УДК 550.388.2 DOI: 10.26907/rwp29.2025.126-129

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СТАНЦИИ «ЯКУТСК» ЗА ПЕРИОД С 1956 ПО 2017 ГГ.

С.Е. Кобякова, А.Ю. Гололобов, Р.Р. Каримов, А.Е. Степанов

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера ЯНЦ СО РАН, 677027, г. Якутск, пр. Ленина, 31

E-mail: s.e.kobyakova@ikfia.ysn.ru

Аннотация. В докладе рассмотрены особенности долговременных вариаций критической частоты слоя F2 по данным вертикального зондирования на станции «Якутск» (62.01° с. ш., 129.43° в. д., 57.12° MLAT) за период с 1956 по 2017 гг. Показано, что в течении шести циклов солнечной активности (19 – 24 циклы) наблюдаются отрицательные тренды среднегодовых значений критической частоты слоя F2 как в 12 LT, так и в 00 LT местного времени.

Ключевые слова: долговременные тренды, солнечная активность, субавроральная ионосфера, критическая частота слоя F2.

LONG-TERM VARIATIONS OF THE CRITICAL FREQUENCY OF THE F2 LAYER ACCORDING TO DATA FROM THE YAKUTSK IONOSPHERIC STATION FOR THE PERIOD FROM 1956 TO 2017.

S.Ye. Kobyakova, A.Yu. Gololobov, R.R. Karimov, A.Ye. Stepanov

Abstract. The report considers features of long-term variations of the F2 layer critical frequency by vertical sounding data at the Yakutsk station (62.01°N, 129.43°E, 57.12° MLAT) for the 1956 to 2017 period. It is shown that during six solar activity cycles (19 - 24 cycles) the negative trends of annual average values of the F2 layer critical frequency both at 12 LT and 00 LT local time are observed.

Keywords: long-term trends, solar activity, subauroral ionosphere, critical frequencies of the F2-layer.

Введение

Основываясь на продолжительных наблюдениях на разных ионосферных станциях, было выполнено множество исследований, посвященных анализу трендов критической частоты F2-слоя (foF2). Большинство исследователей в своих работах получают отрицательные тренды. [1-5]. На сегодняшний день наиболее распространённым объяснением отрицательных трендов считается охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы Земли [6]. В отмеченных выше работах, в основном, используются данные станций, расположенных в средних и низких широтах. Поэтому необходимо рассмотреть также тренды критической частоты foF2 на субавроральных и авроральных станциях. Измерения ионосферы на субавроральной станции «Якутск» проводятся непрерывно с февраля 1956 года по настоящее время, что позволяет исследовать изменения характеристик ионосферы на протяжении длительного времени.

Результаты и обсуждение

Для выявления трендов использовались значения критической частоты слоя F2 ионосферы в два момента времени, соответствующих полудню и полуночи местного времени (LT), т.е. в 12 LT и 00 LT. Отсутствующие значения foF2 в некоторые дни (например, из-за поглощения радиосигналов – условие B, экранирования нижележащим слоем вышележащего слоя – условие A, технических сбоев и т.д.) восполнялись данными за час до или после 12 LT и 00 LT. В итоге было получено около 42 тысяч значений foF2 для полуденных и полуночных часов за весь период наблюдений, вариации которых представлены на рисунке 1.

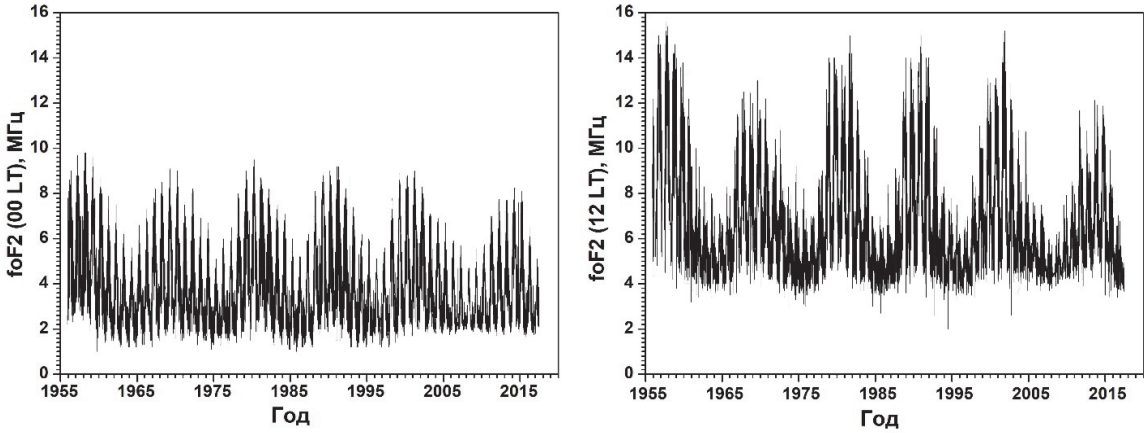

Рис. 1. Вариации (ежедневные значения) критической частоты foF2 в полуночные и полуденные часы местного времени по данным ионосферной станции «Якутск» за период с 1956 по 2017 гг.

На рисунке 2 показано распределение критической частоты foF2 в координатах день года - год для полуночных и полуденных часов по местному времени. На графиках четко видны 11-летние циклы солнечной активности, а также сезонные изменения критической частоты foF2 в указанные часы. Распределение foF2 зависит от времени суток и времени года: в 00 LT значения foF2 выше летом, тогда как в 12 LT, наоборот, достигают максимума зимой, что называется «зимней аномалией».

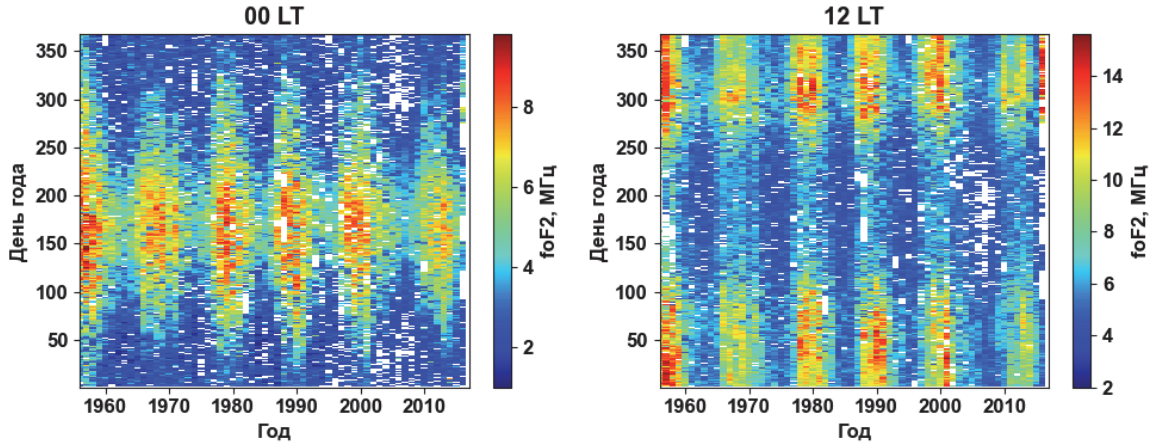

Рис. 2. Распределение критических частот foF2 в координатах день года - год в полуночные и полуденные часы местного времени по данным ионосферной станции «Якутск» за период с 1956 по 2017 гг. Значения критических частот foF2 показаны на цветовой шкале

По данных foF2 для полуденных и полуночных часов были вычислены месячные медианные значения foF2. Далее, полученные медианные значения были усреднены по годам.

Для анализа зависимости foF2 от солнечной активности и влияния геомагнитной активности применена множественная линейная регрессия foF2 с двумя независимыми переменными F10.7 и Ap [1]:

$$foF2_{теор} = A + B \cdot F10.7 + C \cdot Ap. \quad (1)$$

Затем вычисляется разница ΔfoF2:

$$\Delta foF2 = foF2_{эксп} - foF2_{теор}. \quad (2)$$

По полученному ряду ΔfoF2 находится искомый тренд T:

$$\Delta foF2 = D + T \cdot год, \quad (3)$$

где D – константа, T – величина тренда foF2 [кГц/год].

На рис. 3 представлены результаты, полученные после применения регрессионного метода (формула 1). Слева сплошной кривой показаны вариации наблюдаемых среднегодовых значений $foF2_{эксп}$ на станции «Якутск», а штриховой кривой — по полученной множественной линейной регрессионной модели $foF2_{теор}$ (модельные) (а, в). Справа представлены вариации их разницы ΔfoF2 (б, г) в полуденные и полуночные часы. Штриховой линией показан тренд ΔfoF2 (T). Как видно, тренд в данном случае составляет -3.58 кГц/год и -4,02 кГц/год для 00 LT и 12 LT, соответственно. В целом можно отметить, что полученные тренды хорошо согласуются с результатами, полученными в работе [1].

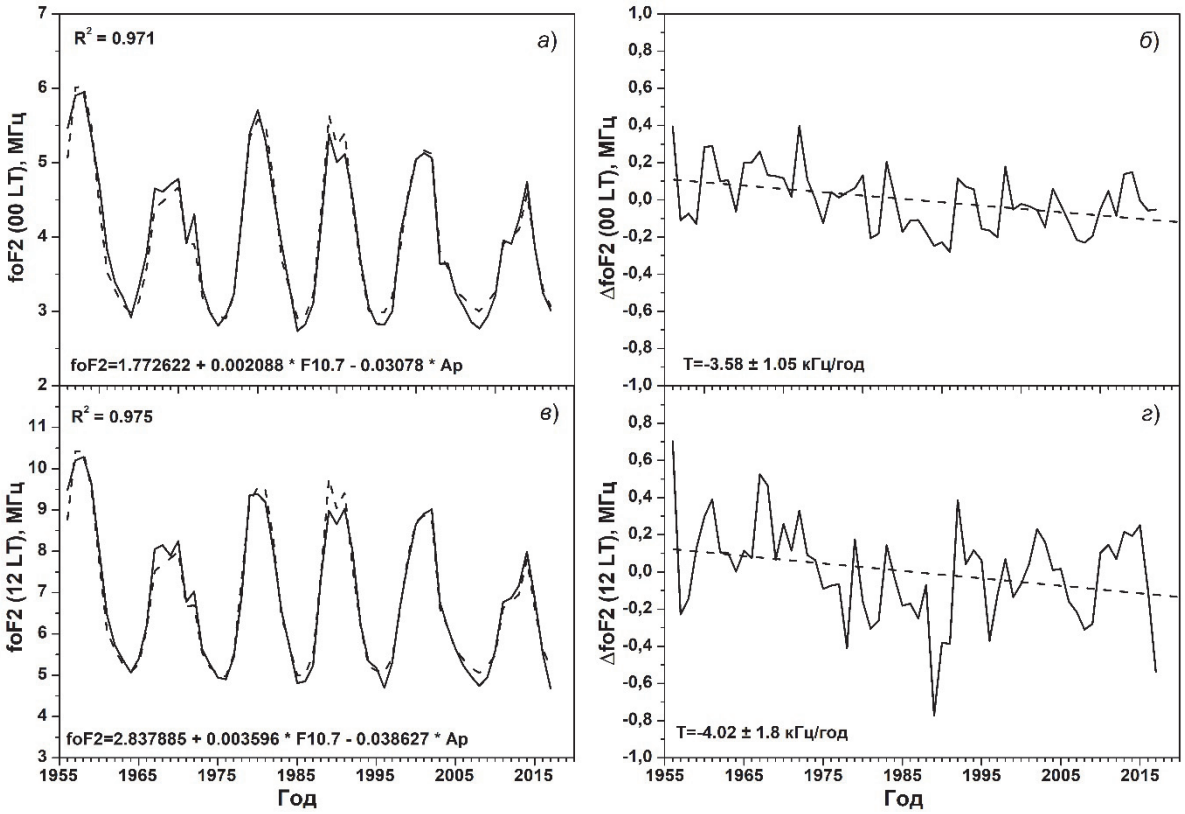

Рис. 3. Вариации наблюдаемых (сплошная кривая) и модельных (штриховая кривая) среднегодовых медианных значений критической частоты foF2 (а, в) и вариации их разниц ΔfoF2 (б, г) в полуночные и полуденные часы по данным станции «Якутск» за период с 1956 по 2017 гг. Штриховая линия – тренд ΔfoF2

Заключение

Представлены результаты анализа долговременных вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы, полученные на основе данных 62-летних наблюдений (1956-2017 гг.) на субавроральной станции «Якутск». Результаты исследования, охватывающее почти 6 солнечных циклов, показали отрицательные тренды foF2 в полуденные и полуночные часы, с величинами -3.58 кГц/год (00 LT) и -4.02 кГц/год (12 LT).

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-17-20002).

Авторы благодарят Мировой центр данных (WDC) в России (http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/) за предоставление данных по индексу солнечной активности F10.7, а также Мировой центр данных по геомагнетизму в Киото (http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/) за предоставление данных по индексу Ap геомагнитной активности.

Список литературы

1. Bremer J., Damboldt T., Mielich J., et al. Comparing long-term trends in the ionospheric F2 region with two different methods // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. – Vol. 77. – P. 174–185. DOI:10.1016/j.jastp.2011.12.017.
2. Danilov A. D., Konstantinova, A. V. Long-term variations in the parameters of the middle and upper atmosphere and ionosphere (review) // Geomagnetism and Aeronomy. – 2020. – Vol. 60. – Iss. 4. – P. 397–420. DOI: 10.1134/S0016793220040040.
3. Laštovička J. Long-Term changes in ionospheric climate in terms of foF2 // Atmosphere. – 2022. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 110. DOI: 10.3390/atmos13010110.
4. Jakowski N., Hoque M.M., Mielich J. Long-term relationships of ionospheric electron density with solar activity // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2024. – Vol. 14. – Iss. 24. DOI: 10.1051/swsc/2024023.
5. Жеребцов Г.А., Ратовский К.Г., Медведева И.В. Долговременные вариации максимума электронной концентрации и температуры области мезопаузы: зависимости от солнечной, геомагнитной и атмосферной активности, долговременные тренды // Солнечно-земная физика. – 2024. – Т. 10. – № 4. – С. 5–16. DOI: 10.12737/szf-104202401.
6. Laštovička J., Akmaev R.A., Beig G., Bremer J., Emmert J.T., Jacobi C., et al. Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere // Annales Geophysicae. – 2008. – V. 26. – I. 5. – P. 1255–1268. https://doi.org/10.5194/angeo-26-1255-2008.