

Тренды максимума электронной концентрации F2 слоя по данным Томской ионосферной станции

С. А. Колесник¹, А. Н. Борисевич²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
E-mail: serkol@mail.tsu.ru

²Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского
отделения Российской академии наук»,
г. Красноярск, Академгородок, 50
E-mail: aborisevich77@gmail.com

В статье предложен алгоритм выявления долговременных трендов в слое F2 ионосферы, на основе данных 76 лет наблюдений Томской ионосферной станции. Рассмотрены ряды как критических частот, так и электронной концентрации полуденных максимумов. Построены аппроксимационные модели для каждого месяца года. Приведены количественные оценки долговременных трендов за весь период наблюдений.

Ключевые слова: долговременные тренды, ионосфера, эмпирическая модель

Trends of the maximum electron concentration of the F2 layer according to the Tomsk Ionospheric Station

S.A. Kolesnik¹, A.N. Borisevich²

¹Tomsk State University

²Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences",

The article proposes an algorithm for identifying long-term trends in the F2 layer of the ionosphere, based on data from 76 years of observations of the Tomsk Ionospheric Station. The series of both critical frequencies and the electron concentration of midday maxima are considered. Approximation models are constructed for each month of the year. Quantitative estimates of long-term trends over the entire observation period are given.

Keywords: long-term trends, ionosphere, empirical model

Введение

Эта работа является продолжением серии исследований, проводимых в Томском государственном университете с начала 2000х годов, по выявлению трендов параметров ионосферы [1, 2]. Большинство работ по выявлению долговременных трендов в ионосфере выполнены в значениях критических частот [3, 4]. Критические частоты удобно использовать при расчете распространения радиоволн, а для анализа временных или пространственных изменений в ионосфере нужно использовать значения электронной концентрации. Поэтому, целью настоящей работы является разработка методики обработки временных рядов как критической частоты, так и максимума электронной концентрации слоя F2 ионосферы, получаемых методом вертикального зондирования всемирной сетью ионосферных станций.

Методика обработки ионосферных данных

Предлагаемая методика обработки временных рядов ионосферных параметров основана на выявлении регрессионных зависимостей между ионосферными параметрами и солнечной активностью (СА). Отработка методики проводилась на данных Томской ионосферной станции, полученных с 1948 по 2023г. Эти 76 лет наблюдений соответствуют 7 циклам СА. Непрерывный ряд измерений Томской ионосферной станции начинается с её основания в 1936 году. Начало исследуемого ряда в 1948 году обусловлено началом регулярных инструментальных измерений солнечной активности в виде индекса $F_{10.7}$, которым параметризовано большинство моделей ионосферы и верхней атмосферы.

В качестве исходных для модели взяты данные по полуденным максимумам критической частоты в интервале 12:00 – 15:00 локального времени. Из ежедневных 15-минутных измерений в заданном временном интервале вычислены медианные значения за каждый месяц. Медианные значения мало чувствительны к случайным короткопериодическим всплескам. Также медианные данные хороши тем, что их можно корректно сравнивать с многочисленными исследовательскими работами, проводившимися до 1990 года, с использованием медианной фильтрации данных.

Оригинальный ряд данных по критической частоте представлен на рис. 1. Наглядно видна гармоника, связанная с 11-летним циклом СА. Также заметен годовой ход, содержащий полугодовую аномалию, и другие сезонные особенности.

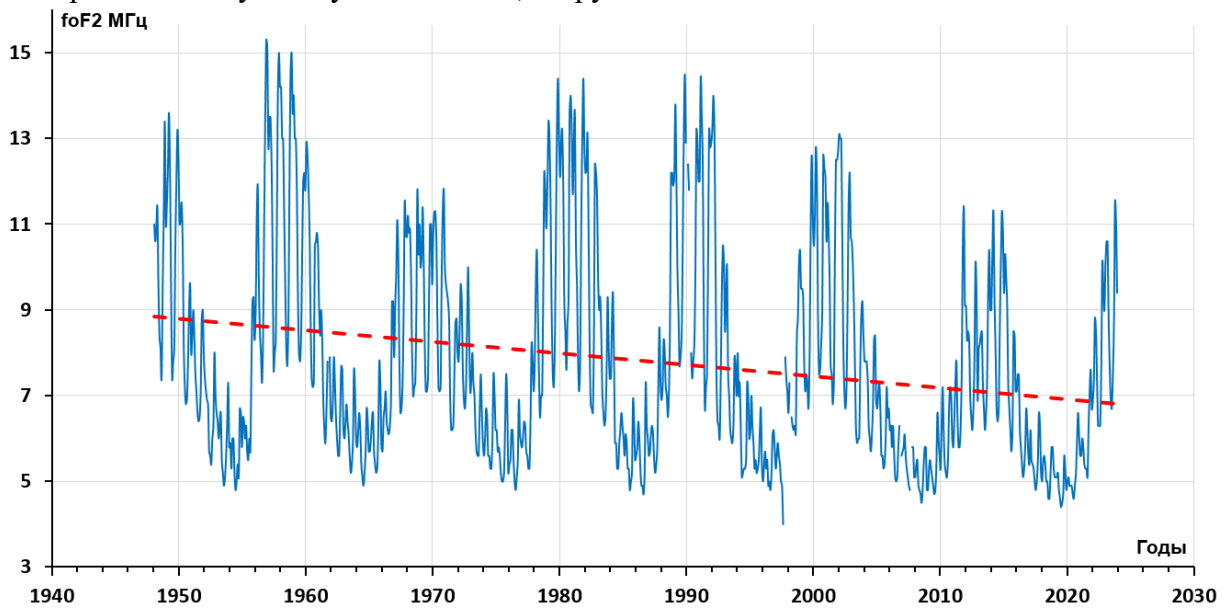


Рис. 1. Полный ряд месячных медиан суточных максимумов $foF2$, и его линейный тренд со скоростью убывания -27кГц/год

Для того, чтобы исключить все эти вариации была разработана методика обработки ионосферных данных, которая заключалась в следующем. В начале критическая частота в мегагерцах была пересчитана в электронную концентрацию по формуле $n_e = 1,24 \cdot 10^{10} foF2^2$ (электронов в кубическом метре). Электронная концентрация максимума слоя F2 является понятной физической характеристикой, зависящей от ионизации компонент верхней атмосферы потоком солнечного излучения. Данные по месячным медианным значениям электронной концентрации сопоставлялись с месячными медианными значениями $F_{10.7}$, при этом методом МНК вычислялись линейные регрессионные модели для каждого месяца года $n_m = a F_{10.7} + b$.

Затем, по необходимости, из значений электронной концентрации восстанавливались значения критических частот $foF2 = 9 \cdot 10^{-6} \sqrt{n_m}$, во-первых, для

проведения сравнения с другими работами, а во-вторых для вычисления количественной оценки правильности выбора регрессионной модели (коэффициента детерминации, R^2). В качестве примера, на рис.2 представлены регрессионные кривые между foF2 и F_{10,7}.

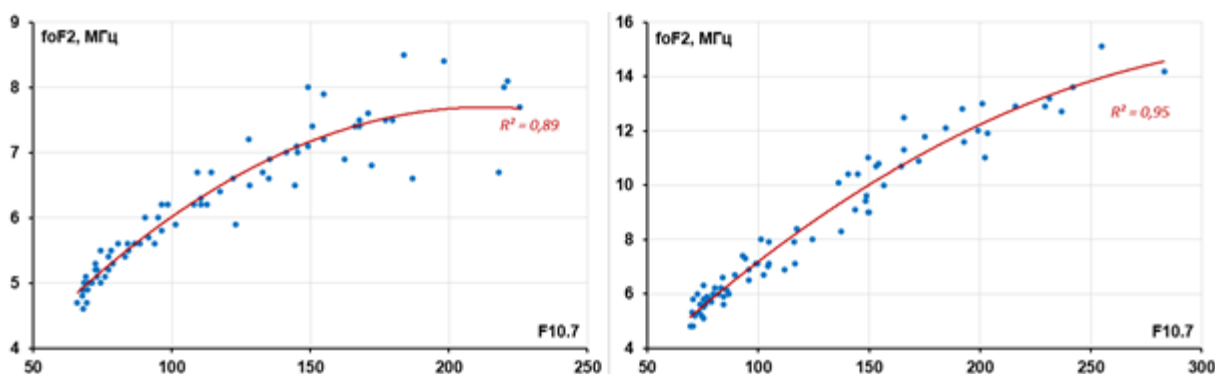


Рис. 2. Регрессии между foF2 и F_{10,7} для июня (слева) и декабря (справа)

Тренды максимума электронной концентрации F2 слоя

В ряде отдельных исследований [3, 4] регрессионные модели строятся на гипотезе о том, что до 1980 года трендов в параметрах ионосферы Земли не существовало. Это предположение было проверено. По ограниченному ряду наблюдений (1948 – 1980) вычислены квадратичные регрессионные модели для критических частот. В результате вычислялась скорость изменения критической частоты (V_{foF2}) в кГц/год при линейной аппроксимации и 11-летнего сглаживания низкочастотного тренда для каждого месяца года в отдельности и для всего ряда в целом (таблица 1). По представленным данным видно, что линейный тренд в рядах данных foF2 до 1980 года также существовал. Условно нулевой тренд, с незначительным уклоном, можно предположить только по «летним» данным (апрель – октябрь), и только если рассматривать оригинальные данные остаточных рядов. Для линейных трендов сглаженных рядов значения наклона в летние месяцы заметно выше. Также наблюдается, что значения трендов для рядов до 1980 года выше, чем для полного ряда наблюдений (1948 – 2023), и скорость изменения составляет -10,8кГц/год.

Таблица 1. Скорость изменения foF2 до 1980 года

месяцы	V_{foF2}	месяцы	V_{foF2}	месяцы	V_{foF2}	месяцы	V_{foF2}
1	-19,3	4	2,5	7	-7,4	10	-1,1
2	-29,1	5	-9,7	8	-8,7	11	-14,1
3	-17,1	6	-5,0	9	-11,6	12	-9,5
среднегодовое значение							-10,8

По остаточным рядам данных $\Delta n_e = n_e - n_m$ (после вычитания из экспериментальных данных - регрессионных моделей, рис. 3), вычислены коэффициенты линейных трендов. Характер поведения наклонов линейных трендов электронной концентрации в различные месяцы полностью совпадает с критическими частотами. На рис. 3 видна общность поведения трендов между отдельными сезонами (весна – осень), а также наглядно представлена нелинейность тенденции уменьшения электронной концентрации в течении всего периода наблюдений. В большинстве

присутствует тенденция спада, но в отдельные периоды тенденция к спаду сменяется на тенденцию к повышению.

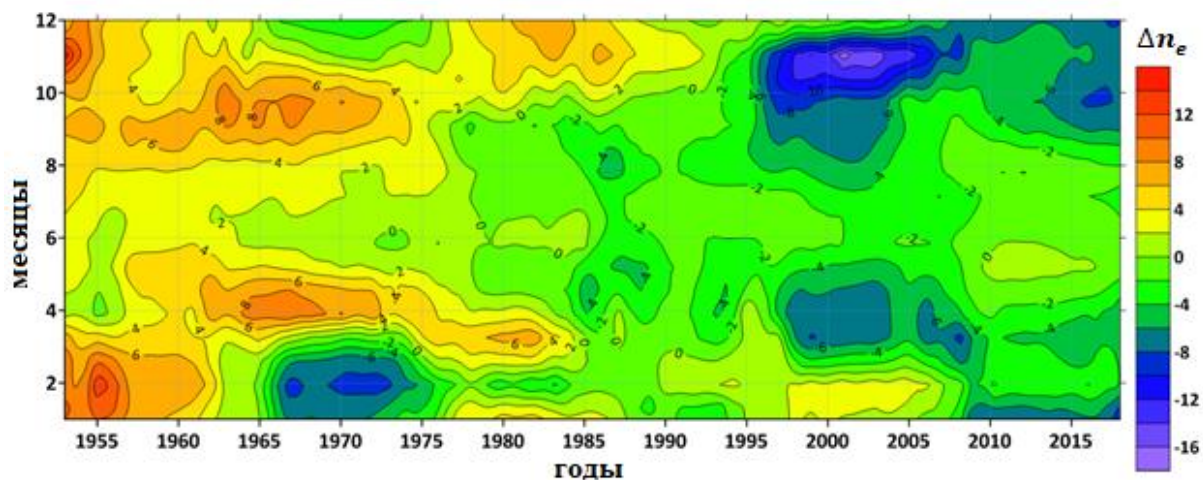


Рис. 3. Долговременные сезонные изменения $\Delta n_e \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$

Среднегодовой тренд критической частоты по всем 12 месяцам года показывает общую тенденцию к понижению с линейной скоростью $-8,3 \text{ кГц/год}$, и содержащиеся в ней гармоники с периодами порядка 15 и 30 лет. Если аппроксимировать этот тренд нелинейным образом, наблюдается снижение скорости уменьшения критической частоты с -13 до -4 кГц/год . Таким образом, можно предположить, что полученные тренды в имеющийся период наблюдений являются частью гораздо более долговременных изменений параметров ионосферы.

Заключение

По данным Томской ионосферной станции за период наблюдений с 1948 по 2023г. выявлены долговременные тренды дневных максимумов электронной концентрации в максимуме F2 области ионосферы. В основном это отрицательные тренды, которые сильно отличаются в зависимости от сезона года. Возможно существование долговременных изменений параметров ионосферы, которые невозможно точно определить даже, имея ряды данных в 76 лет.

Литература

1. Тарашук Ю. Е., Цыбиков Б. Б. Долгопериодные тренды критических частот по данным ионосферных станций Томска и Слоу// Вестник Томского государственного университета. 2003. № 278. С. 150-153.
2. Rustam K. Khaitov, Valeri T. Sarychev, Sergei Kolesnik Long-term trends of the critical frequency of the F2-layer of the ionosphere, Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 92924W (November 25, 2014); doi: 10.1117/12.2075442
3. Данилов А. Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52, № 3. С. 291–312.
4. Системный мониторинг ионосферы. Сборник научных трудов / Под ред. доктора физ.-мат. наук Н.Г. Котонаевой. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. — 416 с.