

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗНАЧЕНИЙ
ИНТЕНСИВНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ
И ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ,
ПОЛУЧЕННЫМ НА СТЕНДЕ «СУРА» В 2010–2016 гг.**

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

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
vdemen@yandex.ru

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

**STATISTICAL ANALYSIS OF ARTIFICIAL AIRGLOW INTENSITY VALUES
AND IONOSPHERIC PARAMETERS, USING DATA OBTAINED
AT THE SURA FACILITY IN 2010 – 2016**

¹V.O. Dementyev, ¹I.A. Nasyrov, ¹D.A. Kogogin, ²A.V. Shindin, ²S.M. Grach

¹Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia
vdemen@yandex.ru

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

Аннотация. В работе приводятся результаты статистического анализа экспериментальных данных, полученных в ходе проведения нагревных экспериментов по регистрации искусственного оптического свечения ионосферы при воздействии мощного радиоизлучения на стенде «Сура». При анализе использовались величины интенсивности оптического свечения в красной линии кислорода, значения разности между критической частотой ионосферы и частотой волны накачки, значения толщины резонансного слоя ионосферы, а также высота отражения траекторий волны, рассчитанная методом математического моделирования. Проведенный анализ показывает, что взаимодействие коротковолнового 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 свечение ионосферы; распространение радиоволн; статистический анализ.

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 statistical analysis shows that the interaction of short-wave 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 airglow of the ionosphere; radio wave propagation; statistical analysis.

ВВЕДЕНИЕ

За период проведения экспериментальных кампаний с 2010 по 2016 г. по исследованию воздействия мощного коротковолнового излучения на ионосферу методом регистрации искусственного оптического свечения на стенде «Сура» [<http://www.ckp-rf.ru/usu/73607>] возникла задача сопоставления экспериментальных данных. Целью работы является общий регрессионный и корреляционный анализ имеющихся параметров ионосферы и выявление их общих закономерностей при возникновении искусственного оптического свечения. Решаемыми задачами являются сбор и обработка исходных данных, создание модели ионосферы, выполнение расчетов, сопоставление имеющихся экспериментальных и расчетных данных, оценка и интерпретация полученных результатов.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для проведения анализа были использованы следующие показатели: разность критической частоты ионосферы и частоты волны накачки Δf (МГц), толщина слоя области плазменных резонансов Δh (км),

расчетная 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.

Интенсивность свечения регистрировалась 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, приведенной в [Шиндин и др., 2017]: с использованием нескольких ярких звезд 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 рассчитана величина интенсивности искусственного оптического свечения ионосферы b (Рл).

Для получения значений критической частоты ионосферы (f_oF2) использовались ионограммы со станции ионосферного зондирования Canadian Advanced Digital Ionosonde (Cadi) [Рябов, 2018], расположенной в непосредственной близости со стендом «Сура».

С помощью Международной модели ионосферы IRI [<http://irimodel.org>] с учетом критической частоты ионосферы (f_oF2) были построены высотные профили электронной концентрации для каждого момента времени. С помощью формул пересчета электронной концентрации в плазменную (ленгмюровскую) и верхнегибридную частоты [Гуревич, 2007] были построены высотные профили ленгмюровской и верхнегибридных частот.

Область ионосферы, в которой частота волны накачки (f_0) равна частоте верхнегибридных волн (ω_{UH}) и частоте ленгмюровских волн (ω_L), соответствуют резонансному слою. Способ определения высотных границ области плазменных резонансов рассматривается в работе [Дементьев, 2015]. Разность высот ленгмюровского и верхнегибридного резонансов соответствует толщине резонансного слоя Δh . Для оценки высоты отражения использовался метод расчета лучевых траекторий декаметровых радиоволн, распространяющихся в трехмерно-неоднородной изотропной ионосфере, заключающийся в решении системы дифференциальных уравнений,

описывающих траекторию луча в соответствии с начальными и граничными условиями [Болдовская и др., 1971; Дементьев, 2015].

Для каждого цикла были взяты усредненные значения каждого показателя Δf , Δh , h , b с 90 секунды до конца цикла. Сопоставляя значение каждого показателя Δf , Δh , h со значением интенсивности оптического свечения ионосферы b , был проведен общий регрессионный и корреляционный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГРЕССИОННОГО И КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

В результате выполненных расчетов было обнаружено, что при 68 циклах оптическое свечение наиболее часто возникало в диапазоне Δf от 0 до 1 МГц при значениях интенсивности до 40 Рл, при Δh 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).

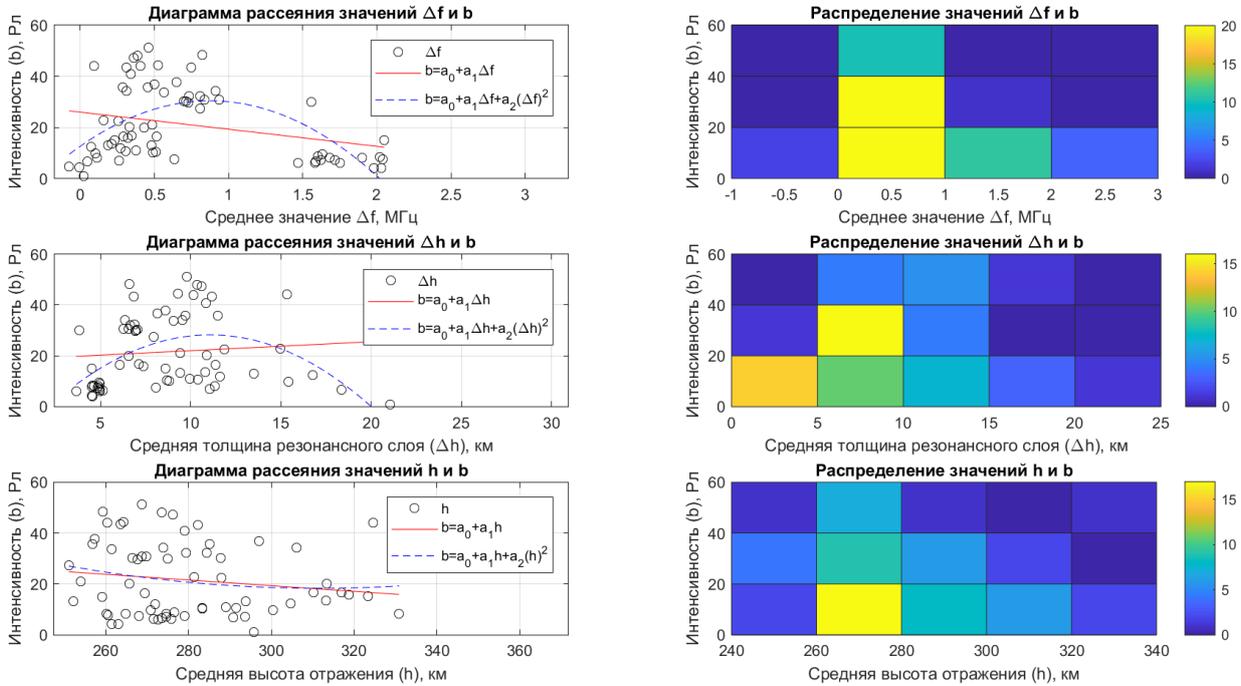


Рис. 1. Левая часть: диаграммы рассеяния для значений $(\Delta f, b)$, $(\Delta h, b)$, (h, b) . Приведены два вида аппроксимации — линейная и параболическая. Правая часть: двумерная гистограмма распределения для набора значений $(\Delta f, b)$, $(\Delta h, b)$, (h, b) . Цветом обозначена эмпирическая 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	$R^2=0.084$; $b=25.96-6.68\Delta f$	$R^2=0.012$; $b=18.50+0.35\Delta h$	$R^2=0.023$; $b=52.81-0.11h$
Уравнение параболы	$R^2=0.336$; $b=12.65+40.57\Delta f-23.188(\Delta f)^2$	$R^2=0.246$; $b=-15.22+7.84\Delta h-0.354(\Delta h)^2$	$R^2=0.028$; $b=251.28-1.5h+0.002h^2$

Результаты корреляционного 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

Способы анализа показателей	$(\Delta f, b)$	$(\Delta h, b)$	(h, b)
Коэффициент корреляции Пирсона	$r = -0.292$	$r = 0.109$	$r = -0.154$
Коэффициент корреляции Спирмена	$r_s = -0.115$	$r_s = 0.288$	$r_s = -0.110$
Коэффициент корреляции Кендалла	$\tau = -0.061$	$\tau = 0.196$	$\tau = -0.064$

При выполнении регрессионного анализа была использована методика, приведенная в работе [Куц, 2018]. Результаты регрессионного анализа для показателей $(\Delta f, b)$, $(\Delta h, b)$, (h, b) приведены в (табл. 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.

Регрессионный анализ показывает, что наиболее подходящей аппроксимацией при уровне значимости $\alpha=0.05$ для показателей $(\Delta f, b)$, $(\Delta h, b)$ является парабола (табл. 1 и левая часть рис. 1). Аппроксимация показателей (h, b) при уровне значимости $\alpha=0.05$ линейным уравнением и уравнением параболы оказалась статистически недостоверной.

При выполнении корреляционного анализа использовались методики, приведенные в работе [Харченко, 2008], по которым были рассчитаны три коэффициента корреляции: Пирсона (r), Спирмена (r_s) и Кендалла (τ).

Значения рассчитанных коэффициентов корреляции для показателей $(\Delta f, b)$, $(\Delta h, b)$, (h, b) приведены в (табл. 2): значения коэффициентов корреляции в прозрачных ячейках таблицы с уровнем значимости $\alpha=0.05$ 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 расчете коэффициента корреляции Пирсона. Для показателей $(\Delta h, b)$ наблюдается слабая положительная связь при расчете коэффициентов корреляции Спирмена и Кендалла. В остальных случаях при уровне значимости $\alpha=0.05$ рассчитанные значения коэффициентов корреляции являются статистически недостоверными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом 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_0F2 не более чем на 1 МГц ($0 \leq \Delta f \leq 1$ МГц).

Авторы выражают благодарность техническому персоналу стенда «Сура» за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при поддержке РНФ (проведение экспериментов — проект № 14-12-00706; обработка и анализ данных — проект № 19-72-00072).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Болдовская И.Г., Егоров И.Б., Кияновский М.П. Программа расчета траекторий луча в изотропной сферически слоистой параболической ионосфере // Современные проблемы физики. Серия: Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. 1971. С. 280–283.

Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177.

Дементьев В.О. Расчет лучевых траекторий декаметровых радиоволн, распространяющихся в трехмерно-неоднородной анизотропной ионосфере: магистерская диссертация. Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань. 2015. https://kpfu.ru/portal/docs/F1411813255/DementievVO_MasterDiss.pdf.

Куц В.В. Линейная регрессия. Определение параметров линейной регрессии методом наименьших квадратов: Методические указания к проведению практических занятий. Курск: ЮЗ-ГУ, 2018. 20 с.

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>.

Харченко М.А. Корреляционный анализ. Учебное пособие для вузов. Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета. 2008. 31 с.

Шиндин А.В. 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.

URL: <http://irimodel.org>.

URL: <http://www.ckp-rf.ru/usu/73607>.