

УДК: 551.510.535

DOI: 10.26907/rwp29.2025.76-79

ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ В 18-25 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ТОМСКОЙ ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ

А. Н. Борисевич¹, С. А. Колесник²

¹ ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН, г. Красноярск, Академгородок, 50
E-mail: aborisevich77@gmail.com

² Томский государственный университет, г. Томск, пр. Ленина, 36
E-mail: serkol@mail.tsu.ru

Аннотация. Для выявления многолетних климатических трендов в ионосфере рассмотрены вопросы построения регрессионных моделей зависимостей электронной концентрации максимума слоя F2 ионосферы от солнечной активности. Исследовались ряды непрерывных наблюдений на Томской ионосферной станции с 1947 по 2024 год, охватывающие 8 циклов солнечной активности. Электронная концентрация фиксировалась в момент суточного полуденного максимума. Регрессионные зависимости электронной концентрации от значений солнечной активности вычислялись отдельно для каждого месяца года, отдельно для каждого солнечного цикла. Показаны различия в отклике электронной концентрации на индекс F10,7 в разных циклах солнечной активности.

Ключевые слова: ионосфера; слой F2; электронная концентрация; климатические тренды, циклы солнечной активности

ELECTRON CONCENTRATION OF THE F2 IONOSPHERE LAYER IN CYCLES 18-25 OF SOLAR ACTIVITY ACCORDING TO THE TOMSK IONOSPHERE STATION DATA

A. N. Borisevich, S. A. Kolesnik

Abstract. To identify long-term climate trends in the ionosphere, the issues of constructing regression models electron concentration of ionospheric F2 layer maximum dependence of solar activity were considered. The series of continuous observations at the Tomsk ionospheric station from 1947 to 2024, covering 8 cycles of solar activity, were studied. The electron concentration was taken at the time of the daily midday maximum. Regression dependencies of the electron concentration on solar activity values were calculated separately for each month of the year, separately for each solar cycle. Differences in the response of the electron concentration to the F10.7 index in different solar activity cycles are shown.

Keywords: ionosphere; electron concentration; F2 layer; climate trends, solar cycles

В этой работе использованы данные, полученные на Томской ионосферной станции (ТИС), которая имеет самый длинный и самый однородный ряд оригинальных наблюдений, начиная с 1936 года по сегодняшнее время. Исследуемый ряд ограничен началом в 1947 году, в связи с началом регулярных наблюдений солнечной активности (СА) в радиодиапазоне - индекс F10,7. Этот индекс выражается в солнечных единицах потока $10^{-22} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$. В качестве параметра, характеризующего максимум электронной концентрации $N_e F2 - 10^4 \cdot \text{см}^{-3}$, слоя F2 ионосферы, был выбран дневной максимум ($N_e F2_{\text{max}}$), наблюдаемый после местного полудня. Рассмотрено поведение суточного хода $N_e F2$ в диапазоне 13:00 – 15:00 местного времени отдельно за каждый месяц года. В различные месяцы дневной максимум в слое F2 ионосферы наблюдается в немного разное время, в том числе по причине разного времени наступления локального полудня из-за движения Земли по эллиптической орбите. Для Томска максимальный зенитный угол Солнца наблюдается в разные месяцы от 13:05 до 13:35 местного времени. По статистике многолетних значений, электронная концентрация в диапазоне 13:00 – 15:00 различается в пределах $\pm 1\%$.

В недавних работах по выявлению климатических трендов параметров ионосферы [1, 2] отмечено, что необходимо учитывать сезон года и время суток наблюдений. Годовой ход $N_e F2_{\text{max}}$ содержит сложное сочетание годовой, полугодовой и сезонных гармоник. Для исключения влияния СА при вычислении многолетних трендов, строились регрессионные модели зависимости $N_e F2_{\text{max}}$ от СА за каждый месяц года. В работе [3], применительно к

выявлению долговременных трендов, указывается, что для различных циклов СА реакция ионосферы может отличаться, и надо особенно внимательно относиться к вычитанию влияния СА на параметры ионосферы в каждом отдельном солнечном цикле. Хотя, при создании моделей ионосферы, этот эффект уже был отмечен в работах 30-летней давности, например в [4]. Для выявления эффектов влияния различных циклов СА нами построены регрессионные модели $N_e F_{2\max}$ для каждого из циклов, с 18-го по текущий 25-ый. Отдельные циклы СА по длительности не превышают 11 лет (18-ый, начавшийся до 1947г., 19-ый, 21-ый, 22-ой, 25-ый, продолжающийся в настоящее время). Т.е. среднемесячных или месячных медианных значений на каждый месяц в одном цикле приходится не более 10 точек. Поэтому, для получения более достоверной статистики, было принято решение вычислять регрессионные модели для каждого месяца года по ежесуточным измерениям $N_e F_{2\max}$.

Циклы СА отличаются как по длительности, так и по интенсивности (рис. 1). Максимумы $F_{10,7}$ в 20-ом и 24-ом циклах в среднегодовом исчислении не превышают 150. Наименьшими по величине и длительности СА стали минимумы между 23-им и 24-ым, и между 24-ым и 25-ым циклах. В связи с этим стал актуальным вопрос о различиях зависимости индекса $F_{10,7}$ и ионизирующего потока солнечного УФИ в разных циклах СА [5]. Регулярные внеатмосферные спутниковые измерения потока ионизирующего солнечного ультрафиолета начались с 1977 года. В работе [6] описывается модель EUVAC консолидирующая все предыдущие разовые ракетные измерения спектра солнечного ионизирующего ультрафиолета, и появившиеся к тому времени непрерывные ряды наблюдений отдельных спектральных линий. В частности, показано, что в отдельных спектральных линиях наблюдается линейная зависимость потока ионизирующего УФИ от $F_{10,7}$ которая имеет качественный перелом при значениях $F_{10,7}$ от 180 до 225 (в среднем около 200).

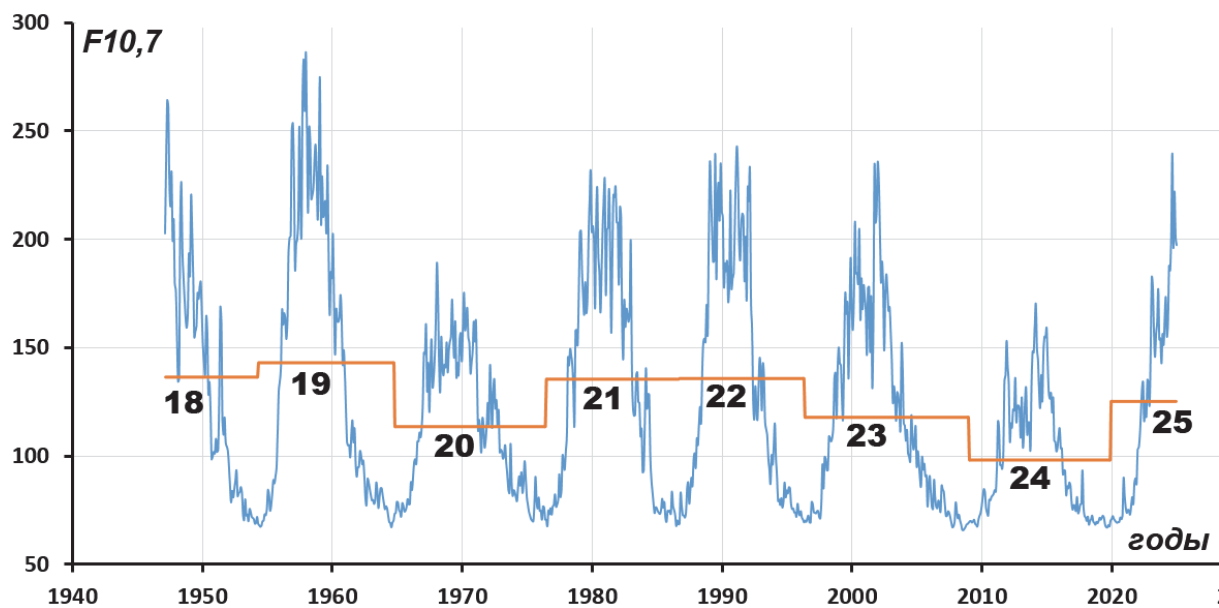


Рис. 1. Временной ход среднемесячных значений солнечной активности. Показаны средние значения $F_{10,7}$ за полные циклы СА. Цифрами подписаны общепринятые номера циклов

Учитывая ограниченность отдельных циклов СА по амплитуде, а также нелинейные эффекты зависимости ионизирующего УФИ и индекса $F_{10,7}$ при высоких значениях СА, сравнение регрессионных моделей зависимости $N_e F_{2\max}$ от $F_{10,7}$ проводилось в диапазоне, ограниченном $F_{10,7} \leq 150$. В этом диапазоне все регрессии имеют линейную форму зависимости. Результаты вычисления линейных регрессий на примере июня месяца для различных циклов СА представлены на рис. 2. На рисунке показаны только полные циклы СА (с 19-ого по 24-ый). Значения коэффициентов линейных регрессий от максимальной (22-ой цикл) до минимальной (23-ий цикл) отличаются на 9%. Очень близкие по форме и по

значениям в F10,7 регрессионные кривые в 21-ом и 22-ом циклах СА, при этом различия в отклике электронной концентрации на СА составляет 4%.

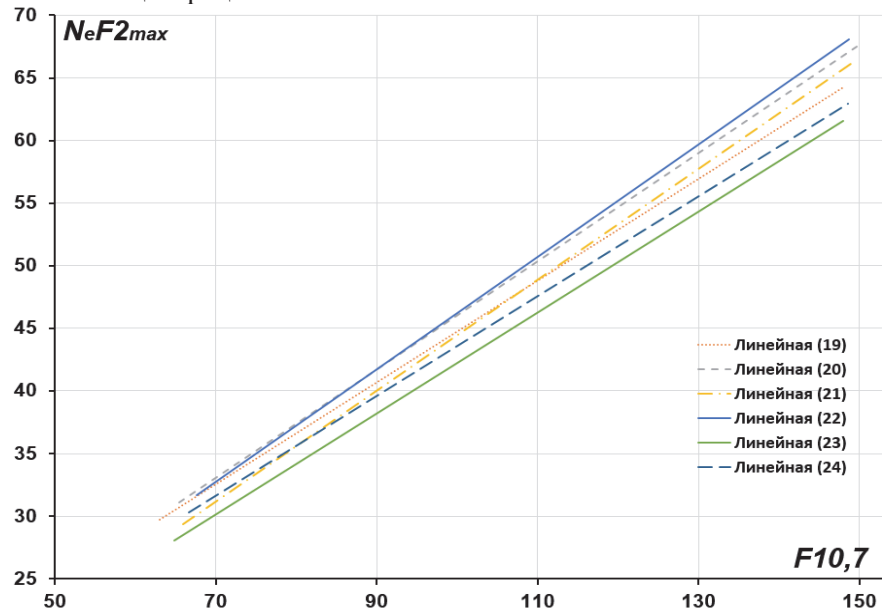


Рис. 2. Линейные регрессии зависимости $N_e F_{2\max}$ от F10,7 в июне месяце для различных циклов солнечной активности (с 19-ого по 24-ый)

Что касается долговременных трендов, то для всех месяцев года наблюдается постепенное уменьшение электронной концентрации, связанное с динамикой циклов СА. На рис. 3. В верхней части представлен график месячных медианных значений $N_e F_{2\max}$ для месяца август. Скорость изменения линейного тренда электронной концентрации на всем периоде наблюдений составила $-0,196$ ($10^4 \text{ см}^{-3} \text{ год}^{-1}$).

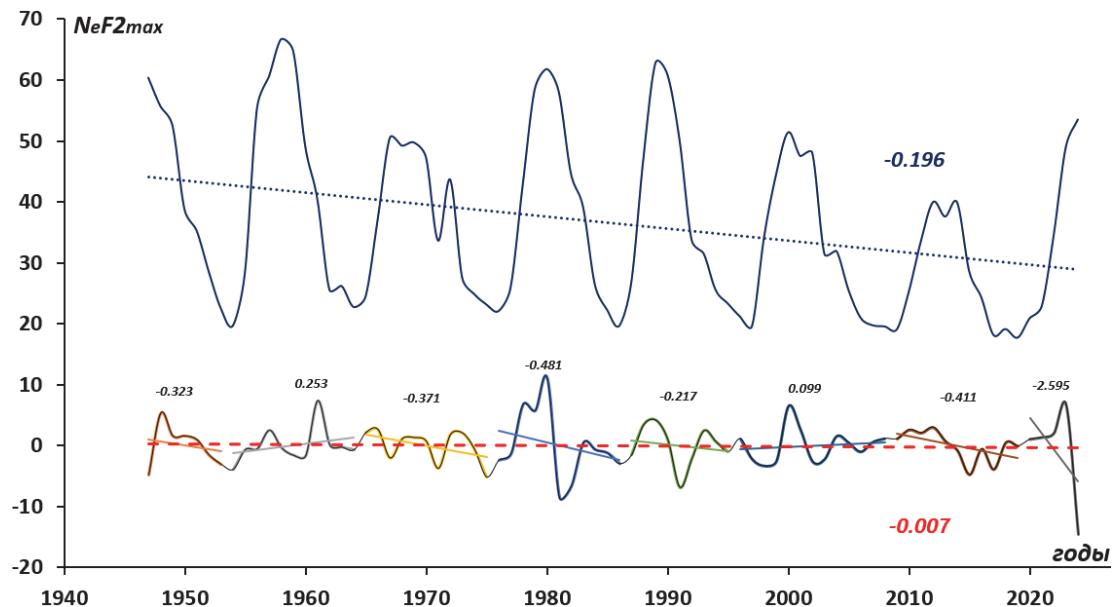


Рис. 3. Верхний график – месячные медианные значения $N_e F_{2\max}$ (сплошная кивая) и их линейный тренд (пунктирная кривая). Нижний график – результат вычитания регрессионных моделей (сплошная кривая) и линейные тренды за каждый цикл СА отдельно (сплошные линии разных цветов). Приведен линейный тренд остаточного ряда за весь период наблюдений (штриховая линия). Подписаны скорости изменения линейных трендов электронной концентрации ($10^4 \text{ см}^{-3} \text{ год}^{-1}$). График построен для августа месяца

После последовательного вычитания регрессионных моделей каждого цикла СА из оригинальных данных скорость изменения линейного тренда электронной концентрации составила $-0,007$ ($10^4 \text{см}^{-3} \text{год}^{-1}$), что составляет 3,5% от скорости уменьшения электронной концентрации в августе. В периоды различных циклов СА скорость изменения линейного тренда электронной концентрации менялась от $-2,5954$ (неполный 25-ый цикл), до положительного значения $0,2534$ в 19-ом цикле. Из чего можно заключить, что уменьшение концентрации на длинных промежутках времени идет нелинейно. В некоторые периоды тенденция спада меняется на тенденцию роста.

Аналогичный анализ данных был проведен для всех сезонов года. Если не рассматривать неполные циклы СА, то скорость изменения линейного тренда электронной концентрации меняется в диапазоне от $-0,797$ до $1,888$ ($10^4 \text{см}^{-3} \text{год}^{-1}$). Количество месяцев в разных циклах СА с положительными значениями – 29 (40% наблюдений), отрицательными значениями – 43 (60% наблюдений). В 19-ом цикле СА все тренды возрастающие. Наибольшее количество положительных трендов в разных циклах СА – в январе месяце. Наименьшее – в мае, июне и июле. Наибольший разброс значений линейных трендов наблюдается с ноября по апрель, наименьший – с июня по октябрь.

Особого внимания в дальнейшем заслуживает вопрос исследования низкочастотных колебаний параметров ионосферы длиннее одного цикла СА.

Список литературы

1. Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. – Т. 60, № 4. – С. 411–435.
2. Laštovička J. Long-Term changes in ionospheric climate in terms of foF2 // Atmosphere. – 2022. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 110.
3. Laštovička, J., Burešová, D., Kouba, D., and Križan, P. Stability of solar correction for calculating ionospheric trends // Ann. Geophys. – 2016. – Iss. 34. – P. 1191–1196.
4. Balan N., Bailey G.J., Su Y.Z. Variations of the ionosphere and related solar fluxes during solar cycles 21 and 22 // Adv Space Res. – 1996. – Vol. 18. – P. 11–14.
5. Chen, Y., L. Liu, and Wan W. Does the F10.7index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009? // J. Geophys. Res. – 2011. – V. 116.
6. Richards, P. G., Fennelly, J. A., & Torr, D. G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations // J. Geophys. Res. (Space Physics). – 1994. 99(A5). – P. 8981–8992.