

ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПО ДАННЫМ ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ «ЯКУТСК» ЗА ПЕРИОД С 1956 ПО 2017 Г.

TRENDS IN THE F2-LAYER CRITICAL FREQUENCY FROM DATA OBTAINED AT THE IONOSPHERIC STATION YAKUTSK DURING THE PERIOD FROM 1956 TO 2017

С.Е. Кобякова 

Институт космифизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, s.e.kobyakova@ikfia.ysn.ru

А.Ю. Гололобов 

Институт космифизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, Gololobov@ikfia.ysn.ru

Р.Р. Каримов 

Институт космифизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, karimov@ikfia.ysn.ru

А.Е. Степанов 

Институт космифизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

S.E. Kobyakova

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, s.e.kobyakova@ikfia.ysn.ru

A.Yu. Gololobov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, Gololobov@ikfia.ysn.ru

R.R. Karimov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, karimov@ikfia.ysn.ru

A.E. Stepanov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Проведен статистический анализ данных вертикального зондирования ионосферы на станции «Якутск» (62.01° N, 129.43° E, 57.12° MLAT) за период с 1956 по 2017 г., включающий шесть циклов солнечной активности, с целью выявления долгосрочных изменений в слое F2 субавроральной ионосферы, а также их связи с солнечной и геомагнитной активностью. Рассмотрены вариации одного из основных параметров слоя F2 — критической частоты f_oF2 . Выявлена высокая корреляция между критической частотой слоя F2 и индексом солнечной активности $F10.7$. Показано, что в шести циклах солнечной активности (19–24 циклы) наблюдаются отрицательные тренды среднегодовых значений критических частот слоя F2 как в полуденные, так и в полуночные часы. Обнаружено, что тренды f_oF2 зависят от сезона и времени суток. Абсолютные значения трендов выше в равноденственные и летние сезоны. В полуденные часы в равноденственные месяцы наблюдаются пики отрицательных трендов, достигающие ~ -11 кГц/год.

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

Abstract. A statistical analysis of vertical ionospheric sounding data from the Yakutsk station (62.01° N, 129.43° E, 57.12° MLAT) for the period from 1956 to 2017 encompassing six solar cycles has been carried out to identify long-term changes in the F2 layer of the subauroral ionosphere and their relationship with solar and geomagnetic activity. We examined variations in one of the main parameters of the ionospheric F2 layer, the critical frequency. A high correlation was found between the F2-layer critical frequency and the solar activity index $F10.7$. It is shown that during six solar cycles (cycles 19–24) there were negative trends in annual average F2-layer critical frequencies both at midday and at midnight. It has been revealed that f_oF2 trends depend on the season and time of day. Absolute values of the trends are higher in equinoctial and summer seasons. Peak negative trends are observed at midday during equinoctial months, reaching approximately -11 kHz/year.

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

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что состояние верхней атмосферы испытывает долгосрочные вариации вследствие изменения климата, обусловленного увеличением количества парниковых газов в атмосфере (см., например, [Laštovička et al., 2012; Rezac et al., 2018]). Критическая частота слоя F2 ионосферы f_oF2 является

одним из ключевых параметров, определяющих эффективность распространения радиоволн различных диапазонов.

Исследования долгосрочных трендов ионосферных параметров ведутся уже более 35 лет, начиная с работ [Roble, Dickinson, 1989; Rishbeth, 1990],

в которых на основе теоретических расчетов показано, что удвоение количества углекислого газа CO_2 в атмосфере приводит к изменению высоты максимума слоя F2 $h_m\text{F2}$ на 15–20 км. На основе длительных наблюдений на различных ионосферных станциях выполнено множество исследований трендов различных характеристик ионосферы, таких как критическая частота F2-слоя, высота максимума F2-слоя, критическая частота E-слоя [Bremer, 1998; Mikhailov, Marin, 2000; Bremer et al., 2004; Laštovička, 2005, 2017, 2022; Laštovička et al., 2006; Laštovička, Jelínek, 2019; Rishbeth, 1997; Danilov, 2008, 2009, 2017; Данилов, Константинова, 2013, 2014; Колесник и др., 2019; Danilov, Konstantinova, 2020; Sivakandan et al., 2023; Jakowski et al., 2024; Danilov et al., 2024; Жеребцов и др., 2024]. В работе [Laštovička et al., 2006] по данным одной станции Juliusruh с 1976 по 1996 г. установлено наличие небольшого отрицательного тренда $f_o\text{F2}$. В работах [Bremer et al., 2012; Mielich, Bremer, 2013] проведен анализ трендов $f_o\text{F2}$ и $h_m\text{F2}$ по данным 124 станций по всему миру и показано, что устойчивые глобальные тренды $h_m\text{F2}$ и $f_o\text{F2}$ составляют -0.138 км/год и -0.0038 МГц/год. В статье [Danilov, 2017] отмечается, что наблюдаются расхождения между рассчитанными в разных работах трендами, которое может быть связано с тем, что в расчетах трендов не учитывались суточные и сезонные вариации, а также с тем, что анализировались ряды данных различной длины.

Наиболее общепринятым механизмом отрицательных трендов $f_o\text{F2}$ в настоящее время считается охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы Земли [Laštovička et al., 2008a]. В работе [Danilov, 2008] по данным 12 среднеширотных станций показано, что знак тренда может быть связан со знаком магнитного склонения и наклона станции, что свидетельствует о связи трендов $f_o\text{F2}$ с трендом зонального термосферного ветра. В работе [Данилов, Константинова, 2013] выявлена тенденция усиления отрицательных трендов $f_o\text{F2}$ в зимний период по сравнению с летним периодом. В отмеченных выше работах в основном используются данные среднеширотных и низкоширотных станций. Однако в работе [Данилов, Константинова, 2014] отмечается, что тренды для станций, различающихся по широте и долготе, отличаются друг от друга. В связи с этим необходимо рассмотреть также тренды критической частоты $f_o\text{F2}$ на субавроральных и авроральных станциях. Измерения на субавроральной станции «Якутск» (62.01° N , 129.43° E , 57.12° MLAT) непрерывно ведутся с февраля 1956 г. по настоящее время, что дает возможность исследовать изменения параметров ионосферы за длительный период.

В данной работе приводятся результаты анализа долговременных (за шесть циклов солнечной активности) вариаций критической частоты слоя F2 по данным вертикального зондирования ионосферы на ст. «Якутск» за период с 1956 по 2017 г. Анализ проведен с целью определения трендов в значениях критической частоты F2-слоя субавроральной ионосферы в полуденные и полуночные часы местного времени с учетом солнечной и геомагнитной активности.

1. АППАРАТУРА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

На ионосферной станции «Якутск» с февраля 1956 г. по ноябрь 2002 г. регистрация параметров ионосферы проводилась с помощью панорамной автоматической ионосферной станции «АИС». Эти станции были введены в эксплуатацию в Советском Союзе в период проведения Международного геофизического года (МГГ). В комплект каждой станции входили: ионозонд типа «АИС», антенная система, комплект измерительных приборов и электростанция автономного питания. Мощность передатчика в импульсном режиме — не менее 10 кВт на низких и 5 кВт на высоких частотах рабочего диапазона. Длительность излучаемых импульсов 50–70 мкс. Частота повторения — 50 импульсов в секунду с синхронизацией от сети переменного тока [Васильев и др., 1961]. Обработка данных проводилась по международным правилам интерпретации ионограмм, получаемых при наземном вертикальном зондировании [Руководство URSI..., 1977].

С ноября 2002 г. по настоящее время измерения параметров ионосферы на ст. «Якутск» проводятся с помощью дигизонда DPS-4 [Reinisch, 2007]. Система DPS-4 имеет передатчик малой мощности (300 Вт против 5–10 кВт для предыдущих систем) и включает специальные методы обработки сигнала для определения направления прихода радиосигнала, фазовых, поляризационных и других характеристик.

Известно, что тренды $f_o\text{F2}$ зависят от времени суток [Danilov, 2015]. С учетом этого в настоящей работе рассмотрены данные по критической частоте F2-слоя для полудня и полуночи местного времени (LT). При отсутствии значений $f_o\text{F2}$, вызванном поглощением радиосигналов, экранировкой нижележащим слоем вышележащего слоя, техническим сбоем и т. п., использовались данные за час до или после 12 и 00 LT. Исходный ряд данных насчитывает около 42 тыс. значений $f_o\text{F2}$ для полуденных и полуночных часов за весь период наблюдений.

На рис. 1, а, б представлены вариации $f_o\text{F2}$ в полуночные и полуденные часы местного времени по данным ионосферной станции «Якутск» за период с 1956 по 2017 г. На рис. 1, в, г эти же данные приведены как функция года и дня года. На рисунках отчетливо прослеживаются 11-летние вариации, обусловленные солнечной активностью, а также сезонная зависимость $f_o\text{F2}$. Видно, что распределения $f_o\text{F2}$ в полночь и полдень различаются: в 00 LT значения $f_o\text{F2}$ выше в летние месяцы, а в 12 LT, наоборот, в зимние (зимняя аномалия) (рис. 1, в, г).

На рис. 2, а, б представлены среднемесячные и среднегодовые вариации индексов геомагнитной и солнечной активности A_p и $F10.7$, полученные с интернет-ресурсов [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>; <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/>], а на рис. 2, в показаны медианные месячные и среднегодовые значения $f_o\text{F2}$ в 00 и 12 LT. Видно, что минимальные среднегодовые значения $f_o\text{F2}$ наблюдаются в периоды минимумов солнечной активности и составляют около

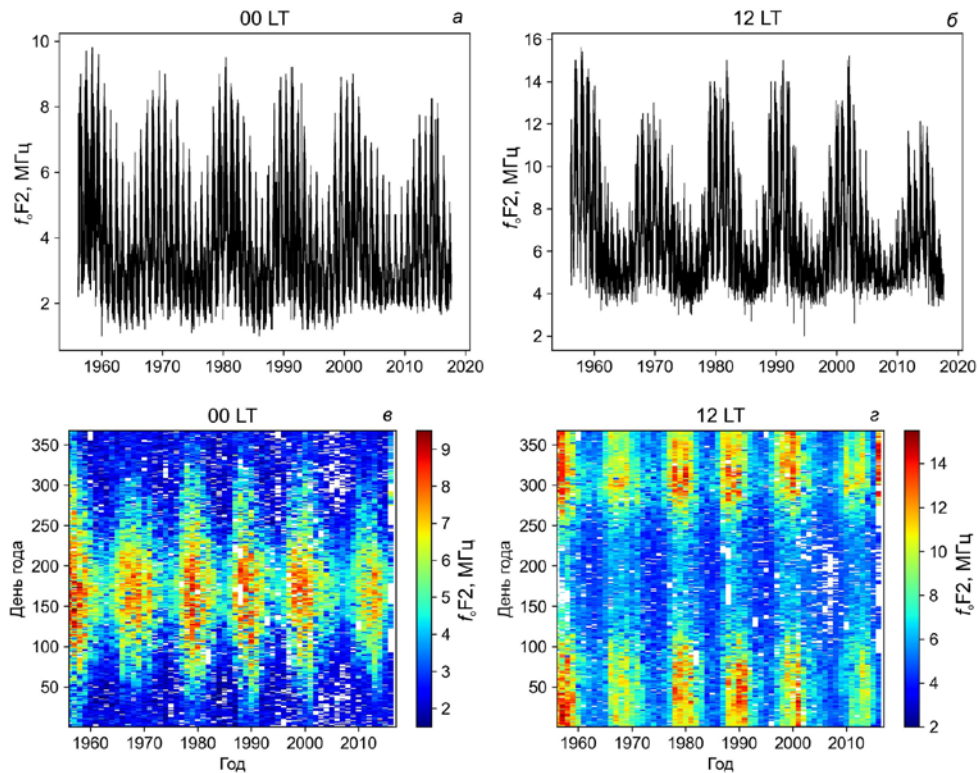


Рис. 1. Вариации ежедневных значений критической частоты f_oF2 (а, б) и f_oF2 как функция года и дня года (в, з) в полуночные (а, в) и полуденные (б, з) часы местного времени по данным ионосферной станции «Якутск» за период с 1956 по 2017 г.

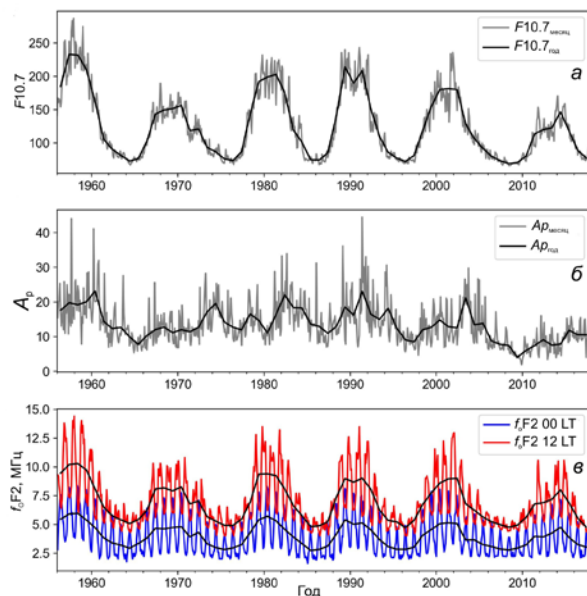


Рис. 2. Вариации среднемесячных (серый) и среднегодовых (черный) значений $F10.7$ [10^{-22} Вт м $^{-2}$ Гц $^{-1}$] (а) и A_p (б), медианные месячные (синий, красный) и среднегодовые (черный) значения критической частоты f_oF2 (в) в полуночные и полуденные часы местного времени по данным ст. «Якутск» за период с 1956 по 2017 г.

2.5 МГц для полуночных условий и около 5.0 МГц для полуденных. Верхние предельные значения f_oF2 соответствуют максимумам солнечной активности и составляют ~ 6.0 МГц для полуночных и ~ 10.0 МГц для полуденных условий за весь рассматриваемый период. Средние значения f_oF2 за шесть циклов сол-

нечной активности составили 3.96 МГц и 6.84 МГц для ночных и дневных условий соответственно.

2. МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ

Возмущения в ионосфере связаны со многими процессами солнечного, геомагнитного и волнового происхождения (см., например, [Брюнелли, Намгалдзе, 1988; Гальперин и др., 1990]). На широте Якутска вариации параметров ионосферы в периоды возмущений могут быть обусловлены также динамикой главного ионосферного провала. С целью исследования влияния геомагнитной активности на тренды f_oF2 в настоящей работе рассмотрены два ряда данных: 1) полный набор данных; 2) набор данных, из которого исключены дни с суточным значением K_p более 24 [Брюнелли, Намгалдзе, 1988].

Методика определения долговременных трендов f_oF2 основана на удалении вариаций, связанных с солнечной (и геомагнитной) активностью, на основе регрессионного анализа. Рассчитанные тренды зависят от выбора регрессионной модели, поэтому в настоящей работе рассмотрены несколько моделей:

1) простая линейная регрессия с одной независимой переменной $F10.7$ [Bremer et al., 2004]:

$$f_oF2_{\text{модель}} = A + B \cdot F10.7; \quad (1)$$

2) квадратичная регрессионная модель зависимости f_oF2 от $F10.7$ и $F10.7^2$ [Bremer et al., 2004; Laštovička et al., 2006]:

$$f_oF2_{\text{модель}} = A + B \cdot F10.7 + C(F10.7)^2; \quad (2)$$

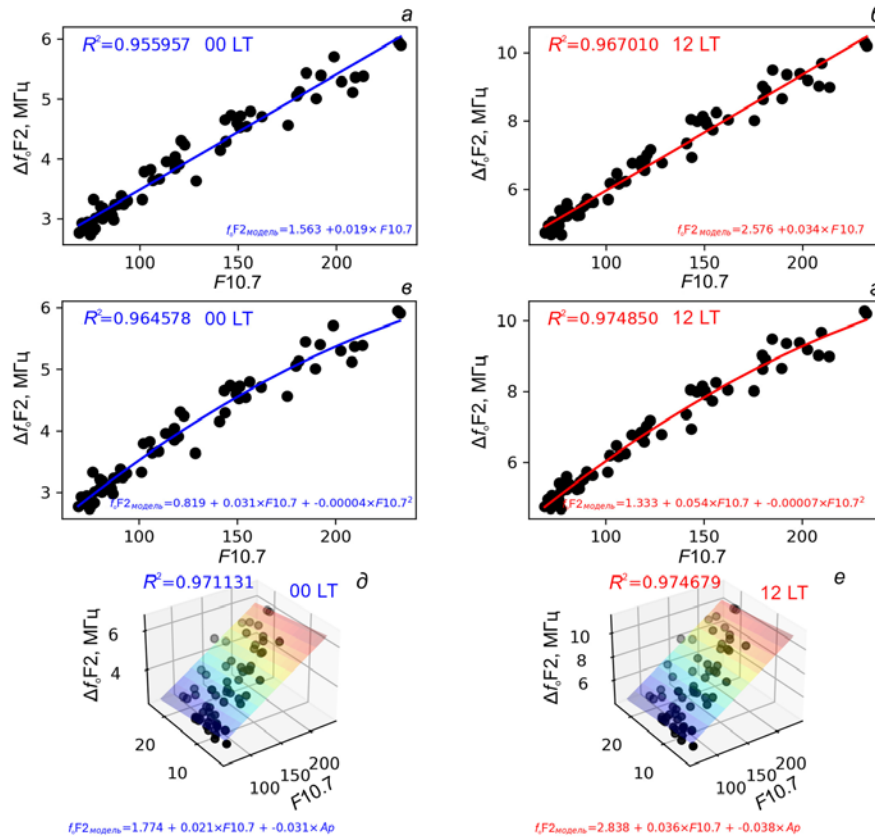


Рис. 3. Зависимость критической частоты f_oF2 в полуночные (а, в, д) и полуденные (б, г, е) часы от индекса солнечной активности $F10.7$ (черные точки), а также от индекса геомагнитной активности A_p (д, е) по данным ст. «Якутск» за период с 1956 по 2017 г. и аппроксимация этой зависимости с использованием трех регрессионных моделей (сплошные линии и плоскость): а, б — линейной; в, г — квадратичной; д, е — множественной

3) множественная линейная регрессия f_oF2 с двумя независимыми переменными $F10.7$ и A_p [Bremer et al., 2004], позволяющая учитывать влияние геомагнитной активности:

$$f_oF2_{\text{модель}} = A + B \cdot F10.7 + C \cdot A_p, \quad (3)$$

где A , B и C — константы.

После вычисления $f_oF2_{\text{модель}}$ находится разница между экспериментальными и модельными значениями f_oF2 с целью устранения зависимости вариации f_oF2 от солнечной и геомагнитной активности:

$$\Delta f_oF2 = f_oF2_{\text{эксп}} - f_oF2_{\text{модель}}. \quad (4)$$

Затем рассчитывается тренд T [кГц/год] с использованием линейной регрессии

$$\Delta f_oF2 = D + T \cdot \text{год}, \quad (5)$$

где D — константа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены зависимости f_oF2 от $F10.7$ и A_p , полученные после применения регрессионных моделей. Регрессионные функции и коэффициенты детерминации приведены на панелях. Видно, что все модели дают достаточно высокие коэффициенты детерминации R^2 , что свидетельствует о высокой статистической значимости. Наибольшие значения R^2 наблюдаются для множественной регрессионной мо-

дели, учитывающей как солнечную, так и геомагнитную активность. На рис. 4 представлены рассчитанные значения Δf_oF2 и регрессионные прямые тренда (T). Видно, что как в 12 LT, так и в 00 LT для всех моделей наблюдается отрицательный тренд.

Однако полученные величины трендов различаются. Наибольшие значения T принимает при множественной линейной регрессии (-3.595 кГц/год для 00 LT и -4.097 кГц/год для 12 LT), что почти в три раза выше, чем при простой линейной регрессии (-1.381 кГц/год для 00 LT и -1.341 кГц/год для 12 LT). Данные различия могут быть связаны с влиянием геомагнитной активности, поэтому мы провели аналогичные расчеты для ряда данных с исключенными возмущенными днями, т. е. только для дней с суточным индексом K_p не более 24 ($\Sigma K_p \leq 24$). Результаты представлены на рис. 5 и обобщены в табл. 1.

Исключение магнитовозмущенных дней приводит в целом к увеличению коэффициента детерминации R^2 и увеличению абсолютных значений тренда (табл. 1). В этом случае наибольшие значения R^2 наблюдаются при квадратичной линейной регрессии. Из сравнения рис. 4 и 5 видно, что рассчитанные тренды для линейной и квадратичной регрессий увеличиваются почти в два раза. Так, при учете всех дней для линейной регрессии $T = -1.341$ кГц/год в 12 LT (рис. 4, б), а при исключении возмущенных дней $T = -2.571$ кГц/год (см. рис. 5, б).

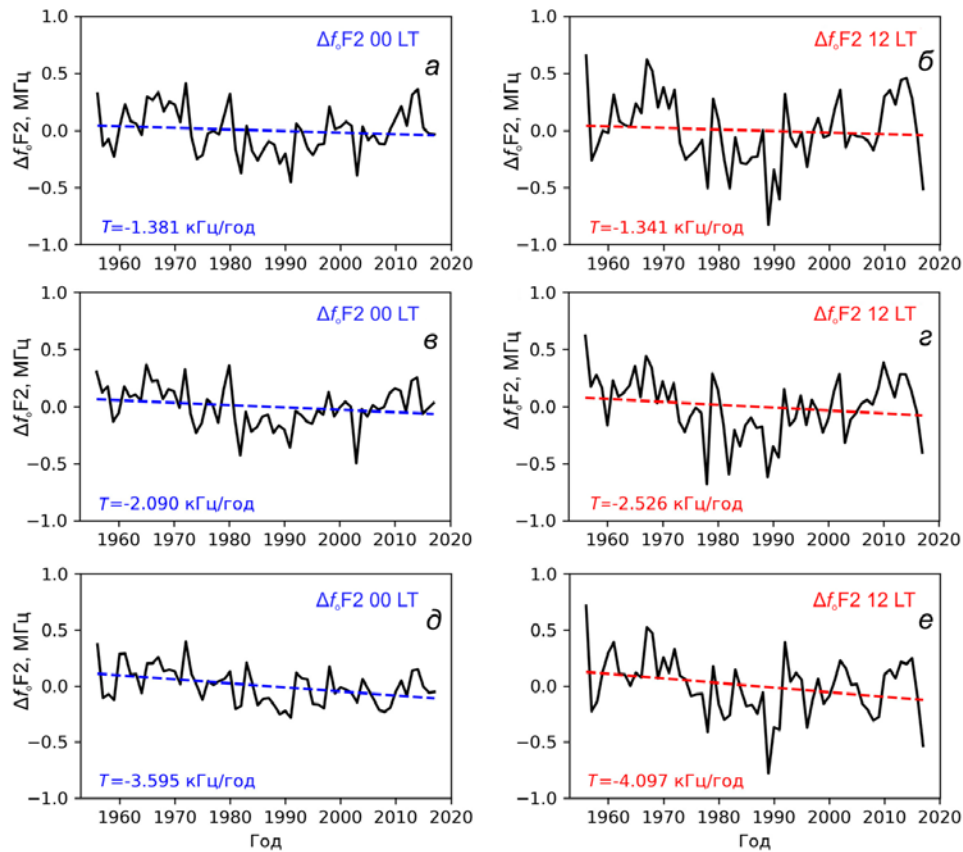


Рис. 4. Рассчитанные вариации Δf_oF2 (черные сплошные кривые) и их линейные регрессии (штриховые прямые) с 1956 по 2017 г. для разных регрессионных моделей зависимости f_oF2 от солнечной и геомагнитной активности: а, б — линейной; в, г — квадратичной; д, е — множественной

Таблица 1

Годовые тренды f_oF2 в 00 и 12 LT и коэффициенты детерминации (R^2) для разных регрессионных моделей

Выборка данных	Модель	Тренд, кГц/год		Коэффициент детерминации с моделью R^2	
		00 LT	12 LT	00 LT	12 LT
Все дни	Линейная модель	-1.381	-1.341	0.956	0.967
	Квадратичная модель	-2.090	-2.526	0.965	0.975
	Множественная модель	-3.595	-4.097	0.971	0.975
Спокойные дни ($\Sigma K_p \leq 24$)	Линейная модель	-2.633	-2.571	0.968	0.972
	Квадратичная модель	-3.258	-3.760	0.975	0.979
	Множественная модель	-3.566	-3.624	0.971	0.973

Рассчитанные нами тренды согласуются с глобальными трендами, полученными в [Bremer et al., 2012; Mielich, Bremer, 2013], где по данным 106 и 124 станций показано, что средний глобальный тренд f_oF2 равен -1.8 кГц/год и -3.8 кГц/год соответственно. В работе [Alfonsi et al., 2002] рассчитаны тренды для станций Lycksele (64.6° N, 18.8° E, 62.6 MLAT), Slough (51.5° N, 359.5° E, 54 MLAT), Rome (41.8 , 12.5 , 42.3 MLAT) и Mawson (67.6° S, 62.9° E, 73.3 MLAT) за ~ 36 лет. Для магнитоспокойных дней ($A_p \leq 7$ нТл) тренды составляют -2.8 кГц/год, -2.7 кГц/год, -6.8 кГц/год и -5.5 кГц/год соответственно. Sivakandan et al. [2023] по данным станции Juliusruh (54.6° N, 13.4° E) с использованием метода LSP (Lomb-Scargle periodogram) рассчитали, что тренды f_oF2 в полуденное и полуночное время равны

-4.44 кГц/год и -4.13 кГц/год соответственно. В работе [Жеребцов и др., 2024] обнаружен отрицательный тренд N_mF2 около $-0.0049 \cdot 10^5$ см $^{-3}$ /год днем и около $-0.0026 \cdot 10^5$ см $^{-3}$ /год ночью на ст. «Иркутск» (52° N, 104° E), долгота которой близка к долготе ст. «Якутск». С учетом квадратичной зависимости N_mF2 и f_oF2 данные тренды соответствуют -2.6 кГц/год днем и -0.23 кГц/год ночью, что также согласуется с нашими результатами. Между тем в ряде работ [Bremer et al., 2012; Cnossen, Franzke, 2014; Danilov, Mikhailov, 1999] показано, что отрицательные тренды f_oF2 для разных станций могут быть как значительно ниже -0.2 кГц/год, так и значительно выше рассчитанных нами значений и достигать $-20 \div -30$ кГц/год. Данные различия могут быть обусловлены выбором для анализа разных интервалов

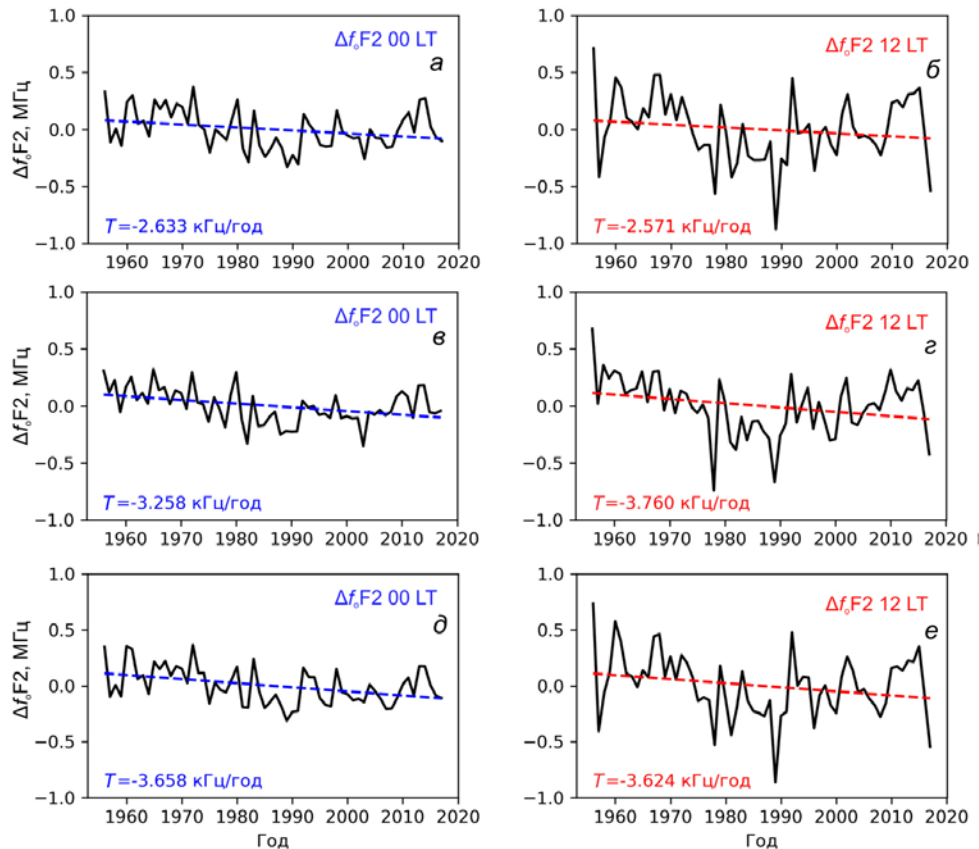


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но для магнитоспокойных дней ($\Sigma K_p < 24$)

времени и разным местоположением станций, а также сезонными особенностями, как будет показано далее.

Заметим, что в [Жеребцов и др., 2024] на основе данных ст. «Иркутск» сделан вывод о том, что учет влияния геомагнитной активности практически не сказывается на величине ошибки регрессии, что противоречит нашим результатам. Это может быть связано с тем, что ст. «Иркутск» находится значительно экваториальнее ст. «Якутск», расположенной в субавроральной зоне. Для корректной оценки вклада геомагнитной активности необходимы дополнительные исследования с привлечением более высокоширотных данных ионозондов Комплексной геофизической станции (п. Жиганск, 66.8° N, 123.4° E) и Полярной геофизической обсерватории (п. Тикси, 71.5° N, 128.5° E).

В работе [Danilov, 2015; Laštovička, 2022] на основе данных среднеширотных станций Slough (51.5° N, 1.3° W), Juliusruh (54.6° N, 13.4° W) и Rome (41.8° N, 12.5° E) показано, что тренды f_0F_2 зависят не только от местного времени, но и от сезона. Для исследования зависимости тренда от сезона по данным ст. «Якутск» были рассчитаны месячные и сезонные тренды (зима, весна, лето, осень) для магнитоспокойных дней ($\Sigma K_p \leq 24$) на основе разных регрессионных моделей. Сезонные тренды представляют собой усредненные месячные медианные значения за соответствующие три месяца. Результаты представлены на рис. 6. Видно, что в 00 LT летом для всех моделей наблю-

дается отрицательный тренд (~ -7 кГц/год), а зимой — слабый положительный ~ 0.5 – 1.5 кГц/год, при этом в феврале наблюдается увеличение положительного тренда до ~ 4 кГц/год. В 12 LT наблюдаются два отрицательных пика тренда: в марте и в октябре, достигающие ~ -11 кГц/год. Подобные пики отрицательных трендов в полуденное время (10–14 LT) в равноденственные месяцы отмечались также в [Laštovička et al., 2008b; Данилов, Константинова, 2015], что свидетельствует об адекватности полученных результатов. Летом тренд составляет ~ -4 кГц/год и по абсолютной величине меньше, чем в равноденствие. Получено также, что во все сезоны наблюдаются преимущественно отрицательные тренды. Как в 00 LT, так и в 12 LT отрицательные тренды больше в летние и равноденственные месяцы, чем в зимние, что согласуется с результатами работы [Danilov, 2015]. Однако малые абсолютные величины трендов в зимние месяцы в полуденные часы не согласуются с [Danilov, 2015], где получено, что для ст. Juliusruh в полдень (10–16 LT) тренд в зимние месяцы (ноябрь–февраль) 1985–2009 гг. достигает ~ -33 кГц/год, что значительно превосходит его для множественной регрессии ~ -2 кГц/год в Якутске по нашим расчетам. Вероятно, это может быть связано с разными интервалами времени, выбранными для анализа, и различиями в местоположении станций «Якутск» и Juliusruh. Таким образом, на широтах ст. «Якутск» наблюдается сезонная зависимость тренда f_0F_2 как в полуденные, так и в полуночные часы. Рассчитанные тренды и коэффи-

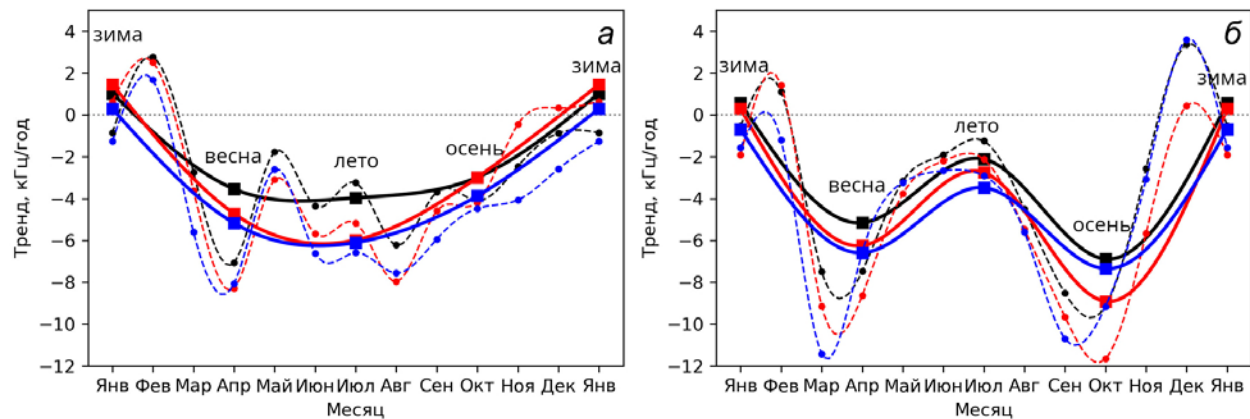


Рис. 6. Сезонные вариации трендов f_oF2 в 00 (а) и 12 (б) LT на основе данных за магнитоспокойные дни ($K_p \leq 24$) для разных моделей: линейной регрессионной (черный), квадратичной регрессионной (красный), множественной регрессионной (синий). Вариации трендов среднегодовых значений f_oF2 обозначены сплошными линиями, а медианных месячных — штриховыми

Таблица 2

Тренды среднегодовых значений f_oF2 и коэффициенты детерминации R^2 для квадратичной регрессионной модели в разные сезоны в 00 и 12 LT

Выборка данных	Сезон	Тренд, кГц/год		Коэффициент детерминации с моделью R^2	
		00 LT	12 LT	00 LT	12 LT
Все дни	зима	1.834	0.720	0.915	0.960
	весна	-1.898	-3.623	0.918	0.918
	лето	-4.872	-1.706	0.907	0.864
	осень	-2.476	-7.874	0.934	0.954
Спокойные дни ($\Sigma K_p \leq 24$)	зима	1.449	0.291	0.923	0.958
	весна	-4.718	-6.246	0.937	0.936
	лето	-5.980	-2.752	0.930	0.905
	осень	-2.985	-8.911	0.952	0.965

коэффициенты детерминации для квадратичной регрессионной модели представлены в табл. 2.

Полученные результаты статистического анализа данных вертикального зондирования ионосферы за период с 1956 по 2017 г. на субавроральной станции «Якутск», находящейся на значительном удалении по долготе от других субавроральных ионосферных станций, дополняют знания о долговременных трендах ионосферных параметров в Северном полушарии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование долговременных вариаций критической частоты f_oF2 на основе рядов данных субавроральной станции «Якутск» за 62 года, включающих шесть циклов солнечной активности. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Коэффициенты корреляции между среднегодовыми значениями $F10.7$ и f_oF2 в полуденные и полуночные часы показывают статистически значимую связь вариаций критических частот F2-слоя с солнечной активностью.

2. Выявлены отрицательные тренды критических частот F2-слоя в полуденные и полуночные часы за период с 1956 по 2017 г. Тренды для полного

ряда данных составили -1.38 кГц/год, -2.09 кГц/год и -3.63 кГц/год в 00 LT и -1.26 кГц/год, -2.526 кГц/год и -3.71 кГц/год в 12 LT в соответствии с линейной, квадратичной и множественной регрессионной моделями.

3. Исключение из ряда данных магнитовозмущенных дней приводит к увеличению абсолютных значений трендов f_oF2 по линейной и квадратичной моделям и уменьшению разницы между трендами по различным моделям, что указывает на влияние геомагнитной активности на долговременные вариации f_oF2 над субавроральной станцией «Якутск».

4. Обнаружена зависимость тренда f_oF2 от сезона. Наименьшие абсолютные значения тренда наблюдаются в зимние месяцы. В полуночные часы абсолютная величина отрицательного тренда больше в летний сезон. В полуденные часы наблюдаются пики отрицательных трендов в равноденственные месяцы (сентябрь, октябрь, март), достигающие -11 кГц/год.

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 [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>] за предоставление данных по индексам геомагнитной активности.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988, 527 с.
- Васильев Г.В., Васильев К.Н., Гончаров Л.П. Автоматическая панорамная ионосферная станция типа АИС. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1961, т. 1, № 1, с. 120–127.
- Гальперин Ю.И., Сивцева Л.Д., Филиппов В.М., Халипов В.Л. *Субавроновая верхняя ионосфера*. Новосибирск: Наука, 1990, 192 с.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Поведение параметров слоя F2 на грани веков. 1. Критическая частота. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2013, т. 53, № 3, с. 361–372. DOI: [10.7868/S0016794013030048](https://doi.org/10.7868/S0016794013030048).
- Данилов А.Ю., Константинова А.В. Связь трендов f_oF2 с географическими и геомагнитными координатами. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2014, т. 54, № 3, с. 348–354. DOI: [10.7868/S0016794014030043](https://doi.org/10.7868/S0016794014030043).
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Вариации трендов f_oF2 с сезоном и временем суток. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2015, т. 55, № 1, с. 56–63. DOI: [10.7868/S0016794015010046](https://doi.org/10.7868/S0016794015010046).
- 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](https://doi.org/10.12737/szf-104202401) / Zharebtsov G.A., Ratovsky K.G., Medvedeva I.V. Long-term variations in peak electron density and temperature of mesopause region: Dependence on solar, geomagnetic, and atmospheric activities, long-term trends. *Sol-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 4, pp. 3–13. DOI: [10.12737/stp-104202401](https://doi.org/10.12737/stp-104202401).
- Колесник С.А., Пикалов М.В., Колмаков А.А. Особенности долгопериодных трендов основных параметров F2 области ионосферы в г. Томске. *Распространение радиоволн. Труды XXVI Всероссийской научной конференции (РПВ-26)*. Казань, 2019, т. 1, с. 196–202.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм: пер. с англ. Отв. ред. Н.В. Медникова. М.: Наука, 1977, 342 с.
- Alfonsi L., De Franceschi G., Perrone L., Scotto C. Long-term trends of the ionosphere at mid and high latitude regions. *Proc. URSI*. 2002, 1797. URL: <https://www.ursi.org/proceedings/procGA02/papers/p1797.pdf> (дата обращения 30 мая 2025 г.).
- Bremer J. Trends in the ionospheric E and F regions over Europe. *Ann. Geophys.* 1998, vol. 16, iss. 8, pp. 986–996. DOI: [10.1007/s00585-998-0986-9](https://doi.org/10.1007/s00585-998-0986-9).
- Bremer J., Alfonsi L., Bencze P., et al. Long-term trends in the ionosphere and upper atmosphere parameters. *Ann. Geophys.* 2004, vol. 47, pp. 1009–1029. DOI: [10.4401/ag-3283](https://doi.org/10.4401/ag-3283).
- Bremer J., Damboldt T., Mielich J., et al. Comparing long-term trends in the ionospheric F2 region with two different methods. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 77, pp. 174–185. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.12.017).
- Crossen I., Franzke C. The role of the Sun in long-term change in the F2 peak ionosphere: New insights from EEMD and numerical modeling. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2014, vol. 119, pp. 8610–8623. DOI: [10.1002/2014JA020048](https://doi.org/10.1002/2014JA020048).
- Danilov A.D. Long-term trends in the relation between day-time and nighttime values of f_oF2 . *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, iss. 5, pp. 1199–1206. DOI: [10.5194/angeo-26-1199-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-1199-2008).
- Danilov A.D. Critical frequency f_oF2 as an indicator of trends in thermospheric dynamics. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009, vol. 71, iss. 13, pp. 1430–1440. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.04.001).
- Danilov A. Seasonal and diurnal variations in f_oF2 trends. *J. Geophys. Res.* 2015, vol. 120, pp. 3868–3882. DOI: [10.1002/2014JA020971](https://doi.org/10.1002/2014JA020971).
- Danilov A. New results in studying f_oF2 trends. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 163, pp. 103–113. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.04.002](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.04.002).
- Danilov A.D., Mikhailov A.V. Letter to the Editor: Spatial and seasonal variations of the f_oF2 long-term trends. *Ann. Geophys.* 1999, vol. 17, iss. 9, pp. 1239–1243. DOI: [10.1007/s00585-999-1239-2](https://doi.org/10.1007/s00585-999-1239-2).
- 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, pp. 397–420. DOI: [10.1134/S0016793220040040](https://doi.org/10.1134/S0016793220040040).
- Danilov A.D., Berbeneba N.A., Konstantinova A.V. Trends in the F2-layer parameters to 2023. *Adv. Space Res.* 2024, vol. 73, iss. 12, pp. 6054–6065. DOI: [10.1016/j.asr.2024.03.036](https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.03.036).
- 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](https://doi.org/10.1051/swsc/2024023).
- Laštovička J. On the role of solar and geomagnetic activity in long-term trends in the atmosphere–ionosphere system. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005, vol. 67, iss. 1, pp. 83–92. DOI: [10.1016/j.jastp.2004.07.019](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.07.019).
- Laštovička J. A review of recent progress in trends in the upper atmosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 163, pp. 2–13. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.03.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.009).
- Laštovička J. Long-term changes in ionospheric climate in terms of f_oF2 . *Atmosphere*. 2022, vol. 13, iss. 1, p. 110. DOI: [10.3390/atmos13010110](https://doi.org/10.3390/atmos13010110).
- Laštovička J., Jelínek Š. Problems in calculating long-term trends in the upper atmosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 18, iss. 10, pp. 80–86. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.04.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.04.011).
- Laštovička J., Mickailov A.V., Ulich T., et al. Long-term trends in f_oF2 : A comparison of various methods. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006, vol. 68, iss. 17, pp. 1854–1870. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.02.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.02.009).
- Laštovička J., Akmaev R.A., Beig G., et al. Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere. *Ann. Geophys.* 2008a, vol. 26, iss. 5, pp. 1255–1268. DOI: [10.5194/angeo-26-1255-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-1255-2008).
- Laštovička J., Yue X., Wan W. Long-term trends in f_oF2 : their estimating and origin. *Ann. Geophys.* 2008b, vol. 26, pp. 593–598. DOI: [10.5194/angeo-26-593-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-593-2008).
- Laštovička J., Solomon S.C., Qian L. Trends in the neutral and ionized upper atmosphere. *Space Sci. Rev.* 2012, vol. 168, pp. 113–145. DOI: [10.1007/s11214-011-9799-3](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9799-3).
- Mielich J., Bremer J. Long-term trends in the ionospheric F2 region with two different solar activity indices. *Ann. Geophys.* 2013, vol. 31, iss. 2, pp. 291–303. DOI: [10.5194/angeo-31-291-2013](https://doi.org/10.5194/angeo-31-291-2013).
- Mikhailov A.V., Marin D. Geomagnetic control of the f_oF2 long-term trends. *Ann. Geophys.* 2000, vol. 18, pp. 653–665. DOI: [10.1007/s00585-000-0653-2](https://doi.org/10.1007/s00585-000-0653-2).
- Reinisch B. *The digisonde portable sounder – DPS*. Technical manual. Version 4.3. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, 2007, 404 p.
- Rezac L., Yue J., Yongxiao J., et al. On long-term SABER CO₂ trends and effects due to nonuniform space and time sampling. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018, vol. 123, pp. 7958–7967. DOI: [10.1029/2018JA025892](https://doi.org/10.1029/2018JA025892).
- Rishbeth H. A greenhouse effect in the ionosphere? *Planet Space Sci.* 1990, vol. 38, pp. 945–948. DOI: [10.1016/0032-0633\(90\)90061-T](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90061-T).

- Rishbeth H. Long-term changes in the ionosphere. *Adv. Space Res.* 1997, vol. 20, pp. 2149–2155. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00607-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00607-8).
- Roble R.G., Dickinson R.E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? *Geophys. Res. Lett.* 1989, vol. 16, pp. 1441–1444. DOI: [10.1029/GL016i012p01441](https://doi.org/10.1029/GL016i012p01441).
- Sivakandan M., Mielich J., Renkowitz T., et al. Long-term variations and residual trends in the E, F, and sporadic E (E_s) layer over Juliusruh, Europe. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023, vol. 128, iss. 4. DOI: [10.1029/2022JA031097](https://doi.org/10.1029/2022JA031097). URL: <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/> (дата обращения 30 мая 2025 г.).
- URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (дата обращения 30 мая 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Кобякова С.Е., Гололобов А.Ю., Каримов Р.Р., Степанов А.Е. Тренды критической частоты слоя F2 по данным ионосферной станции «Якутск» за период с 1956 по 2017 г. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 4, с. 55–63. DOI: [10.12737/szf-114202505](https://doi.org/10.12737/szf-114202505).