: с использованием нескольких ярких звёзд на кадре с заранее известной величиной светимости был рассчитан коэффициент преобразования из приборных единиц в единицы интенсивности (Рл). Далее, с помощью специальной обработки всех кадров для каждого дня была получена величина интенсивности искусственного оптического свечения ионосферы  $b$  (Рл).

Для получения значений критической частоты ионосферы ( $f_oF2$ ) были использованы ионограммы, полученные со станции ионосферного зондирования Canadian Advanced Digital Ionosonde (Cadi) [2], позволяющей наиболее точно определить значение критической частоты ионосферы ( $f_oF2$ ) в связи с близким расположением возле стенда «Сура».

С использованием значения критической частоты ионосферы ( $f_oF2$ ) с помощью Международной модели ионосферы IRI-2012 были построены  $N(h)$ -профили электронной концентрации для каждого момента времени. С помощью формул пересчёта значений электронной концентрации в плазменную (ленгмюровскую) и верхнегибридную частоты [3] были построены высотные профили ленгмюровской и верхнегибридных частот.

Область ионосферы, в которой частота волны накачки ( $f_0$ ) равна частоте верхнегибридных волн ( $\omega_{UH}$ ) и частоте ленгмюровских волн ( $\omega_L$ ), соответствуют резонансному слою. Способ определения высотных границ области плазменных резонансов показан в работе [4]. Разность высот ленгмюровского и верхнегибридного резонансов соответствует толщине резонансного слоя  $\Delta h$ .

Для оценки высоты отражения использовался метод расчёта лучевых траекторий декаметровых радиоволн, распространяющихся в трёхмерно-неоднородной изотропной ионосфере, заключающийся в решении системы дифференциальных уравнений, описывающих траекторию луча в соответствии с начальными и граничными условиями [4, 5].

Для каждого цикла были взяты усреднённые значения каждого показателя  $\Delta f$ ,  $\Delta h$ ,  $h$ ,  $b$  с 90 секунды до конца цикла. Сопоставляя значение каждого показателя  $\Delta f$ ,  $\Delta h$ ,  $h$  со значением интенсивности оптического свечения ионосферы  $b$ , был проведён общий регрессионный и статистический анализ.

### Результаты анализа

В результате выполненных расчётов было обнаружено, что при 68 циклах оптическое свечение наиболее часто возникало в диапазоне  $\Delta f$  от 0 до 1 МГц при значениях интенсивности до 40 Рл, при  $\Delta h$  до 5 км при значениях интенсивности до 20 Рл, и от 5 до 10 км при значениях интенсивности от 20 до 40 Рл, и в диапазоне  $h$  от 260 до 280 км при значениях интенсивности до 20 Рл (правая часть рис. 1).

При выполнении регрессионного анализа была использована методика, приведённая в работе [6]. Результаты регрессионного анализа для показателей  $(\Delta f, b)$ ,  $(\Delta h, b)$ ,  $(h, b)$  приведены в таблице 1: с уровнем значимости  $\alpha = 0.05$  величины в прозрачных ячейках таблицы являются статистически значимыми результатами, а значения в серых ячейках таблицы — статистически незначимыми результатами. В каждой ячейке приведено значение коэффициента детерминации  $R^2$  и уравнение, с помощью которого для статистически значимых результатов возможно описание взаимосвязи указанных величин.

В результате регрессионного анализа было установлено, что наиболее подходящей аппроксимацией при уровне значимости  $\alpha = 0.05$  для показателей  $(\Delta f; b)$ ,  $(\Delta h; b)$  является парабола (таблица 1 и левая часть рис. 1).

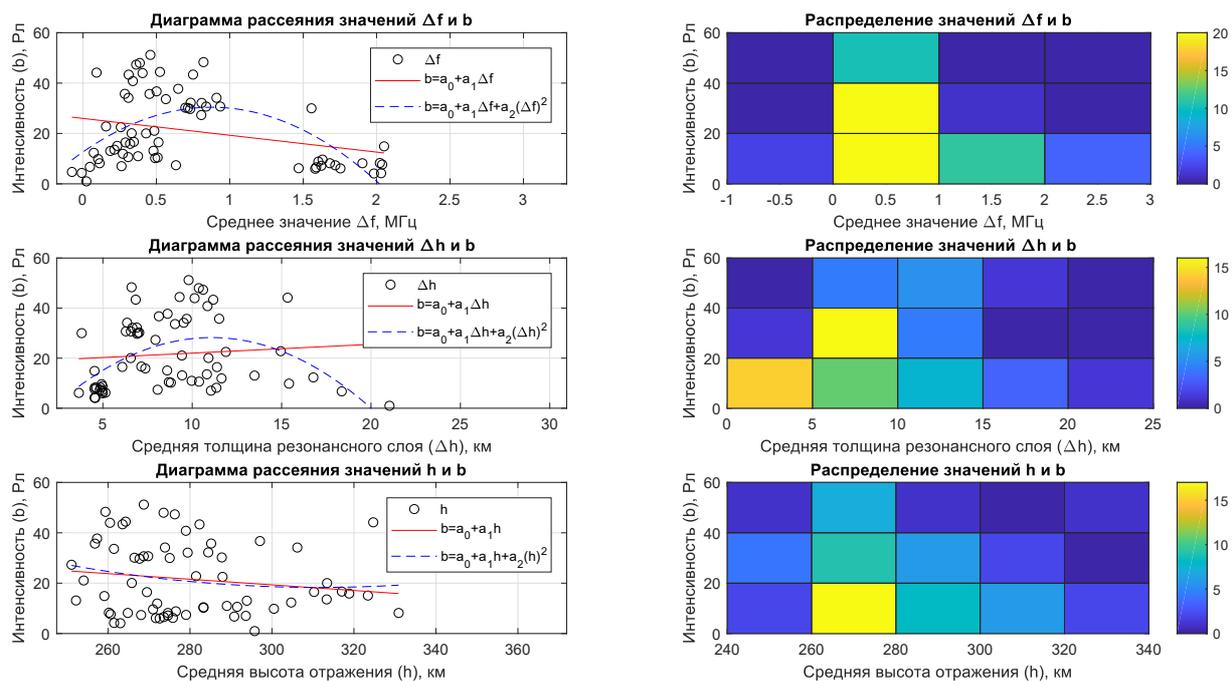


Рис. 1. Левая часть: диаграммы рассеяния для набора значений  $(\Delta f; b)$ ,  $(\Delta h; b)$ ,  $(h; b)$ . Приведены два вида аппроксимации — линейная и параболическая. Правая часть: двумерная гистограмма распределения для набора значений  $(\Delta f; b)$ ,  $(\Delta h; b)$ ,  $(h; b)$ . Цветом обозначена эмпирическая частота количества циклов в каждом диапазоне. Общее количество составляет 68 циклов.

Таблица 1. Результаты регрессионного анализа показателей  $(\Delta f; b)$ ,  $(\Delta h; b)$ ,  $(h; b)$ . Величины в ячейках таблицы прозрачного цвета соответствуют статистически значимому (достоверному) результату, в ячейках серого цвета — недостоверному результату.

Вид аппроксимации	$(\Delta f; b)$	$(\Delta h; b)$	$(h; b)$
уравнение прямой	$R^2 = 0.084;$ $b = 25.96 - 6.68 \cdot \Delta f$	$R^2 = 0.012;$ $b = 18.50 + 0.35 \cdot \Delta h$	$R^2 = 0.023;$ $b = 52.81 - 0.11 \cdot h$
уравнение параболы	$R^2 = 0.336;$ $b = 12.65 + 40.57 \cdot \Delta f - 23.188 \cdot (\Delta f)^2$	$R^2 = 0.246;$ $b = -15.22 + 7.84 \cdot \Delta h - 0.354 \cdot (\Delta h)^2$	$R^2 = 0.028;$ $b = 251.28 - 1.5 \cdot h + 0.002 \cdot h^2$

Аппроксимация показателей  $(h; b)$  при уровне значимости  $\alpha = 0.05$  линейным уравнением и уравнением параболы оказалась статистически недостоверной.

При выполнении корреляционного анализа использовались методики, приведённые в работе [7], по которым были рассчитаны три коэффициента корреляции: Пирсона ( $r$ ), Спирмена ( $r_s$ ) и Кендалла ( $\tau$ ).

В таблице 2 приведены значения рассчитанных коэффициентов корреляции для показателей  $(\Delta f; b)$ ,  $(\Delta h; b)$ ,  $(h; b)$ : с уровнем значимости  $\alpha = 0.05$  значения коэффициентов корреляции в прозрачных ячейках таблицы являются статистически значимыми величинами, а значения в серых ячейках таблицы — статистически незначимыми величинами.

В результате корреляционного анализа при уровне значимости  $\alpha = 0.05$  было установлено, что для показателей  $(\Delta f; b)$  наблюдается слабая отрицательная связь при расчёте коэффициента корреляции Пирсона.

Таблица 2. Результаты корреляционного анализа показателей  $(\Delta f; b)$ ,  $(\Delta h; b)$ ,  $(h; b)$ .

Способы анализа показателей	$(\Delta f; b)$	$(\Delta h; b)$	$(h; b)$
коэф-нт корреляции Пирсона	$r = -0.292$	$r = 0.109$	$r = -0.154$
коэф-нт корреляции Спирмена	$r_s = -0.115$	$r_s = 0.288$	$r_s = -0,110$
коэф-нт корреляции Кендалла	$\tau = -0.061$	$\tau = 0.196$	$\tau = -0.064$

Для показателей  $(\Delta h; b)$  наблюдается слабая положительная связь при расчёте коэффициентов корреляции Спирмена и Кендалла. В остальных случаях при уровне значимости  $\alpha = 0.05$  рассчитанные значения коэффициентов корреляции являются статистически недостоверными.

### Заключение

С помощью статистического анализа было установлено, что искусственное оптическое свечение чаще возникало при разности критической частоты ионосферы и частоты волны накачки в диапазоне от 0 до 1 МГц. Это означает, что наиболее эффективно воздействовать на ионосферу мощным радиоизлучением в тех случаях, когда частота волны накачки  $f_0$  отличается от критической частоты ионосферы  $f_oF2$  не более чем на 1 МГц ( $0 \leq \Delta f \leq 1$  МГц).

### Благодарности

Авторы выражают благодарность техническому персоналу стенда «Сура» за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проведение экспериментов – проект № 14–12–00706, анализ, обработка данных и визуализация результатов – проект № 19–72–00072).

### Список литературы

1. Шиндин А. В., Клименко В. В., Когогин Д. А., Белецкий А. Б., Грач С. М., Насыров И. А., Сергеев Е. Н. 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.
2. Рябов А. В. Генерация низкочастотных радиоволн в верхней ионосфере при воздействии на нее мощным радиоизлучением стенда СУРА: дис. канд. физ.-мат. наук. Нижегородский гос. университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2018. <https://diss.unn.ru/files/2018/833/diss-Ryabov-833.pdf>
3. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. – 2007. – Т. 177, № 11. – С. 1145–1177.
4. Дементьев В. О. Расчёт лучевых траекторий декаметровых радиоволн, распространяющихся в трёхмерно-неоднородной анизотропной ионосфере: магистерская диссертация. Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 2015. [https://kpfu.ru/portal/docs/F1411813255/DementievVO\\_MasterDiss.pdf](https://kpfu.ru/portal/docs/F1411813255/DementievVO_MasterDiss.pdf)
5. Болдовская И. Г. Программа расчёта траекторий луча в изотропной сферически слоистой параболической ионосфере / И. Г. Болдовская, И. Б. Егоров, М. П. Кияновский // 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.
6. Куц В. В. Линейная регрессия. Определение параметров линейной регрессии методом наименьших квадратов: Методические указания к проведению практических занятий. – Курск: ЮЗ-ГУ, 2018. – 20 с.
7. Харченко М. А. Корреляционный анализ. Учебное пособие для вузов. Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008. – 31 с.