

УДК 550.388.2

ИЗМЕНЕНИЕ СО ВРЕМЕНЕМ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТОЙ И ВЫСОТОЙ СЛОЯ F_2

© 2024 г. А. Д. Данилов^{1, *}, А. В. Константинова¹, Н. А. Бербенева²

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Фёдорова Росгидромета (ИПГ Росгидромета), Москва, Россия

²Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

*e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 16.04.2024 г.

После доработки 13.05.2024 г.

Принята к публикации 23.05.2024 г.

Рассмотрено изменение со временем параметра S , который характеризует связь критической частоты foF_2 и высоты hmF_2 ионосферного слоя F_2 . Анализируются результаты измерений методом вертикального зондирования на двух станциях Moscow и Juliusruh. Зависимость foF_2 от hmF_2 строится для трех интервалов: 1957–1980, 1996–2023 и 2011–2023 гг. Рассматриваются пять околополуденных моментов LT и два сезона — зима (январь и февраль) и лето (июнь и июль). Для обеих станций и обоих сезонов получено, что величина S систематически растет от более ранних к более поздним периодам. При этом для всех периодов величины S для зимних месяцев примерно в три раза выше, чем для летних. Предполагается, что найденные изменения параметра S могут с помощью современных теоретических моделей типа TIEGCM или WACCM-X дать ценную информацию о долговременных изменениях (трендах) параметров термосферы.

Ключевые слова: критическая частота ионосферного слоя F_2 , высота слоя F_2 , связь двух параметров и ее изменение со временем.

DOI: 10.31857/S0016794024050064, EDN: QQOLSK

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долговременных изменений параметров ионосферных слоев хорошо известна и ей посвящено много публикаций. Наибольшее внимание уделяется параметрам слоя F_2 . За более подробным описанием проблемы и соответствующими ссылками мы отсылаем читателей к обзорным работам [Данилов и Константинова, 2020; Laštovička, 2023].

В течение последних лет авторы провели исследования трендов критической частоты foF_2 и высоты hmF_2 слоя F_2 на основании наблюдений до 2023 г. методом вертикального зондирования на нескольких ионосферных станциях [Данилов и др., 2024а, б; Danilov et al., 2024]. Было получено, что наблюдаются отрицательные тренды как foF_2 так и hmF_2 , причем есть тенденция усиления этих трендов в течение недавних нескольких лет.

Представляет интерес вопрос о том, как меняется соотношение между критической частотой и высотой слоя F_2 в течение последних десятиле-

тий. Этот вопрос интересен по двум причинам. Во-первых, такое изменение, если оно существует и достаточно велико, может быть важным для решения различных задач ионосферного распространения КВ-радиоволн. Во-вторых, критическая частота и высота слоя F_2 по-разному зависят от аэрономических параметров термосферы (мы вернемся к этому вопросу ниже), а потому указанное изменение может дать сведения о том, как и какие параметры термосферы меняются в ходе глобального охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы (см. Laštovička et al. [2008]).

Для ответа на указанный вопрос мы провели анализ изменения foF_2 с изменением hmF_2 в течение последних десятилетий. Анализ состоял в следующем. Мы анализировали три периода. Интервал 1957–1980 гг., который мы в наших исследованиях трендов foF_2 и hmF_2 называем “эталонным”, поскольку предполагается, что тогда еще не было трендов антропогенной природы, интервал 1996–2023 гг., для которого мы находили тренды foF_2 и hmF_2 в указанных работах, и самый недавний интервал 2011–2023 гг.

Поскольку оба параметра слоя $F2$ очень существенно зависят от солнечной активности (СА), необходимо было прежде всего избавиться от эффектов СА. Для этого мы строили зависимость каждого из параметров по отдельности от СА внутри каждого из трех рассматриваемых периодов. Полученная зависимость аппроксимировалась полиномом третьей степени, как это мы делаем при поиске трендов. С помощью этой зависимости мы рассчитывали величины $foF2$ и $hmF2$ для данного временного интервала для равномерной сетки по данному индексу СА. Полученные величины наносились на график, где $foF2$ и $hmF2$ откладывались, соответственно, по горизонтальной и вертикальной осям. Таким образом, каждая точка на этих графиках соответствовала величинам $foF2$ и $hmF2$ строго в одинаковых условиях — месяц, момент LT, солнечная активность. Мы аппроксимировали полученный набор точек прямой линией:

$$foF2 = S hmF2 - A, \quad (1)$$

где S — анализируемый параметр, а A — некая постоянная.

В соответствии с результатами наших предыдущих исследований [Данилов и Бербенева, 2024; Данилов и др., 2023] мы считаем, что наилучшими индексами СА для описания поведения $foF2$ являются $F30$, $MgII$ и $Ly-\alpha$. Именно они использовались для поиска трендов $foF2$ и $hmF2$ в наших недавних работах [Данилов и др., 2024а, б; Danilov et al., 2024], так что все описанные в данной статье расчеты были сделаны именно для этих индексов.

Поскольку тренды критической частоты лучше всего выражены в дневное время, мы анализировали месячные медианы величин $foF2$ и $hmF2$ по наблюдениям на ст. Moscow и Juliusruh для моментов 10:00, 11:00, 12:00, 13:00 и 14:00 LT, как мы это делали при анализе трендов этих параметров. Поскольку тренды $foF2$ хорошо выражены именно зимой (см. [Данилов и др., 2024а]), мы подробно анализировали два зимних месяца январь и февраль. Однако для сравнения провели также расчеты для летних месяцев июня и июля.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ ст. MOSCOW

Как указывалось выше, мы аппроксимировали изменение $foF2$ с $hmF2$ прямой линией. Реально это изменение иногда несколько отклонялось от прямой, но мы использовали указанную аппроксимацию для того, чтобы можно было сравнивать наклон этой зависимости для разных ситуаций (месяц, момент LT, индекс СА).

В качестве анализируемого параметра мы использовали наклон зависимости $foF2$ от $hmF2$ (см. формулу (1)) для конкретной ситуации (месяц, индекс СА, момент LT), который обозначали как S . На всех рисунках и в таблицах величина S приводится в единицах МГц/км. На рисунках 1, 2 приведены примеры указанной зависимости для конкретных ситуаций на ст. Moscow для января и февраля. На рис. 3 представлены такие же примеры для летних месяцев.

Приведенные рисунки показывают, что наклон S изменения $foF2$ с $hmF2$ систематически увеличивается при переходе от более ранних периодов к более поздним.

Для каждой ситуации (месяц, станция) строилась таблица. Чтобы не перегружать статью таблицами, мы приводим как пример табл. 1 для конкретной ситуации. Здесь и далее буквы А, Б и В обозначают периоды 1957–1980 гг., 1996–2023 гг. и 2011–2023 гг., соответственно. Две последних строки показывают результат усреднения по всем моментам LT (усреднение по столбцу).

Сводка величин S , усредненных по пяти моментам LT, для ст. Moscow для летних и зимних месяцев приведена в табл. 2 и 3, соответственно. В этих таблицах приведены величины S для следующих периодов: 1957–1980 гг. (А), 1996–2013 гг. (Б) и 2011–2023 гг. (В). Показана также среднеквадратическая ошибка SD каждого усреднения. Две нижних строки показывают результат усреднения для каждого периода по индексам СА (усреднение по столбцу).

Таблица 2 показывает, что и для июля, и для июня для всех индексов наблюдается рост величины S при переходе от более ранних периодов к более поздним. Величины среднеквадратической ошибки SD при усреднениях по всем LT в таблицах типа табл. 1 невелики, что повышает надежность получаемых величин. Достаточно близки и средние величины S для каждого месяца при использовании разных индексов СА. Поэтому получаемые при усреднении по всем индексам СА величины демонстрируют тот же эффект увеличения S при переходе от более ранних к более поздним периодам, причем величины SD для этих усредненных величин малы. Наконец, сравнение усредненных величин S для двух летних месяцев показывают удивительное согласие: 0.039 и 0.033 МГц/км для 1957–1980 гг., 0.053 и 0.055 МГц/км для 1996–2023 гг. и 0.078–0.079 МГц/км для июля и июня соответственно.

Картина для зимних месяцев (табл. 3) несколько хуже в статистическом плане. Несколько больше величины SD, сильнее разница между вели-

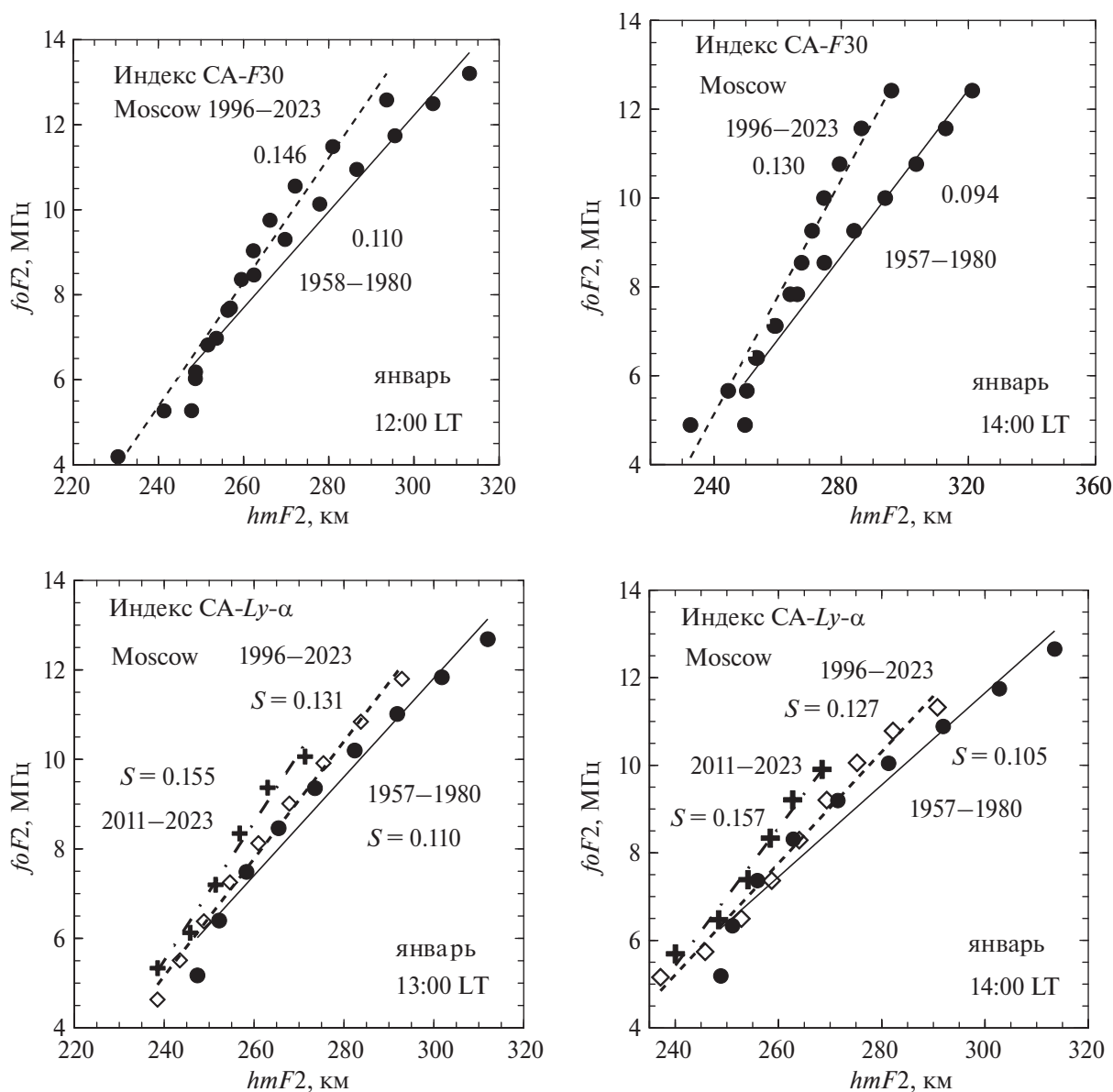


Рис. 1. Примеры изменения $foF2$ с $hmF2$ для января (ст. Moscow).

чинами S для того же периода, но для разных индексов СА. Тем не менее, величины SD при усреднении по индексам СА получаются не слишком большими, что повышает надежность средних для данного периода величин S . Главным же является тот факт, что средние величины S для каждого месяца изменяются так же, как и для летних месяцев — растут с переходом от более раннего к более позднему периоду. Согласие между результатами для двух зимних месяцев несколько хуже, чем для летних: усредненные по всем индексам СА величины S для января и февраля, соответственно, равны 0.104 и 0.095 МГц/км для 1957–

1980 гг., 0.134 и 0.113 МГц/км для 1996–2023 гг., и 0.164 и 0.133 МГц/км для 2011–2023 гг. Иначе говоря, для “эталонного” периода 1957–1980 гг. величины S для обоих зимних месяцев достаточно близки, но рост S к более поздним периодам происходит в январе сильнее, чем в феврале.

Сравнение результатов для летних и зимних месяцев (табл. 2 и 3) показывает, что в течение “эталонного” периода величины S выше в зимние месяцы, чем в летние (в среднем 0.100 МГц/км зимой и 0.036 МГц/км летом). Рост S к более поздним периодам зимой происходит сильнее, чем летом: к 0.123 и 0.149 МГц/км зимой и к 0.054

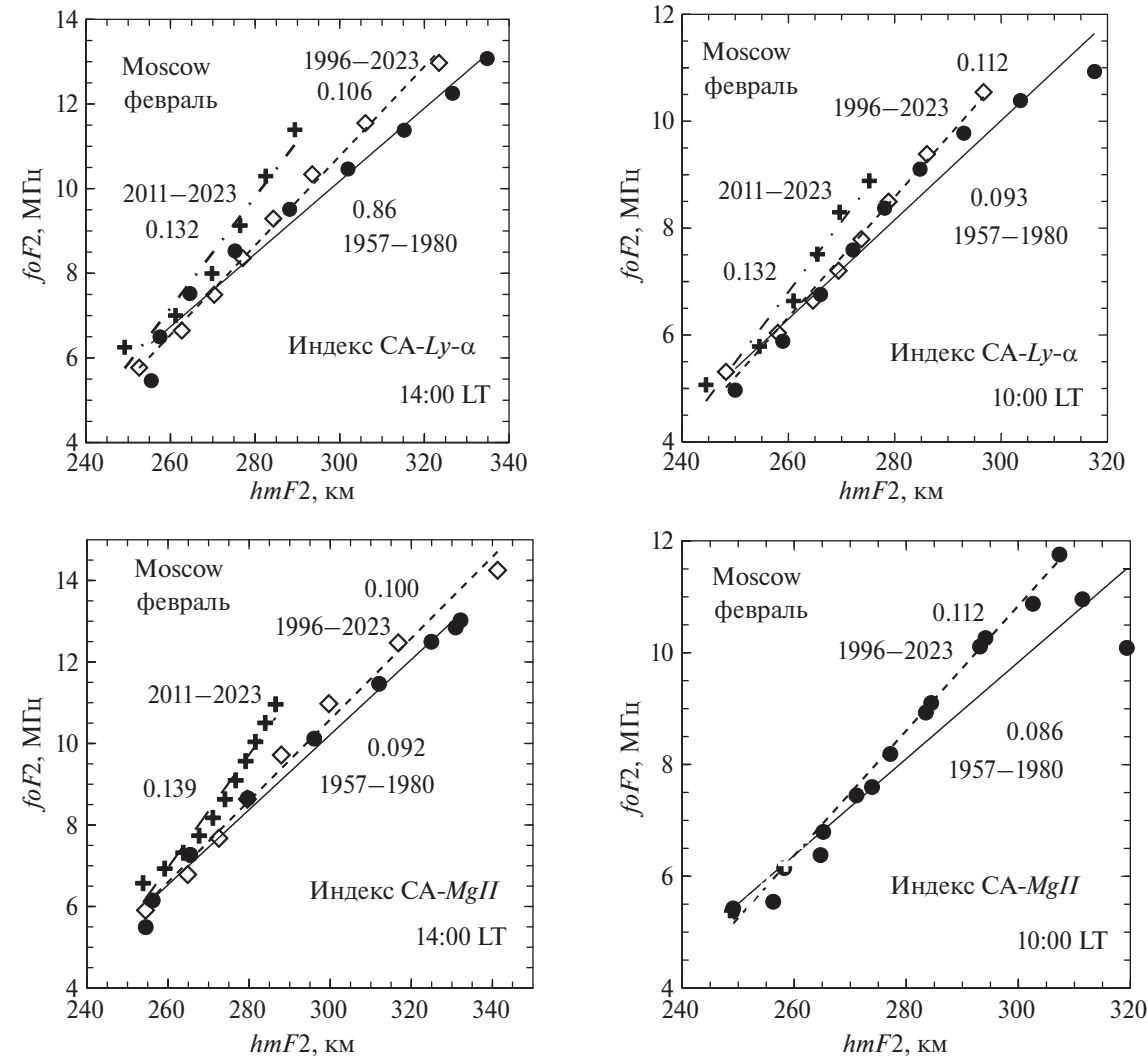


Рис. 2. Примеры изменения $foF2$ с $hmF2$ для февраля (ст. Moscow).

Таблица 1. Пример величин S (в МГц/км) для ситуации: февраль, ст. Moscow

LT	$Ly-\alpha$			$MgII$			$F30$		
	A	Б	В	A	Б	В	A	Б	В
10:00	0.093	0.112	0.132	0.086	0.112	0.148	0.094	0.157	0.170
11:00	0.098	0.108	0.109	0.092	0.126	0.105	0.092	0.108	0.118
12:00	0.108	0.112	0.131	0.116	0.110	0.154	0.097	0.115	0.137
13:00	0.099	0.112	0.116	0.092	0.117	0.123	0.092	0.127	0.150
14:00	0.086	0.106	0.132	0.092	0.100	0.139	0.097	0.114	0.133
Усреднение по моментам LT									
Сред.	0.097	0.110	0.124	0.095	0.110	0.134	0.094	0.124	0.142
SD	0.008	0.003	0.011	0.003	0.008	0.020	0.003	0.020	0.020

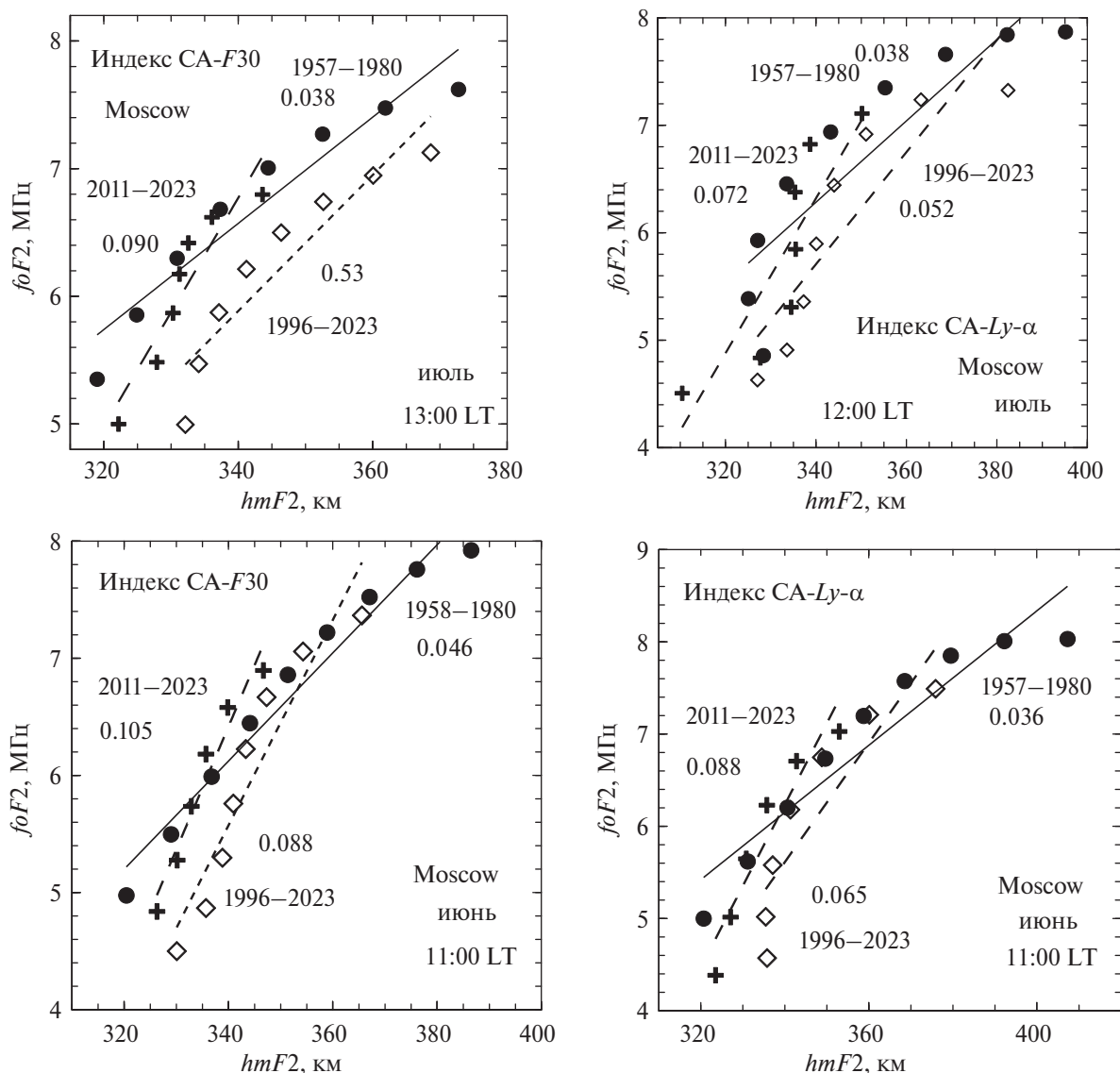


Рис. 3. Примеры изменения $foF2$ с $hmF2$ для летних месяцев (ст. Moscow).

и 0.079 МГц/км летом. Разница в поведении величины S между зимними и летними месяцами представляется нам вполне естественной, поскольку она отражает разный характер сезонных изменений критической частоты и высоты слоя $F2$ (см. ниже).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ ст. JULIUSRUH

Примеры изменения $foF2$ с $hmF2$ в зимние месяцы для ст. Juliusruh приведены на рис. 4.

Как видно из этого рисунка, характер изменения $foF2$ с изменением $hmF2$ для зимних месяцев на ст. Juliusruh близок к таковому на рис. 1 и 2 на ст. Moscow. Суммарные результаты для января

и февраля приведены в табл. 4. Заглавные буквы соответствуют тем же интервалам 1957–1980, 1996–2023 и 2011–2023 гг., как и в таблицах для ст. Moscow.

Как следует из этой таблицы, принципиальная особенность данных, которую мы обсуждаем в этой статье и которую подробно обсуждали в предыдущем параграфе по данным ст. Moscow, сохраняется и для данных ст. Juliusruh. Для большинства рассмотренных ситуаций (месяц, индекс CA) виден рост величины S от более ранних временных интервалов к более поздним. Три исключения, где величины S для периода 2011–2023 гг. оказались меньше, чем для периода 1996–2023 гг., помечены в табл. 4 курсивом.

Таблица 2. Величин S (в МГц/км) для летних месяцев (ст. Moscow)

	июль			июнь		
	А	Б	В	А	Б	В
<i>F30</i>						
Сред.	0.040	0.053	0.076	0.039	0.066	0.091
SD	0.002	0.007	0.028	0.005	0.02	0.018
<i>MgII</i>						
Сред.	0.040	0.058	0.081	0.030	0.051	0.072
SD	0.005	0.014	0.012	0.004	0.006	0.006
<i>Ly-a</i>						
Сред.	0.038	0.049	0.076	0.031	0.049	0.075
SD	0.003	0.011	0.012	0.004	0.01	0.012
Усреднение по индексам СА						
Сред.	0.039	0.053	0.078	0.033	0.055	0.079
SD	0.001	0.005	0.003	0.004	0.009	0.010

Таблица 3. Величины S (в МГц/км) для зимних месяцев (ст. Moscow)

	январь			февраль		
	А	Б	В	А	Б	В
<i>F30</i>						
Сред.	0.100	0.141	0.162	0.094	0.124	0.142
SD	0.009	0.007	0.012	0.003	0.020	0.020
<i>Ly-α</i>						
Сред.	0.113	0.134	0.167	0.097	0.110	0.124
SD	0.006	0.014	0.015	0.008	0.003	0.011
<i>MgII</i>						
Сред.	0.100	0.126	0.164	0.095	0.110	0.134
SD	0.006	0.008	0.013	0.003	0.008	0.020
Усреднение по индексам СА						
Сред.	0.104	0.134	0.164	0.095	0.113	0.133
SD	0.007	0.008	0.003	0.002	0.008	0.009

Причина этих исключений лежит на наш взгляд в величинах $hmF2$. Зависимости наблюдаемых величин $hmF2$ от соответствующего индекса СА, которая используется для построения равномерной сетки значений $hmF2$ (см. описание метода выше), получается в ряде случаев (и особенно для ситуаций, выделенных курсивом) выраженной гораздо хуже, чем для соответствующих ситуаций для ст. Moscow. Наблюдается заметный разброс точек и, соответственно, величины R^2 , которые позволяют определить статистическую значимость получаемых зависимостей для интервала 2011–2023 гг., значительно меньше, чем для других ситуаций.

Различие между двумя зимними месяцами для ст. Moscow получается небольшим – в среднем величины S для каждого периода на 10–20% выше в январе, чем в феврале. Такое же превышение наблюдается для данных ст. Juliusruh для всех ситуаций кроме *MgII*, где январская величина S превышает февральскую в 1.7 раза. Хотя рост S от января к февралю получается для обеих станций, различие между этими двумя месяцами в основном невелико и может лежать в пределах точности метода, поэтому трудно сказать, насколько это различие отражает реальное изменение.

Хотя, как уже указывалось выше, основной акцент в работе сделан на изменение зависимости $foF2$ от $hmF2$ в зимние месяцы, когда по нашим данным наблюдаются заметные тренды критической частоты (см. [Данилов и др., 2024а; Danilov et al., 2024]), для ст. Juliusruh мы провели соответствующие расчеты также для летнего месяца июня. Примеры зависимостей $foF2$ от $hmF2$ приведены на рис. 5. Результаты определения S приведены в табл. 5.

Сравнение результатов для летних и зимних месяцев по данным ст. Juliusruh (табл. 4 и табл. 5) дает практически те же результаты, что и аналогичное сравнение для ст. Moscow: в течение “эталонного” периода величины S выше в зимние месяцы, чем в летние (в среднем 0.095 МГц/км зимой и 0.032 МГц/км летом). Рост S к более поздним периодам летом происходит сильнее, чем зимой: к 0.100 и 0.115 МГц/км зимой и к 0.050 и 0.072 МГц/км летом.

Стоит отметить хорошее согласие летних величин S по каждому из трех периодов между двумя станциями. Средние за два летних месяца величины S для ст. Moscow равны (см. табл. 3) 0.036 МГц/км для 1957–1980 гг., 0.054 МГц/км для 1996–2023 гг. и 0.079 МГц/км для 2011–2023 гг. Эти же величины для ст. Juliusruh в июне равны 0.032 МГц/км, 0.050 МГц/км и 0.072 МГц/км.

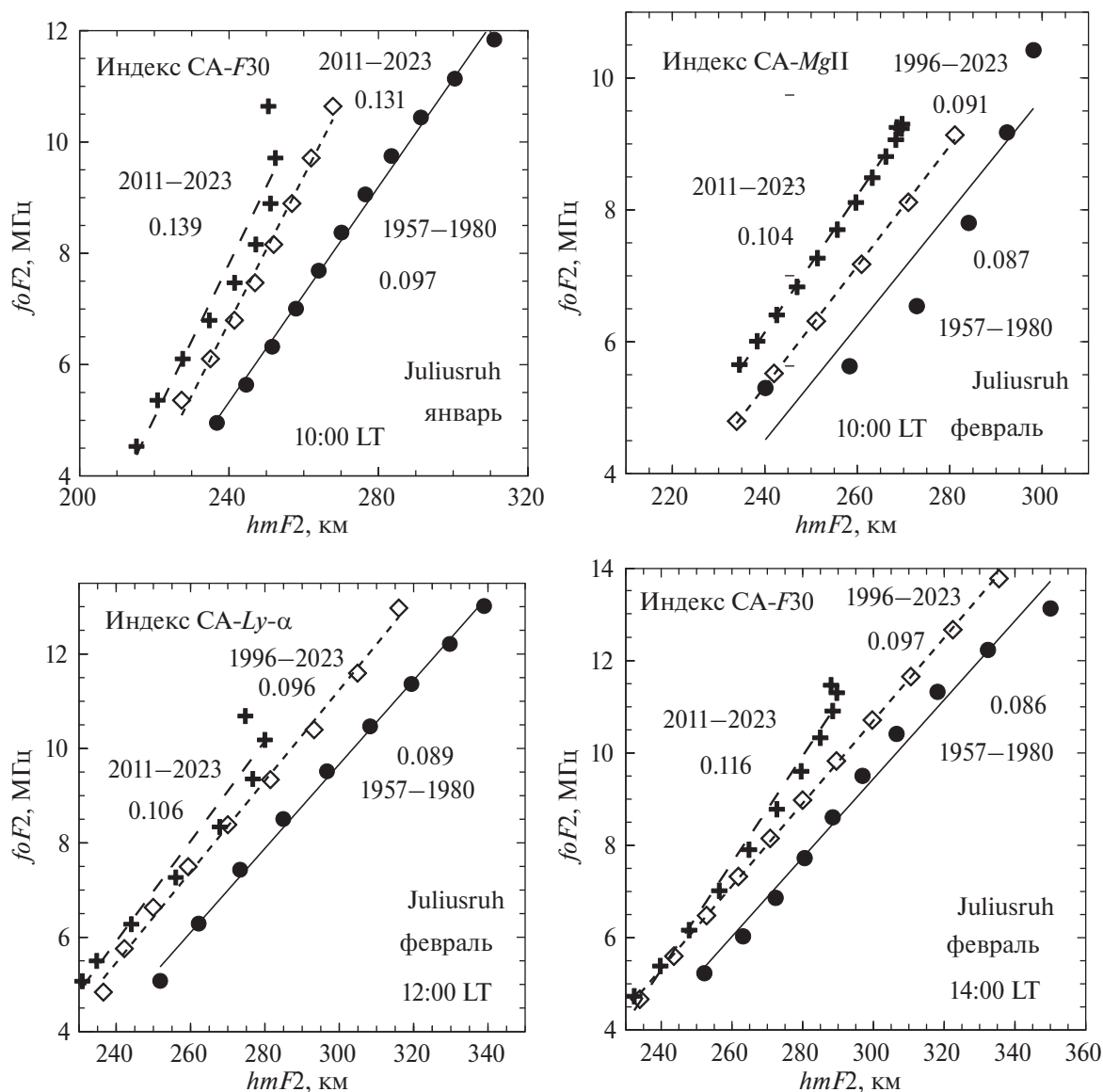


Рис. 4. Примеры изменения $foF2$ с $hmF2$ для зимних месяцев (ст. Juliusruh).

Разница в поведении величины S между зимними и летними месяцами представляется нам вполне естественной, поскольку она отражает разный характер сезонных изменений трендов критической частоты и высоты слоя $F2$ (см. ниже).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Основной результат предыдущих двух параграфов состоит в том, что для обеих станций (Moscow и Juliusruh) как зимой, так и летом наблюдается увеличение параметра S (наклон зависимости $foF2$ от $hmF2$) при переходе от периода 1957–1980 гг.

к периоду 1996–2023 гг. и затем к периоду 2011–2023 гг. Анализ проводился для пяти околополуденных моментов LT. Использовались три индекса CA ($F30$, $Ly-\alpha$ и $MgII$), которые по нашим данным (см. [Данилов и Бербенева, 2023; Данилов и др., 2023]) являются наилучшими для описания поведения $foF2$.

Разброс получаемых для данной ситуации (станция, месяц, индекс CA) величин S для разных LT невелик, о чем свидетельствуют табл. 1 и величины среднеквадратической ошибки SD в табл. 2–5. Некоторое исключение составляют результаты по ст. Juliusruh для периода 2011–

Таблица 4. Величины S (в МГц/км) для зимних месяцев (ст. Juliusruh)

	Февраль			Январь		
	А	Б	В	А	Б	В
<i>F30</i>						
Средн.	0.081	0.097	0.105	0.100	0.119	0.110
SD	0.004	0.005	0.009	0.006	0.009	0.019
<i>Ly-α</i>						
Средн.	0.085	0.094	0.101	0.107	0.122	0.111
SD	0.008	0.003	0.009	0.009	0.006	0.016
<i>MgII</i>						
Средн.	0.095	0.098	0.092	0.105	0.120	0.160
SD	0.008	0.007	0.013	0.005	0.007	0.015
Усреднение по индексам CA						
Средн.	0.087	0.096	0.099	0.104	0.120	0.127
SD	0.007	0.002	0.007	0.004	0.005	0.029

2023 гг. (см. табл. 4 и 5), где разброс величин S для разных моментов LT оказался несколько сильнее, чем для других ситуаций, о чем свидетельствуют более высокие величины SD.

Главное сезонное различие в поведении величины S состоит в том, что для обеих станций эта

величина существенно (в 2 раза и более) выше в зимние месяцы, чем в летние. При этом рост S от более ранних к более поздним периодам летом происходит сильнее, чем зимой. Нам представляется, что указанное различие связано с разным характером сезонных вариаций трендов $foF2$ и $hmF2$. Тренды критической частоты хорошо выражены зимой и колеблются вокруг нуля летом [Данилов и др., 2024a], тогда как отрицательные тренды $hmF2$ хорошо выражены и статистически значимы как в зимние, так и в летние месяцы [Данилов и др., 2024б].

Поведение параметра S со временем уже рассматривалось авторами [Данилов и Константинова, 2014; 2016]. Анализировались медианные данные для нескольких ионосферных станций из банков системы “SPIDR” до 2010 г. и Дамбольдта и Суссмана до 2009 г. Рассматривались только два момента LT – 14:00 LT и ss (момент захода Солнца). Для учета солнечной активности использовался индекс $F10.7$.

Для эталонного периода 1957–1980 гг. в указанных работах были получены величины S , близкие к величинам, полученным в данной работе. Так, для ст. Juliusruh эти величины были 0.113, 0.100 и 0.037 МГц/км для января, февраля и июня, соответственно. Для сравнения приводим величины S , полученные в данной работе по данным ст. Juliusruh для 14:00 LT при использовании $F30$, $Ly-α$ и $MgII$: 0.096, 0.099 и 0.090 в январе, 0.096, 0.099 и 0.096 в феврале и 0.031, 0.034 и 0.031 в июне. Видно, что величины S , опубликованные нами ранее для эталонного периода, близки к величинам S для соответствующих ме-

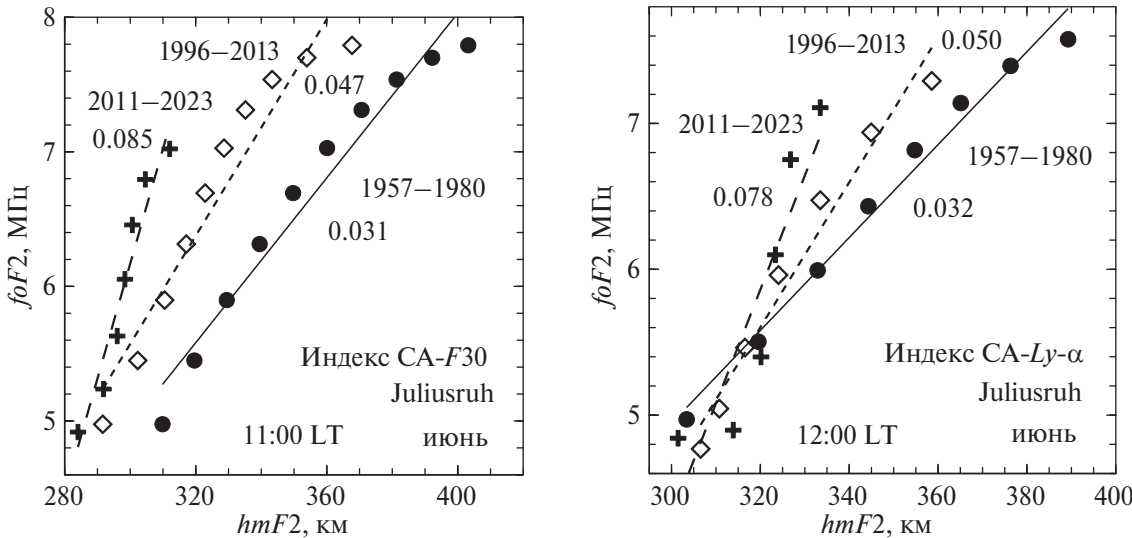


Рис. 5. Примеры изменения $foF2$ с $hmF2$ для июня (ст. Juliusruh).

Таблица 5. Величины S (в МГц/км) для летних месяцев (ст. Juliusruh)

	июнь			июль		
	A	B	B	A	B	B
<i>F30</i>						
Сред.	0.031	0.05	0.077	0.036	0.05	0.059
SD	0.001	0.006	0.012	0.007	0.008	0.012
<i>Ly-α</i>						
Сред.	0.032	0.051	0.086	0.034	0.047	0.066
SD	0.001	0.006	0.016	0.003	0.005	0.008
<i>MgII</i>						
Сред.	0.030	0.050	0.076	0.033	0.05	0.065
SD	0.002	0.006	0.013	0.004	0.014	0.013
Усреднение по индексам CA						
Сред.	0.031	0.050	0.080	0.034	0.049	0.063
SD	0.001	0.001	0.006	0.002	0.002	0.004

сяцев, полученными сейчас. При этом сохранился и хорошо выраженный сезонный ход S : величины близки для двух зимних месяцев, тогда как они более, чем вдвое, ниже для летнего месяца июня.

Однако, в работах 2013–2014 гг. на основании анализа среднеквадратических ошибок SD и коэффициента определенности R^2 для разных станций было получено, что зависимость $foF2$ от $hmF2$ для более поздних периодов выражена гораздо хуже, чем для более ранних. Тем не менее в ряде случаев было обнаружено падение S от более ранних периодов к более поздним. Нам представляется, что результаты, полученные в данной работе, являются гораздо более надежными, поскольку они получены на основании более надежных величин $foF2$ и $hmF2$ из современных банков данных, базируются на наблюдениях до 2023 г. и получены с использованием трех индексов CA, которые являются наилучшими для описания вариаций параметров слоя $F2$.

Таким образом, получено с большой надежностью, что наблюдается долговременный тренд параметра S , скорее всего вызванный теми же процессами охлаждения и оседания верхней атмосферы [Laštovička et al., 2008], которые приводят к трендам $foF2$, $hmF2$ и других ионосферных и термосферных параметров (см. обзорные работы Laštovička [2023] и Данилова и Константино-

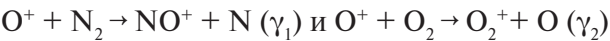
вой [2020]). Представляет интерес вопрос о том, не может ли полученный результат по трендам S дать указание на какие-то долговременные изменения в параметрах термосферы.

Изменение большого числа взаимосвязанных параметров термосферы и ионосферы (температуры, состава, плотности, эффективного коэффициента рекомбинации и т.д.) в процессе охлаждения и оседания должно происходить очень сложным образом. Описать эти изменения и выделить изменения термосферных параметров, которые могут быть ответственны за найденное изменение параметра S , с достаточной степенью надежности можно только в рамках современных моделей. Мы приводим ниже лишь общие соображения по этому поводу.

За счет увеличения количества молекул CO_2 происходит охлаждение термосферного газа и соответствующее “оседание” термосферы, т.е. уменьшение ее плотности на каждой фиксированной геометрической высоте. Это действительно происходит, подтверждением чему являются тренды плотности, обнаруженные по наблюдениям орбит искусственных спутников [Emmert et al., 2015].

При этом, естественно, высота уровня фиксированной плотности должна уменьшаться. Если верна концепция (см. Rishbeth and Edvards [1989]), что слой $F2$ “плавает” на уровне постоянного давления, то за счет указанного оседания должна уменьшаться высота $hmF2$. В то же время может изменяться нейтральный состав термосферы. Особенно важно изменение отношения $[O]/[N_2]$, которому прямо пропорциональна концентрация электронов в максимуме слоя $F2$, $NmF2$. Напомним, что $NmF2 \sim (foF2)^2$. Изменение этого отношения может происходить как за счет изменения барометрической ситуации (уменьшение температуры), так и за счет усиления турбулентной диффузии, увеличивающей отток атомов кислорода через турбопаузу в область их более сильной рекомбинации (подробнее см. [Данилов и Константинова, 2014]). Наконец, уменьшение температуры может влиять не только через изменение барометрической ситуации, но и через зависимость от T констант фотохимических реакций.

Согласно лабораторным исследованиям [Richards, 2011; Heirl et al., 1997] константы скорости основных ионно-молекулярных реакций



зависят от ионной температуры T_i , которая согласно [Richards, 2011] ниже 400 км равна температуре нейтральных частиц, следующим образом:

γ_1, γ_2 обратно пропорциональны T_i при $T_i < 1000$ К и

γ_1, γ_2 прямо пропорциональны T_i при $T_i > 1000$ К.

Среднегодовая ионная температура на высоте слоя $F2$ как раз соответствует ~ 1000 К, причем зимние значения несколько ниже, а летние — несколько выше. Коэффициент рекомбинации β пропорционален γ_1, γ_2 , и, соответственно, электронная концентрация обратно пропорциональна β : $q = \beta Ne$.

Таким образом, летом уменьшение температуры в результате общего процесса охлаждения верхней атмосферы должно приводить даже к небольшому увеличению электронной концентрации (и, следовательно, $foF2$), а не к ее уменьшению (отрицательный тренд). Разная зависимость коэффициента рекомбинации β от температуры летом и зимой может, в частности, быть ответственной за полученное по многим данным (см. [Данилов и др., 2024а; Danilov et al., 2024]) сезонное различие в трендах $foF2$, которое мы уже упоминали: выраженные отрицательные тренды зимой и близкие к нулю, или даже слегка положительные, тренды летом.

Данилов и Константинова [2014] предположили, что на роль “главного кандидата”, вызывающего отрицательные тренды $foF2$, претендует нейтральный состав термосферного газа и что наблюдаемый отрицательный тренд $foF2$ указывает на уменьшение концентрации атомного кислорода.

Все сказанное выше в данном параграфе призвано показать, что есть целый комплекс изменений параметров термосферы, вызываемых ее охлаждением и оседанием, которые могут сложным образом влиять на изменения параметров слоя $F2$. Именно поэтому чтобы выяснить вопрос о том, о каких изменениях в термосфере свидетельствуют описанные выше изменения соотношения между $foF2$ и $hmF2$, нужно рассмотреть это изменение (поведение параметра S) в рамках современных теоретических моделей типа TIEGCM или WACCM-X.

Нам представляется, что полученные в этой работе выводы о долговременных вариациях параметра S являются достаточно надежными и обоснованными статистически и должны с помощью указанных моделей дать важную информацию о долговременных изменениях термосферных параметров.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ изменения критической частоты $foF2$ и высоты $hmF2$ ионосферного слоя $F2$

за период 1957–2023 гг. Для этих двух параметров ранее авторами были найдены отрицательные тренды. В данной работе рассматривается вопрос о том, как изменяется со временем характер соотношения между $foF2$ и $hmF2$. В качестве анализируемого параметра рассматривается величина S , которая представляет собой наклон линейной зависимости $foF2$ от $hmF2$.

Такая зависимости построена для трех периодов: эталонного 1957–1980 гг., когда не должно было еще быть ионосферных трендов антропогенной природы, и двух последующих 1996–2023 гг. и 2011–2023 гг. Основой указанного анализа служат результаты наблюдений методом вертикального зондирования на двух ионосферных станциях — Moscow и Juliusruh. Рассматриваются пять околополуденных моментов местного времени и два периода — зимний (январь и февраль) и летний (июнь и июль).

Получено, что данные для обеих станций и обоих сезонов приводят к главному выводу: с высокой степенью надежности величины S увеличиваются с переходом от эталонного периода к периоду 1996–2023 гг. и затем к периоду 2011–2023 гг. При этом величины S для зимних месяцев значительно выше, чем для летних. Эти два заключения и являются основным результатом данной работы.

Поскольку, если исключены эффекты солнечной активности, поведение обоих рассмотренных параметров ионосферного слоя $F2$ определяется поведением параметров нейтральной среды, мы считаем, что найденные эффекты в поведении S могут дать ценную информацию о долговременных изменениях (трендах) термосферных характеристик. Получить такую информацию можно только в рамках современных теоретических моделей. Мы надеемся, что специалисты по теоретическому моделированию такую работу сделают.

БЛАГОДАРНОСТИ

Величины солнечных индексов взяты с сайта LISIRD (<https://lasp.colorado.edu/lisird/>). Величины $M3000$ и $foF2$ взяты из банка Дамбольдта на сайте (<https://downloads.sws.bom.gov.au/wdc/iondata/medians/>), а также с сайтов Australian Space Weather Forecasting Center (www.sws.bom.gov.au) и ИЗМИРАН ([http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_4/MO155_Moscow_\(IZMIRAN\)](http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_4/MO155_Moscow_(IZMIRAN))).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Статистический анализ зависимости критической частоты $foF2$ от различных индексов солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 5. С. 619–629. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600588>
- Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Дальнейший детальный анализ зависимости $foF2$ от солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 2. С. 253–264. 2024.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Уменьшение количества атомного кислорода в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 2. С. 239–245. 2014. <https://doi.org/10.7868/S0016794014020060>
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные изменения связи между $foF2$ и $hmF2$ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 5. С. 612–619. 2016. <https://doi.org/10.7868/S0016794016050047>
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 4. С. 411–435. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020040045>
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Дальнейший детальный анализ зависимости $foF2$ от солнечной активности // Гелиогеофизические исследования. Вып. 40. С. 68–80. 2023. https://doi.org/10.5425/2304-7380_2023_40_68
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Тренды критической частоты $foF2$ по данным станций северного и южного полушарий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 3. С. 386–399. 2024а.
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Долговременные тренды высоты максимума ионосферного слоя $F2$ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 4. С. 489–502. 2024б.
- Danilov A.D., Berbeneva N.A., Konstantinova A.V. Trends in the $F2$ -layer parameters to 2023 // Adv. Space Res. V. 73. № 12. P. 6054–6065. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.03.036>
- Emmert J.T. Altitude and solar activity dependence of 1967–2005 thermospheric density trends derived from orbital drag // J. Geophys. Res. — Space. V. 120. № 4. P. 2940–2950. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015JA021047>
- Hierl P.M., Dotan I., Seeley J.V., Van Doren J.M., Morris R.A., Viggiano A.A. Rate constants for the reactions of O^+ with N_2 and O_2 as a function of temperature (300–1800 K) // J. Chem. Phys. V. 106. № 9. P. 3540–3544. 1997. <https://doi.org/10.1063/1.473450>
- Laštovička J. Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere // Atmos. Chem. Phys. V. 23. № 10. P. 5783–5800. 2023. <https://doi.org/10.5194/acp-23-5783-2023>
- Laštovička J., Akmaev R.A., Beig G., Bremer J., Emmert J.T., Jacobi C., Jarvis M.J., Nedoluha G., Portnyagin Yu.I., Ulich T. Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere // Ann. Geophys. V. 26. № 5. P. 1255–1268. 2008. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-1255-2008>
- Richards P.G. Reexamination of ionospheric photochemistry // J. Geophys. Res. — Space. V. 116. № 8. ID A08307. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011JA016613>
- Rishbeth H., Edwards R. The isobaric $F2$ -layer // J. Atmos. Terr. Phys. V. 51. № 4. P. 321–338. 1989. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(89\)90083-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90083-4)

Changes with Time in the Relation Between the $F2$ -Layer Critical Frequency and Height

A. D. Danilov^{1,*}, A. V. Konstantinova¹, N. A. Berbeneva²

¹*Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia*

²*Physical Faculty of the Moscow State University, Moscow, Russia*

*e-mail: adanilov99@mail.ru

The change with time in the parameter S that characterizes the relation of the critical frequency $foF2$ to the height $hmF2$ of the ionospheric $F2$ layer is considered. The results of measurements by the vertical sounding method at two stations Moscow and Juliusruh are analyzed. The dependence of $foF2$ on $hmF2$ is drawn for three intervals: 1957–1980, 1996–2023, and 2011–2023. Five near-noon LT moments and two seasons (winter (January and February) and summer (June and July)) are considered. It is found for both stations and both seasons that the S value is increasing systematically from the earlier to later periods. At the same time, the winter S values are approximately by a factor of three higher than the summer ones for all periods. It is suggested that the found changes in the parameter S could provide valuable information on long-term variations (trends) in thermospheric parameters with the help of current theoretical models of the TIEGCM or WACCM-X type.

Keywords: critical frequency of the ionospheric $F2$ layer, height of the layer, relation between two parameters and its changes with time.