

УДК 550.388.2

 Поступила в редакцию
 21.09.2020 г.

 Опубликована
 30.10.2020 г.

ДАЛЬНЕЙШИЙ АНАЛИЗ ТРЕНДОВ foF2 ДО 2018-2019 гг.

А. Д. Данилов¹, А.В. Константинова¹

¹Институт прикладной геофизики им акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

Проведен анализ изменения критической частоты слоя F2, foF2, до 2019 (2018) г. по данным вертикального зондирования на станциях Juliusruh и Boulder. Получено подтверждение всех основных выводов, полученных в серии недавних публикаций авторов. Показано, что наиболее часто используемый индекс солнечной активности F10.7 не описывает правильно поведение солнечного ультрафиолетового излучения, определяющего поведение большей части ионосферы, в 24-м цикле СА. Корректировка этого индекса с помощью других индексов СА (интенсивность линии Ly-альфа, число солнечных пятен R_z и интенсивность линии MgII) показывает, что в период с 2002-2004 гг. по 2008-2010 гг. наблюдается хаотическое изменение foF2, а затем восстанавливается отрицательный тренд критической частоты, наблюдавшийся до этого периода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ, СЛОЙ F2.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долговременных изменений (трендов) параметров ионосферных слоев остается одной из важных проблем физики верхней атмосферы. Не отвлекаясь на дальнейшее обсуждение важности этой проблемы, мы отсылаем читателей недавнему обзору авторов [Данилов и Константинова, 2020а].

В серии недавних работ авторов [Данилов и Константинова, 2019; 20206; Danilov and Konstantinova 2020a, b] подробно рассмотрены тренды параметров ионосферного слоя F2 (foF2 и hmF2) на основании наблюдений методом вертикального зондирования на станциях Juliusruh и Boulder. Основным результатом этих работ был вывод о том, что наиболее часто используемый индекс солнечной активности (CA), F10.7, не описывает правильно изменение солнечного ультрафиолетового излучения EUV, ответственного за образование большей части ионосферы. Оказалось, что при коррекции этого индекса двумя другими индексами солнечной активности (число солнечных пятен R_z и интенсивность линии Ly-альфа), лучше передающими вариации EUV, наблюдается хаотическое изменение как foF2 так и hmF2 в период с 2002-2004 до 2008-2010 гг., который получил название «смутный период», а затем восстанавливается отрицательный тренд обоих параметров.

Многие исследователи обращали внимание на необычное поведение индекса солнечной активности *F*10.7 в течение минимума 23/24 и 24-го цикла CA (см., например, [Chen et al., 2011; 2018; De Haro Barbas and Elias, 2020a; b; Laštovička, 2016; 2019]). Тот факт, что 24-й цикл CA является необычным, неоднократно упоминался в докладах на предыдущих четырех Симпозиумах по долговременным трендам в атмосфере и, в частности, в итоговых докладах J. Laštovička. Laštovička [2016] указывал на проблемы, связанные с правильным учетом солнечной активности при определении

ФГБУ «ИПГ» 129128; Россия, Москва ул. Ростокинская, 9.

Электронная почта автора для переписки: Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: adanilov99@mail.ru

47

трендов ионосферных параметров. В работах Livingstone et al. (2012) and Balogh et al. (2014) сообщалось о нарушениях связи между R_z и F10.7

Наиболее четко эта проблема сформулирована в работе De Haro Barbas and Elias [2020а]. Авторы этой работы анализировали тренды foF2 в дневные часы по данным двух японских ионосферных станций Kokubunji и Wakkanai. Они обнаружили, что включение в анализируемый ряд данных измерений в течение 24-го цикла резко меняет величины получаемых трендов – тренды становятся «более положительными». Иначе говоря, либо значительно уменьшается магнитуда отрицательных трендов, либо они даже превращаются в положительные. В следующей работе De Haro Barbas and Elias [2020b] пришли точно к такому же выводу, анализируя данные измерений на указанных станциях в ночные часы.

Целью настоящей работы является дальнейший анализ трендов *foF2* по данным станций Juliusruh и Boulder до 2018 (2019) гг. с привлечением еще одного индекса СА – интенсивности линии MgII.

Следует подчеркнуть, что наш подход основан на том, что количество CO_2 в земной атмосфере продолжает монотонно расти. А, значит, следует ожидать и продолжения процесса охлаждения и оседания верхней ионосферы, как это описано в соответствующей концепции [Lastovica et al. 2008]. Отрицательные тренды *foF2*, по нашему глубокому убеждению, являются одним из проявлений этого процесса.

2. ТРЕНДЫ foF2 ПО ДАННЫМ СТАНЦИИ JULIUSRUH

В указанной серии наших работ был получен очень важный вывод о том, что индекс F10.7 не описывает должным образом поведения EUV в период глубокого минимума 23/24 циклов CA и в 24-м цикле CA, и при поиске трендов ионосферных параметров его необходимо корректировать другими индексами солнечной активности, более тесно связанными с изменением EUV. В указанных работах для такой корректировки использовались два индекса: число солнечных пятен *Rz* и интенсивность линии Ly-альфа. В силу важности указанного вывода мы провели аналогичный анализ с использованием еще одного индекса CA, часто используемого в подобных исследованиях (см., например, De Haro Barbas and Elias, 2020a, b; Laštovička, 2016; 2019]. Этот индекс – интенсивность линии ионизованного магнитя MgII в солнечном спектре.

Кроме того, мы уточнили корректировку величин F10.7 для 24-го цикла CA, используя связь F10.7 с R_Z и Ly не для одного 23-го цикла CA, как это было сделано в наших предыдущих работах, а для 22-го и 23-го циклов. Это увеличило статистическую значимость зависимостей F10.7 от R_Z и Ly, используемых для корректировки, и, следовательно, сделало эту корректировку более надежной. Для корректировки F10.7 по индексу MgII была также использована связь F10.7 и MgII в 22-м и 23-м циклах CA.

Для станции Juliusruh мы нашли данные до июля 2019 г., поэтому на зависимости $\Delta foF2$ от времени, по которой определяется тренд foF2 (см. ниже), добавилась еще одна экспериментальная точка. Наконец, в серии наших предыдущих публикаций мы анализировали только три месяца (январь, февраль и март) и три момента LT (10:00, 12:00 и 1400). Согласно нашим предыдущим исследованиям [Данилов и Константинова, 2015; Danilov, 2015] именно в это время отрицательный тренд k(foF2) максимален по абсолютной величине в его сезонном и суточном ходе. В данной работе мы добавили анализ трендов в июне и октябре и в 2000 LT в 0400 LT.

Напомним, что мы используем метод определения трендов, неоднократно описанный в наших предыдущих публикациях. В этом методе величина тренда k(foF2) определяется по наклону зависимости от времени величины $\Delta foF2$, которая представляет собой разность между значениями foF2 в «эталонный период» 1958-1980 гг. и в рассматриваемый момент времени.

Результаты определения k(foF2) для станции Juliusruh приведены в табл. 1. В скобках указана величина коэффициента определенности R^2 по критерию Фишера, которую мы используем для определения статистической значимости получаемых трендов.

	10.00				
LT	10:00	12:00	14:00	04:00	20:00
Январь					
Ly	-0.029 (0.97)	-0.023 (0.89)	-0.023 (0.71)	-0.023 (0.81)	-0.020 (0.92)
Rz	-0.058 (0.98)	-0.032 (0.82)	-0.035 (0.96)	-0.030 (0.91)	-0.032 (0.91)
MgII	-0.012 (0.77)	-0.024 (0.79)	-0.025 (0.82)	-0.025 (0.94)	-0.005 (0.12)
Февраль					
Ly	-0.029 (0.79)	-0.052 (0.93)	-0.040 (0.91)	-0.020 (0.78)	-0.026 (0.94)
Rz	-0.072 (0.83)	-0.043 (0.85)	-0.040 (0.90)	-0.012 (0.85)	-0.036 (0.90)
MgII	-0.045 (0.69)	-0.073 (0.80)	-0.064 (0.81)	-0.021 (0.96)	-0.035 (0.97)
Март					
Ly	-0.042 (0.86)	-0.029 (0.90)	-0.040 (0.93)	-0.026 (0.91)	-0.029 (0.98)
Rz	-0.042 (0.96)	-0.085 (0.96)	-0.072 (0.97)	-0.022 (0.89)	-0.052 (0.94
MgII	-0.032 (0.79)	-0.009 (0.96)	-0.017 (0.87)	-0.011 (0.73)	-0.018 (0.80)
Июнь					
Ly	-0.011 (0.82)	-0.013 (0.83)	-0.011 (0.85)	-0.017 (0.94)	-0.036 (0.99)
Rz	-0.014 (0.92)	-0.026 (0.99)	-0.019 (0.99)	-0.027 (0.99)	-0.038 (0.99)
MgII	-0.011 (0.68)	-0.011 (0.79)	-0.009 (0.50)	-0.008 (0.58)	-0.020 (0.80)
Октябрь					
Ly	-0.034 (0.76)	-0.007 (0.011)	-0.007 (0.24)	_	_
Rz	-0.032 (0.79)	-0.010 (0.31)	0	_	_
MgII	-0.044 (0.78)	-0.030 (0.65)	-0.022 (0.69)	_	_

Таблица 1. Тренды foF2 в МГц/год для станции Juliusruh после «смутного периода» (до 2019 г.)

Обсуждая результаты, приведенные в таблице 1, необходимо отметить следующее. Во-первых, более точная корректировка индекса F10.7sm12 по данным об R_z и Ly-альфа за два цикла (см. выше), а также добавление данных за 2019 г. привели для большинства ситуаций к лучше выраженным и более статистически значимым трендам после «смутного периода». Особенно важно то, что новая точка на зависимости $\Delta foF2$ от времени хорошо легла на уже имевшуюся зависимость. Эта точка подтвердила основной вывод серии наших предыдущих публикаций о том, что после «смутного периода» восстанавливается отрицательный тренд foF2, и привела к увеличению статистической значимости этого тренда. Примеры зависимостей $\Delta foF2$ от времени для различных ситуаций (январь-март дневное время) при корректировке F10.7sm12 данным об R_z и Ly-альфа приведены на рис. 1-3.

Как видно из рис. 1-3, для всех рассмотренных ситуаций картина практически одна и та же: до 2002-2004 гг. наблюдается хорошо выраженный и статистически значимый тренд foF2, затем наступает хаотическое изменение $\Delta foF2$ в течение «смутного периода» и после 2008-2009 гг. вновь возобновляется падение $\Delta foF2$, дающее значимый отрицательный тренд foF2.

Что касается ночных часов, то, как видно из таблицы 1, в период высоких отрицательных трендов в сезонном ходе k(foF2) (январь-март) тренды в 04:00LT и 20:00 LT также достаточно хорошо выражены и статистически значимы. В подавляющем большинстве случаев они меньше по магнитуде, чем в дневные часы, что вполне согласуется с суточным ходом k(foF2), полученным ранее (см. Данилов и Константинова, [2015]). Примеры приведены на рис. 4.

Для полноты анализа мы рассмотрели также тренды foF2 для июня и октября, когда, согласно нашим предыдущим исследованиям, эти тренды малы даже в дневное время. Результаты, приведенные в таблице 1, подтверждают этот вывод. Для ночных часов в эти месяцы (в соответствии с суточным ходом k(foF2), найденным ранее), тренды малы по абсолютной величине и их трудно определить.



Рис. 1. Примеры зависимости *ДfoF2* от времени для ст. Juliusruh в феврале.



Рис. 2. Примеры зависимости $\Delta foF2$ от времени для ст. Juliusruh в марте.



Рис. 3. Примеры зависимости *ДfoF*2 от времени для ст. Juliusruh в январе.



Рис. 4. Примеры изменения $\Delta foF2$ от времени для ст. Juliusruh в ночные часы LT.

Важен вопрос о том, насколько тренды для одной и той же ситуации (месяц, LT), получаемые при корректировке F10.7 каждым из трех других индексов CA (Ly-альфа, R_z и MgII) согласуются между собой. В целом мы считаем согласие хорошим. Если рассматривать в таблице 1 только январьмарт и дневные часы (когда тренды максимальны по амплитуде и определяются наиболее надежно), то из 9 ситуаций, только в трех (январь 10:00 LT и март 12:00 и 14:00 LT) разброс превышает фактор два. Обращает на себя внимание тот факт, что наилучшее согласие получаемых величин k(foF2) наблюдается при корректировке индексами Ly и MgII. Это как раз то, что и следовало ожидать, поскольку оба этих индекса наиболее тесно связаны с EUV, контролирующим поведение ионосферы.

3. ТРЕНДЫ foF2 ПО ДАННЫМ СТАНЦИИ BOULDER

Как и в серии предыдущих публикаций, мы провели аналогичный анализ также и для станции Boulder. К сожалению, данные для этой станции оказались менее полными и надежными, чем для ст. Juliusruh. Нам не удалось найти данные для 2019 г. Данные для ночных часов, полученные из разных источников, оказались противоречивыми, поэтому мы ограничились рассмотрением только дневных часов и месяцев (январь-март), когда отрицательные тренды *foF2* наиболее хорошо выражены.

LT	10:00	12:00	14:00
Январь			
Ly	-0.068 (0.98))	-0.007 (0.25)	-0.020 (0.81
Rz	-0.073 (0.97)	-0.016 (0.72)	-0.019 (0.49)
MgII	-0.036 (0.85)	-0.024 (0.66)	-0.019 (0.91)
Февраль			
Ly	-0.032 (0.98)	-0.023 (0.89)	-0.019 (0.95)
Rz	-0.082 (0.99)	-0.104 (0.95)	-0.085 (0.88)
MgII	-0.077 (0.99)	-0.051 (0.89)	-0.047 (0.93)
Март			
Ly	-0.035 (0.95)	-0.030 (0.80)	-0.053 (0.82)
Rz	-0.039 (0.84)	-0.048 (0.081)	-0.075 (0.92)
MgII	-0.027 (0.94)	-0.029 (0.71)	-0.042 (0.65)

Таблица 2. Тренды foF2 в МГц/год для станции Boulder после «смутного периода» (до 2018 г.)

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова

Основной вывод, который следует из рассмотрения таблицы 2, таков же, как и из рассмотрения таблицы 1, и состоит в том, что использование индекса F10.7 sm12, скорректированного для 24-го цикла СА по другим индексам (Ly-альфа, R_z и MgII), которые лучше отображают вариации солнечного ультрафиолета, для всех рассмотренных ситуаций приводит к отрицательным трендам foF2 после «смутного периода». Эти тренды хорошо выражены и статистически значимы (высокие величины R^2) и по порядку величины близки к трендам, наблюдаемым до 2002-2004 гг. Соответствующие примеры приведены на рис. 5 и 6.



Рис. 5. Примеры изменения $\Delta foF2$ от времени для ст. Boulder в феврале.



Рис. 6. Примеры изменения $\Delta foF2$ от времени для ст. Boulder в марте.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует сделать несколько замечаний, касающихся характера полученных результатов по обеим станциям. Для всех ситуаций (месяц, момент LT) до начала «смутного периода» получаются отрицательные тренды $\Delta foF2$, близкие по величине к трендам, которые были получены в наших предыдущих публикациях [Данилов и Константинова, 2015; 2019]. Как уже указывалось, после «смутного периода» для всех ситуаций, кроме одной (Juliusruh, январь, 14:00 LT), получены отрицательные тренды. В большинстве случаев они несколько меньше по абсолютной величине, чем тренды до «смутного периода», однако, в некоторых случаях даже превосходят последние. Следует подчеркнуть, что даже с данными до 2019 г. эти тренды приходится определять на рисунках типа рис. 1-6 по небольшому количеству точек, поэтому точность определения величины k(foF2) не высока — одна случайно

52

отклонившаяся точка может существенно повлиять на эту величину. Обращают на себя внимание очень высокие величины $R^2 = 0.98-0.99$ для некоторых ситуаций в таблицах 1 и 2. Это связано с тем, что иногда малое количество точек (как правило, четыре) случайным образом ложатся на прямую линию. Мы считаем, что главным результатом этого анализа является то, что после хаотического поведения $\Delta foF2$ в течение «смутного периода» отрицательный тренд foF2 восстанавливается и что он по порядку величины совпадает с трендом, наблюдающимся до этого периода.

Длительность «смутного периода» несколько различна для разных ситуаций. Период начинается в 2002–2004 гг. А систематическое падение $\Delta foF2$ начинается в 2008-2010 гг. Поведение $\Delta foF2$ в течение «смутного периода» весьма хаотично и различно для разных ситуаций. Наблюдаются и гладкие подъемы этой величины (например, рис. 4а) и всплески (рис. 6а и 6б) и комбинации того и другого (рис. 56).

Следует обратить внимание на один важный момент. Хотя в течение «смутного периода» наблюдается хаотический характер изменения $\Delta foF2$, в конце этого периода величина $\Delta foF2$ как правило оказывается выше, чем в его начале. Это может привести к кажущемуся «перелому» тренда foF2, т.е. к переходу от длительного периода отрицательных трендов к периоду роста критической частоты, т.е. к положительных трендам. Однако поведение $\Delta foF2$ после 2008-2009 гг. на рисунках 1-6, как и на рисунках для всех остальных ситуаций, проанализированных нами (см. таблицы 1 и 2), демонстрирует «возвращение» отрицательных трендов foF2 по окончании «смутного периода».

Не смотря на описанные сложности анализа поведения критической частоты в новом столетии, мы считаем, что полученные результаты подтверждают вывод полученный в серии наших недавних публикаций [Данилов и Константинова, 2019; 2020; Danilov and Konstantinova 2020a, b], что в течение большей части 24-го цикла СА продолжается отрицательный тренд критической частоты *foF2*, наблюдавшийся в 90-х годах.

Мы считаем основным результатом данной работы тот факт, что применение часто используемого индекса CA, интенсивности линии MgII в солнечном спектре, для корректировки индекса F10.7 в течение минимума 23/24 и 24-го цикла CA дает результаты, очень близкие как качественно, так и количественно, к результатам, которые мы опубликовали в указанных недавних работах, используя корректировку индексами Ly-альфа и Rz.

Как и большинство исследователей, которые обращали внимание на необычный характер поведения ионосферных и термосферных параметров в период минимума СА между 23-м и 24-м циклами (см., например, [Emmert et al., 2010; Chen et al., 2011; Solomon et al., 2011; 2013]), мы связывали этот необычный характер с нарушением связи между наиболее распространенным индексом солнечной активности *F*10.7 и интенсивностью коротковолнового солнечного излучения, которое определяет состояние термосферы и ионосферы.

Как уже указывалось выше, многими исследователями обращалось внимание на необычное поведение индекса солнечной активности F10.7 в течение 24-го цикла СА (см., например, [Chen et al., 2014; 2018; De Haro Barbas and Elias, 2020a, b; Laštovička, 2016; 2019]). Фактически De Haro Barbas and Elias [2020a, b] пришли в недавних работах к тому же выводу, что и мы: использование индекса F10.7 в течение 24-го цикла СА приводит к уменьшению (по абсолютной величине) отрицательных и появлению положительных трендов *foF2*, которые не согласуются с трендами, получаемыми для более раннего периода без включения в анализ лет 24-го цикла.

Прекрасный пример того, как ведут себя два типа индексов СА, согласно публикациям двух независимых группа авторов, приведен на рис. 12 в работе Данилова и Константиновой [20206]. На этом рисунке приведено сравнение между индексами солнечного EUV (Ly-альфа) и F10.7 в более ранний период и в 24-м цикле СА согласно нашим данным. А рядом приведено аналогичное сравнение между индексами солнечного EUV (Mg II) и F10.7 в течение более раннего периода (1979–1995 гг.) и 24-го цикла СА согласно Laštovička [2019]. Рисунки поразительно схожи и приводят к одному и тому же заключению: связь между индексом F10.7 и солнечным EUV нарушается в 24-м цикле.

Таким образом, в данной работе подтвержден полученный в недавних публикациях авторов вывод о том, что наиболее популярный индекс солнечной активности F10.7 в 24-м цикле не передает правильно изменение солнечного ультрафиолетового излучения (EUV), которое определяет поведение термосферы и ионосферы. А, следовательно, его нельзя использовать для анализа трендов термосферных и ионосферных параметров в течение 24-го цикла СА. Насколько восстановится «нормальная» связь этого индекса с *foF2* и *hmF2* в 25-м цикле, можно будет сказать лишь через 5–6 лет.

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Важным выводом является также заключение о том, что при корректировке индекса F10.7 с помощью других индексов CA, более тесно связанных с изменением солнечного ультрафиолета, после «смутного периода» продолжаются отрицательные тренды foF2.

Не будучи специалистами в области солнечной физики, мы не в состоянии обсуждать природу или физические механизмы обнаруженного явления. Задача наших недавних публикаций и этой работы состоит в том, чтобы просто описать обнаруженный факт и показать степень его обоснованности в рамках наших представлений о характере долговременных трендов *foF2* и *hmF2*.

Мы надеемся, что другие авторы проведут исследования, аналогичные тем, что описаны в работах De Haro Barbas and Elias [2020a; b] и Laštovička [2019] и в данной работе, для проверки полученных выводов о поведении индексов солнечной активности в 24-м цикле СА.

ЛИТЕРАТУРА

- Данилов А.Д., Константинова А.В. Поведение параметров ионосферного слоя F2 на грани веков. 1. Критическая частота // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 3. С. 361–372. 2013.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Вариации трендов foF2 сезоном и временем суток // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 1. С. 56–63. 2015.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Тренды foF2 и 24-й цикл солнечной активности. // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 23, С. 42–49. 2019
- 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. 2020а.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Тренды параметров слоя f2 и 24-й цикл солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 5. С. . 20206.
- Balough, A., Hudson, H.S., Petrovary, K., von Steiger, R. Introduction to the solar cycle: Overview of causes and consequences. Space Sci. Rev. 186 (1-4), 1-15. 2014. https://doi.org/10.1007/s11214-014-0125-8.
- Bilitza D. International Reference Ionosphere 1990. National Space Science Data Center, NSSDC 90-92, Greenbelt, Maryland, 1990.
- Chen Y., Libo L., Wan W. Does the F10.7 index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009? // J. Geophys. Res. V. 116. A04304. doi:10.1029/2010JA016301. 2011.
- Chen Y., Libo L., Le H., Wan W. How does ionospheric TEC vary if solar EUV irradiance continuously decreases? // Earth Planets Space. V. 66. doi:10.1186/1880-5981-66-52. 2014.
- Chen Y., Libo L., Le H., Wan W. Ionospheric variations under extremely low solar EUV condition // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere. Hefei, China, May 14– 18, 2018.
- Damboldt T., Suessmann P. Consolidated database of worldwide measured monthly medians of ionospheric characteristics foF2 and M(3000)F2 // INAG Bulletin on the Web, INAG-73. 2012.
- Danilov A. D. Seasonal and diurnal variations in *foF2* trends // J. Geophys. Res. Space. V. 120. P. 3868–3882. doi:10.1002/2014JA020971.2015.
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Trends in foF2 and the 24th solar activity cycle // Adv. Space Research V. 65.
 P. 959-965. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.10.038. 2020a
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Trends in hmF2 and the 24th solar activity cycle // Adv. Space Research V. 66. P. 292-298. 2020b.
- De Haro Barbas B.F., Elias A. G. Effect of the inclusion of solar cycle 24 in the calculation of *foF2* long-term trend for two Japanese ionospheric stations // Pure Appl. Geophys. V. 177. P. 1071–1078. 2020.
- De Haro Barbás D.F, EliasA.G., Fagre M and Zossi B.F. Incidence of solar cycle 24 in nighttime foF2 long-term trends for two Japanese ionospheric stations // Stud. Geophys. Geod. V. 64. doi: 10.1007/s11 200-021-0548 9.
- Emmert J. T., Lean J. L., Picone J. M. Record-low thermospheric density during the 2008 solar minimum // Geophys. Res. Lett. V. 37. L12102. doi:10.1029/2010GL043671.2010.

- Laštovička J. Stability of solar correction for calculating ionospheric trends? // Paper presented at the 9th Workshop on long-term changes and trends in the atmosphere, Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016.
- Laštovička J. Is the relation between ionospheric parameters and solar proxies stable? // Geophys. Res. Letters.
 V. 46. N 24. P. 14208–14213. https://doi.org/10.1029/2019GL085033. 2019.
- Laštovička J., Akmaev R.A., Beig G., Bremer J., Emmert J.T., Jacobi C., Jarvis M.J., Nedoluha G., Portnyagin Y.I., Ulich T. Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere // Ann. Geophysicae. V. 26. N 5. P. 1255–1268. 2008.
- Livingstone, W., Penn, M. J., Svalgaard, L. Decreasing sunspot magnetic fields explain unique 10.7 cm radio flux. Astrophysical Journal Letters, 757(1), L8. 2012. https://doi.org/10.1088/2041-8205/757/1/L8

FURTHER ANALYSIS OF THE foF2 TRENDS TO 2018-2019

A.D. Danilov, A.V. Konstantinova

Changes in the F2-layer critical frequency, foF2, to 2019 (2018) are analyzed based on the vertical sounding data at Juliusruh and Boulder stations. A confirmation of all main conclusions obtained in the series of recent publications of the authors is obtained. It is shown that the most often used solar activity index F10.7 does not describe correctly the behavior of the solar ultraviolet radiation that governs the formation of the major part of the ionosphere. Correction of that index by other SA indices (intensity of the Ly-alpha line, sunspot number Rz, and intensity of the MgII line) shows that a chaotic change in foF2 is observed from 2002-2004 to 2008-2010, and then a negative trend in the critical frequency observed before this period is recovered.

KEYWORDS: IONOSPHERE, LONG-TERM TRENDS, F2-LAYER

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

54