



ТРЕНДЫ $foF2$ И 24-Й ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А.Д. Данилов, А.В. Константинова

Проанализированы тренды $foF2$ по данным ионосферных станций Juliusruh и Boulder до 2018 г. Показано, что использование традиционного индекса солнечной активности $F10.7$ приводит к необъяснимому тренду $foF2$ при включении в анализ данных для 24-го цикла солнечной активности. Высказано предположение, что индекс $F10.7$ в этом цикле не описывает правильно вариации солнечного ультрафиолетового излучения. Проведена корректировка этого индекса с помощью индексов Rz (число солнечных пятен) и Lu (интенсивность линии Лайман-альфа в солнечном спектре) и показано, что в этом случае получаются разумные величины трендов $foF2$.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ионосферный слой $F2$, долговременные тренды, 24-й цикл солнечной активности.

1 ВВЕДЕНИЕ

Авторами [Данилов и Константинова 2015; Danilov 2015] были изучены сезонные и суточные вариации критической частоты слоя $F2$, $foF2$, для ряда станций до 2009 г. Позже Данилов и Константинова [2016] проанализировали данные до 2014 г. и обнаружили, что в годы вокруг аномально низкого минимума солнечной активности 2008–2009 гг. поведение $foF2$ носило необычный характер. На временном ходе величины $\Delta foF2$, которая характеризует тренд $foF2$, в большинстве случаев наблюдались особенности («крюки», «горбы»), которые нарушали гладкий ход $\Delta foF2$, наблюдавшийся в предыдущие годы.

Как и большинство исследователей, которые обращали внимание на необычный характер поведения ионосферных и термосферных параметров в период указанного минимума СА (см., например, [Emmert et al., 2010; Chen et al., 2011; Solomon et al., 2011; 2013]), мы связывали его с нарушением связи между наиболее распространенным индексом солнечной активности $F10.7$ и интенсивностью коротковолнового солнечного излучения, которое определяет состояние термосферы и ионосферы.

Мы провели анализ трендов $foF2$ для последующего периода (до 2018 г.), который охватывал 24-й цикл СА, для двух ионосферных станций (Juliusruh и Boulder). При этом мы использовали метод выделения трендов, который был разработан нами ранее, был подробно описан (см., например, Данилов и Константинова [2013]), и использовался в наших предыдущих публикациях.

Напомним лишь кратко суть этого метода. Поскольку мы считаем, что тренды $foF2$ имеют антропогенную природу и связаны с охлаждением и оседанием верхней атмосферы (см. Laštovička et al. [2008]), а антропогенные эффекты начали проявляться только с середины 80-х годов, мы рассматриваем период 1957(58) – 1980 гг. как эталонный. Для этого периода строится зависимость $foF2$ от индекса солнечной активности $F10.7$, и с этой зависимостью сравниваются величины $foF2$ в анализируемый период. Изменение со временем разницы $\Delta foF2$ между величинами $foF2$ при тех же значениях $F10.7$ в эталонный и анализируемый периоды и дает искомый тренд. Как и в предыдущих работах, мы при нахождении трендов используем сглаженные за 11 лет величины $\Delta foF2$.

Для описываемого метода существенно, что зависимость $foF2$ от $F10.7$ для эталонного периода очень хорошо выражена и имеет высокую статистическую значимость. Коэффициент определенности R^2 по F-тесту Фишера для этой зависимости выше 0.90, а в большинстве случаев превышает 0.95, что

обеспечивает статистическую значимость 0.98 и выше. Примеры зависимости $foF2$ от $F10.7$ для рассматриваемых в следующем параграфе данных приведены на рис. 1.

Ниже приводятся результаты анализа трендов $foF2$ для периода до 2018 г., которые привели к несколько неожиданным выводам, выходящим за рамки чисто ионосферных исследований.

2 ТРЕНДЫ $foF2$ И 24-Й ЦИКЛ СА

Мы применили указанный выше метод определения трендов $foF2$ к месячным медианам станций Juliusruh и Boulder. Эти данные использовались в работах Данилова и Константиновой [2015] для выделения трендов до 2009 г. и теперь были продолжены до 2018 г. Рассматривались месяцы с января по март и моменты местного времени с 1000 до 1400 LT, когда согласно нашим предыдущим исследованиям наблюдались наибольшие отрицательные величины в сезонном и суточном ходе этих трендов. Результаты анализа оказались неожиданными.

Результаты приведены на рис. 2 для ст. Juliusruh (февраль 1400 LT и март 1200 LT). Эти рисунки показывают, что наблюдается совершенно необычное поведение $\Delta foF2$ со временем, которого не наблюдалось до сих пор ни в одном из наших расчетов. До примерно 2003 г. величина $\Delta foF2$ уменьшается, обеспечивая устойчивый отрицательный тренд $foF2$ до этого момента. Наклоны линейной аппроксимации до 2003 г. (линии на рис. 2) дают величины тренда $k(foF2)$, близкие по величине к трендам, полученным в более ранних публикациях (здесь и далее все тренды на рисунках и в таблице приведены в единицах МГц в год). Например, в работе Данилова и Константиновой [2015] для 1400 LT в феврале на ст. Juliusruh был получен тренд, равный -0.46 МГц в год, а наклон $\Delta foF2$ на рис. 2а дает -0.31 МГц в год. Аналогичная ситуация наблюдается и для 1200 LT в марте (рис. 2б) минус 0.022 и 0.025 МГц в год, соответственно. Некоторое различие в трендах, опубликованных нами ранее и полученных в данном исследовании, неизбежно должно присутствовать, поскольку в 2015 г. мы использовали среднегодовые значения индекса $F10.7$, а позже стали использовать сглаженный за 12 месяцев месячный индекс $F10.7sm12$, аналогичный индексу R_{12} , используемому в модели IRI [Bilitza 1990].

Как видно из рис. 2, после 2004 г. начинается неожиданный рост $\Delta foF2$. Как раз с 2003–2005 г. мы начинаем при сглаживании захватывать годы пресловутого аномального минимума солнечной активности. А дальше идет 24-й цикл СА. Разумных физических причин для этого роста не видно. Количество CO_2 в земной атмосфере продолжает монотонно расти. А, значит, следует ожидать и продолжения процесса охлаждения и оседания верхней ионосферы. Отрицательные тренды $foF2$, по нашему глубокому убеждению, являются одним из проявлений этого процесса. Наиболее разумное предположение – индекс $F10.7$ в 24-м цикле не отражает ход ионизирующей солнечной радиации (EUV). Тот факт, что 24-й цикл СА является необычным, неоднократно упоминался в докладах на предыдущих 4-х 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 поисках ионосферных трендов. В недавней работе De Naro Barbas and Elias [2019] предположение о том, что в 24-м цикле СА нарушается существовавшая ранее связь между индексом $F10.7$ и солнечным ультрафиолетом рассматривается как основная возможность объяснения полученных указанными авторами трендов $foF2$ в 24-м цикле (см. ниже).

Чтобы проверить указанную гипотезу, мы сравнили связь $F10.7sm12$ с другими солнечными индексами: числом солнечных пятен R_z и интенсивностью линии $Ly-\alpha$. Мы использовали среднемесячные значения индексов R_z и Ly и сравнивали их с индексом $F10.7sm12$, описанным выше. Оказалось, что обе эти связи заметно различаются в 23-м и 24-м циклах. При этом, если в 23-м цикле связь $F10.7sm12$ с индексами R_z и Ly очень хорошо выражена и имеет высокую статистическую значимость ($R^2 > 0.93$), то в 24-м цикле она, как правило, выражена хуже.

Пример связи между R_z и Ly с $F10.7sm12$ для февраля приведен на рис. 3. Хорошо видно, что наклон аппроксимирующих линий для точек 23-го цикла (1998–2006 гг.) и 24-го цикла (2010–2018 гг.) в обоих случаях различен, а также то, что разброс точек относительно аппроксимирующей кривой для 24-го цикла больше, чем для 23-го цикла. На рисунке 3а эта разница особенно значительна: $R^2=0.60$ и $R^2=0.94$ для 24-го и 23-го циклов, соответственно.

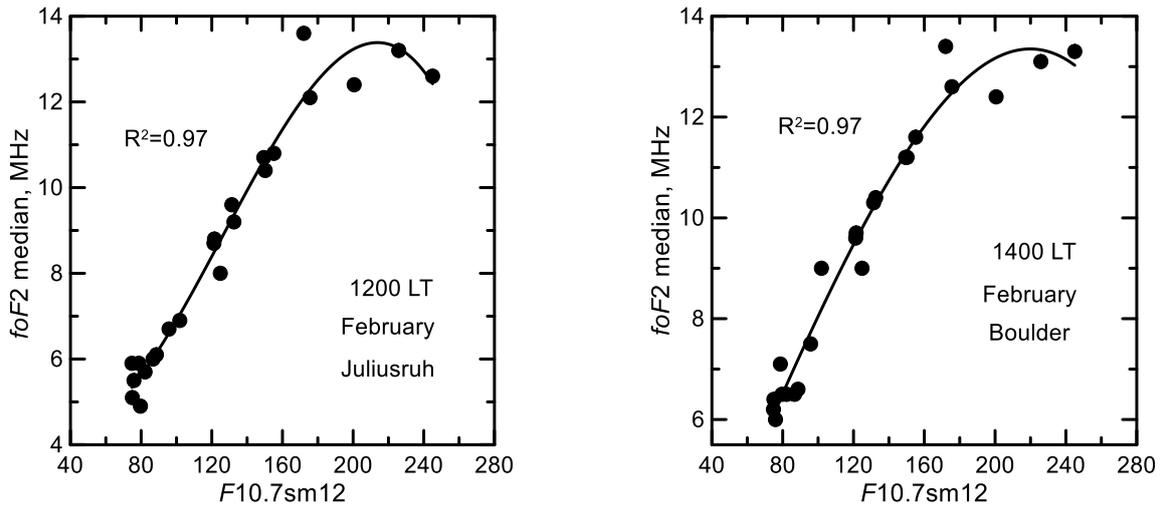


Рис. 1. Примеры зависимости $foF2$ от $F10.7$ для эталонного периода.

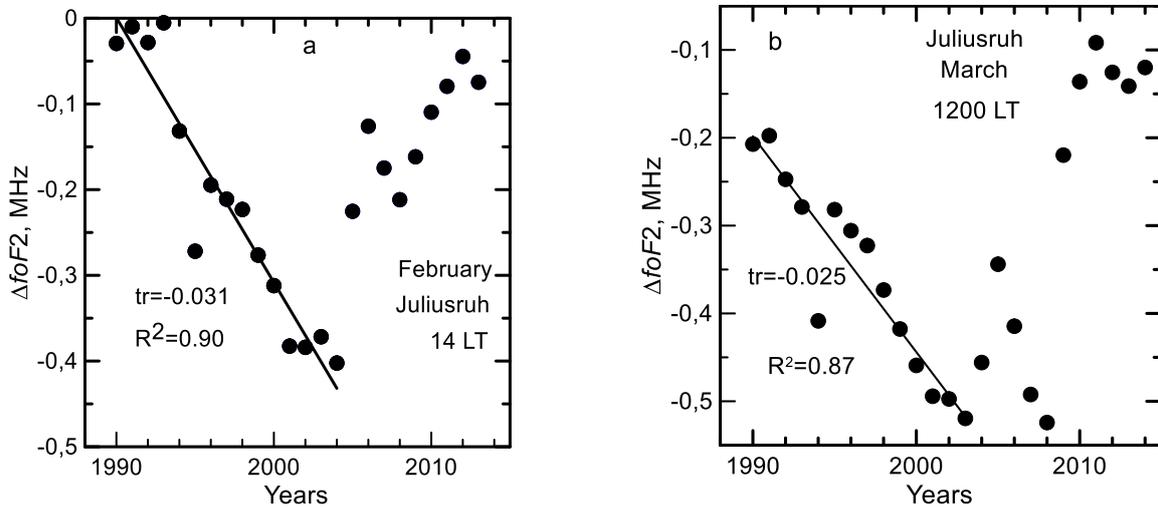


Рис. 2. Зависимость $\Delta foF2$ от времени для ст. Juliusruh.

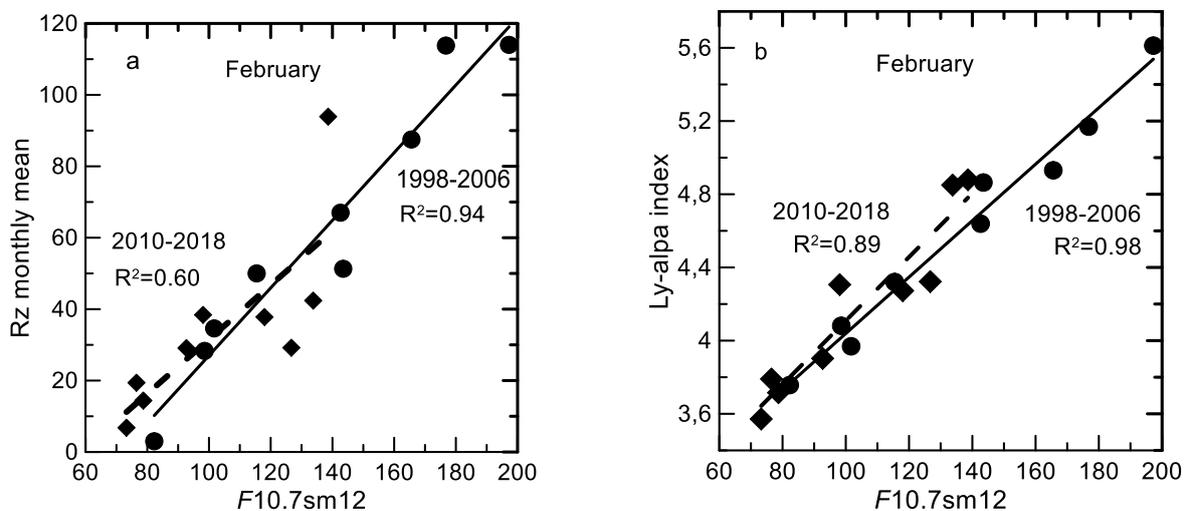


Рис. 3. Связь среднемесячных значений индексов Rz (а) и Ly (б) с индексом $F10.7sm12$ (точки и ромбы соответствуют 1998 – 2006 и 2010 – 2018 гг.).

Мы приняли, что указанные связи «правильны» в 23-м цикле и (по неизвестным нам причинам) нарушены в 24-м цикле. Поскольку по очевидным физическим причинам следует ожидать, что индексы R_z и Ly более тесно связаны с EUV, чем индекс $F10.7$, мы использовали связи R_z и Ly с $F10.7sm12$, найденные для 23-го цикла, чтобы скорректировать величины $F10.7_{12}$ для 2010 – 2018 гг. по индексам R_z и Ly , наблюдавшимся в 24-м цикле. С помощью скорректированных для 24-го цикла индексов $F10.7sm12$ были заново проведены расчеты модельных значений $foF2$ и соответствующих величин $\Delta foF2$. Результаты расчетов приведены на рис. 4.

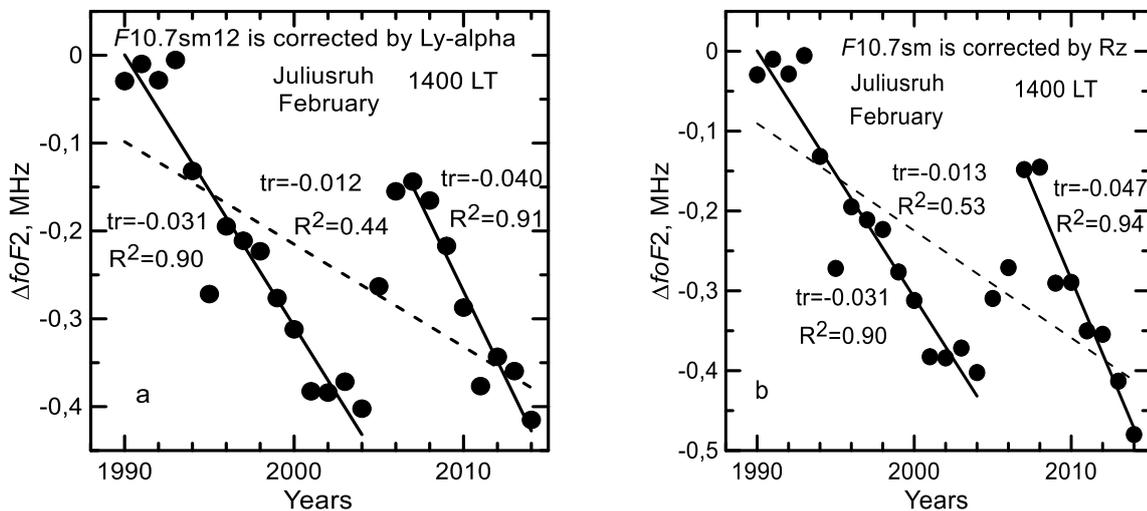


Рис. 4. Изменение величины $\Delta foF2$ со временем (ст. Juliusruh, февраль, 1400 LT) при использовании скорректированных по Ly (а) и R_z (б) индексов $F10.7sm12$.

Необходимо подчеркнуть, что на рис. 4 рассмотрена та же ситуация (ст. Juliusruh, февраль, 1400 LT), что и на рис. 2а, но при использовании скорректированных индексов $F10.7sm12$. Видно, что для периода до 2003 – 2004 гг. мы получаем в обоих случаях тот же тренд, что и на рис. 2а. (-0.031 МГц в год). В то же время, использование скорректированных индексов в корне меняет картину изменения $\Delta foF2$ со временем после 2008 – 2009 гг. Вместо роста величины $\Delta foF2$ со временем, наблюдается ее падение, дающее разумные значения тренда $k(foF2)$, близкие к тренду, полученному для периода до 2003 – 2004 гг.

В интервале между 2003 – 2004 и 2007 – 2008 гг. наблюдается период, который мы условно назвали «смутный период», когда не удается найти какой-либо системы в поведении $\Delta foF2$. Изменение $\Delta foF2$ в течение «смутного периода» различно для различных ситуаций, но для всех ситуаций характерен переход к уменьшению $\Delta foF2$ по окончании этого периода. Длительность «смутного периода» несколько различна для разных ситуаций и меняется от 3 до 5 лет (см. ниже рис. 5 – 7).

Мы считаем, что существование «смутного периода» связано с особенностями поведения $foF2$ в годы около аномального минимума СА. Ранее Данилов и Константинова [2016] обнаружили, что именно в эти годы наблюдаются особенности («крюки» и «горбы») в поведении $foF2$. В данной работе, используя данные для более поздних лет, мы получаем, что при использовании индекса $F10.7$ аномальное поведение $\Delta foF2$ продолжается и в течении всего 24-го цикла. Однако при использовании скорректированных значений этого индекса, «нормальный» ход $\Delta foF2$ восстанавливается примерно с 2007 – 2008 гг., когда при сглаживании начинают сказываться «нормальные» значения $\Delta foF2$ после 2010 г.

Обсуждая рис. 4, следует отметить, что даже при линейной аппроксимации всех данных (без разделения на периоды до 2004 г. и после 2007 г.) получается отрицательный тренд $k(foF2)$ (штриховая линия), хотя его абсолютная величина невелика, а статистическая значимость мала. Такая картина наблюдалась не во всех рассмотренных ситуациях. В некоторых случаях эффект «смутного периода» был настолько силен, что тренд, полученный по всем точкам, становился нулевым, или даже слегка положительным. Но в других случаях, наоборот, этот тренд становился значительным (отрицательным), близким к тренду до 2003 – 2004 гг. (см., например, рис 7б).

Совершенно аналогичная картина наблюдалась для всех 36 рассмотренных ситуаций: две ионосферных станции, три месяца, три момента LT и два корректирующих параметра. Для полноты

иллюстрации мы приводим на рис. 5 – 7 еще несколько примеров для различных ситуаций. Из этих рисунков следует, что во всех случаях наблюдается одна и та же картина: падение $\Delta foF2$, дающее отрицательный тренд $k(foF2)$, «смутный период» с хаотичным поведением $\Delta foF2$ и вновь падение $\Delta foF2$, дающее отрицательный тренд в последние годы временного интервала.

Сводка результатов для всех рассмотренных ситуаций приведена в таблице 1.

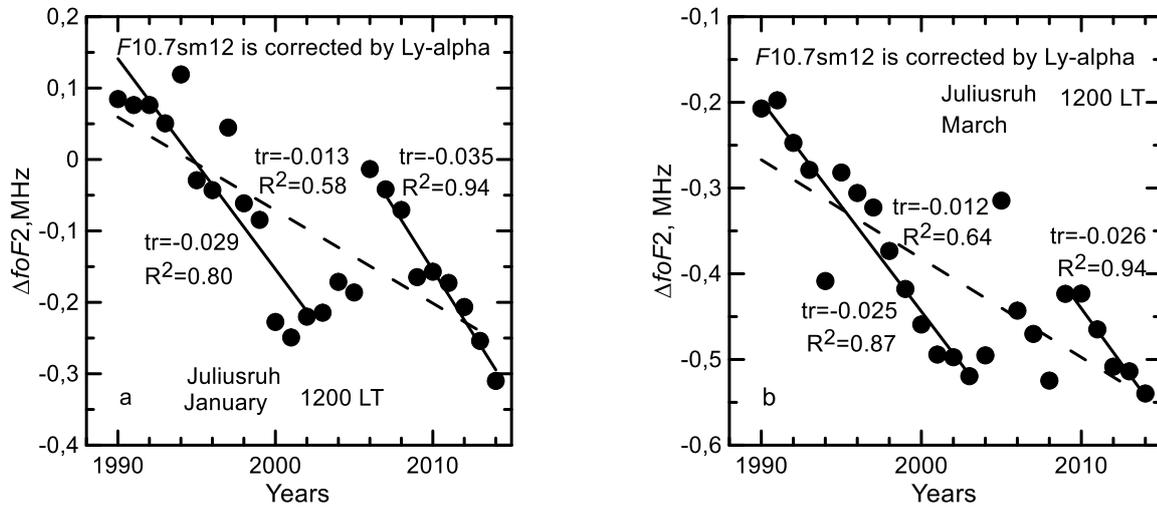


Рис. 5. Изменение величины $\Delta foF2$ со временем (ст. Juliusruh, январь и март, 1200 LT) при использовании скорректированных по Ly индексов $F10.7sm12$.

Таблица 1. Тренды k в МГц/год для разных месяцев и двух станций.

Местное время	k [2015]	k для 1990–2003		k для 2007–2018	
		Ly	R_z	Ly	R_z
Juliusruh					
Январь					
1000	-0.020	-0.011	-0.011	-0.030	-0.019
1200	-0.026	-0.029	-0.029	-0.035	-0.046
1400	-0.041	-0.028	-0.028	-0.032	-0.037
Февраль					
1000	-0.061	-0.025	-0.025	-0.018	-0.012
1200	-0.071	-0.039	-0.039	-0.055	-0.053
1400	-0.046	-0.031	-0.031	-0.040	-0.047
Март					
1000	-0.013	-0.015	-0.015	-0.033	-0.028
1200	-0.022	-0.025	-0.025	-0.026	-0.067
1400	-0.046	-0.031	-0.031	-0.030	-0.085
Boulder					
Январь					
1000		-0.021	-0.021	-----	-----
1200		-0.041	-0.041	-0.034	-0.052
1400		-0.039	-0.039	-0.024	-0.039
Февраль					
1000	-0.050	-0.032	-0.032	-0.049	-0.053
1200	-0.053	-0.036	-0.036	-0.018	-0.038
1400	-0.050	-0.037	-0.037	-0.032	-0.039
Март					
1000		-0.023	-0.023	-0.035	-0.042
1200		-0.030	-0.030	-0.038	-0.027
1400		-0.027	-0.027	-0.055	-0.051

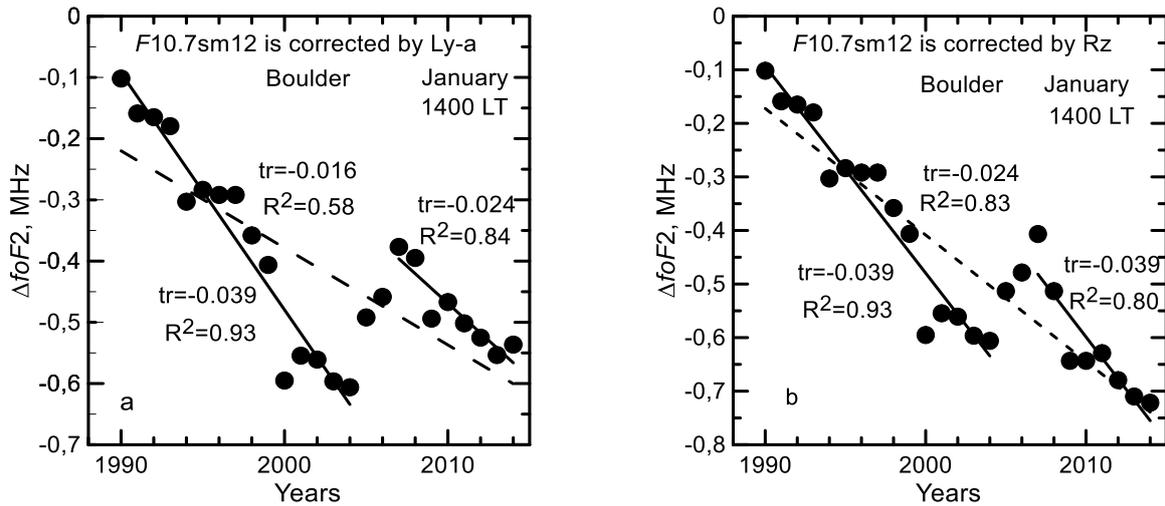


Рис. 6. Изменение величины $\Delta foF2$ со временем (ст. Boulder, январь, 1400 LT) при использовании скорректированных по Ly (a) Rz (б) индексов $F10.7sm12$.

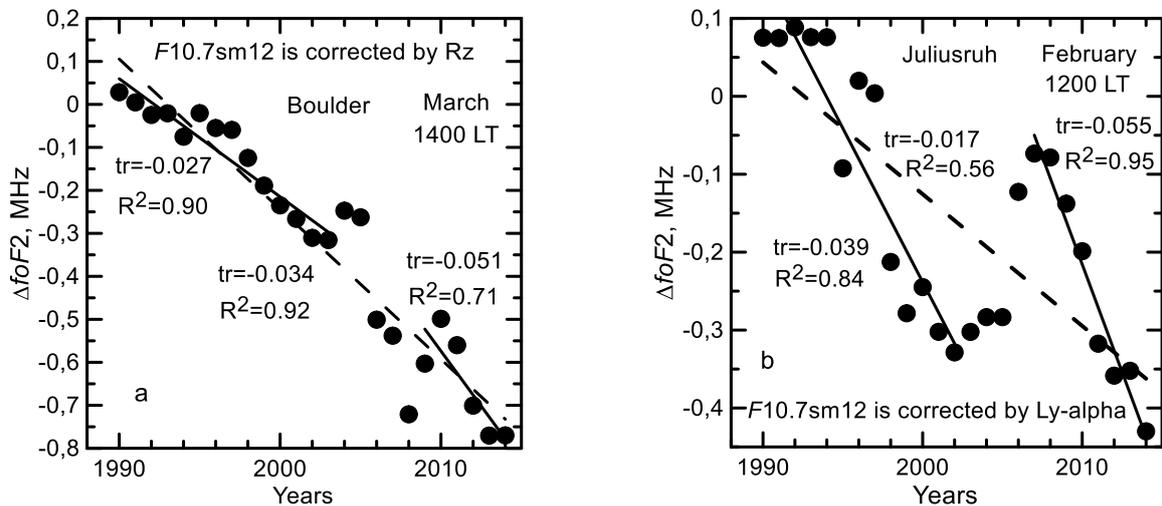


Рис. 7. Изменение величины $\Delta foF2$ со временем (ст. Boulder, март, 1400 LT и ст. Juliusruh, февраль, 1200 LT) при использовании скорректированных по Rz (a) и Ly (б) индексов $F10.7sm12$.

3 ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, проведенный в предыдущем параграфе анализ данных о критической частоте слоя $F2$ ионосферы $foF2$ привел к выводу, что применение наиболее часто используемого индекса солнечной активности $F10.7$ для выделения трендов $foF2$ до 2018 г. дает очень странные результаты. Падение величины $\Delta foF2$, дающее разумный отрицательный тренд $k(foF2)$ нарушается около 2003 – 2004 гг. и сменяется ростом, дающим сильный положительный тренд. Такое поведение $\Delta foF2$ (и, соответственно, тренда $k(foF2)$) противоречит существующим представлениям о характере и природе трендов параметров слоя $F2$. Поскольку продолжается увеличение количества CO_2 в атмосферном газе, следует ожидать и продолжения процесса охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы в течение последнего десятилетия. Измерения различных параметров нейтральной атмосферы и ионосферы показывают, что это, действительно так (см., например, итоговый доклад J. Laštovička на 10-м Симпозиуме по долговременным изменениям и трендам в атмосфере [Laštovička, 2019]).

Как уже указывалось выше, многими исследователями обращалось внимание на необычное поведение индекса солнечной активности $F10.7$ в течение 24-го цикла СА (см., например, [Yiding Chen et al., 2014; 2018; De Haro Barbas and Elias, 2019]). Наиболее четко эта проблема сформулирована в недавней работе De Haro Barbas and Elias [2019]. Авторы этой работы анализировали тренды $foF2$ по данным двух ионосферных станций (Kokubunji (35.7°N, 139.5°E) и

Wakkanai (45.4°N, 141.7°E). 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.

Указанный результат заставил De Haro Barbas and Elias [2019] предложить два возможных объяснения. Первое из них состоит в том, что «solar cycle 24 is too low and $F10.7$ underestimates true EUV levels» (24-й солнечный цикл слишком низок и $F10.7$ недооценивает реальный уровень EUV).

Исходя из последнего предположения, мы провели коррекцию величины $F10.7$, используемой в наших исследованиях трендов. Коррекция состояла в том, что мы использовали зависимости между $F10.7$ и двумя другими индексами солнечной активности Rz (число солнечных пятен) и Ly (интенсивность линии Лайман-альфа в солнечном спектре). Эта процедура подробно описана выше в параграфе 2.

Использование скорректированных индексов $F10.7$ привело к кардинальному изменению поведения величины $\Delta foF2$ после 2003 – 2004 гг. Характер получаемых зависимостей подробно описан и проиллюстрирован в предыдущем параграфе. Вкратце оно состоит в том, что падение $\Delta foF2$ до 2003 – 2004 г., дающее разумный отрицательный тренд $foF2$, сменяется хаотическим изменением в течение 3 – 5 лет. Только после 2007 – 2009 гг. указанное падение восстанавливается, вновь давая приемлемые значения отрицательного тренда $foF2$ в последние годы рассмотренного периода.

Мы считаем, что период хаотического поведения $\Delta foF2$, который мы назвали «смутным периодом», связан с особенностями аномально низкого минимума солнечной активности 2008 – 2009 гг. На эти особенности неоднократно обращали внимание разные авторы (см., например, работу De Haro Barbas and Elias [2019] и ссылки в ней). При сглаживании величин $\Delta foF2$, которое мы применяем в нашем методе, эти особенности начинают сказываться как раз около 2003 – 2004 гг. Влияние данных после 2010 г. приводит к восстановлению «нормального» падения $\Delta foF2$, начиная с 2007 – 2009 г.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получен неожиданный для ионосферного исследования 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 SA.

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

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

Данные о медианах критической частоты $foF2$ взяты из банка данных Дамбольдта и Суссмана [Damboldt and Suessmann, 2012] и с сайтов <https://www.sws.bom.gov.au> и <http://giro.uml.edu>. Среднемесячные значения числа солнечных пятен Rz и среднемесячные значения индекса Ly были взяты с сайта lasp.colorado.edu.

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 критической частоты foF2 после 2009 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56 № 3. С. 324-332. 2016
- 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.*, 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 and Space*, 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 Physics*. 120. 2015. doi:10.1002/2014JA020971.
- *de Haro Barbás, 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.* 2019. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02307>.
- *Emmert, J. T., Lean, J. L., Picone, J. M.* Record-low thermospheric density during the 2008 solar minimum // *Geophys. Res. Letters*, 37, L12102, 2010. doi:10.1029/2010GL043671.
- *Laštovička, J.* A review of recent progress in trends in the upper atmosphere // *J. Atmos. Solar Terr. Physics*, 163, 2–13. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.009>
- *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*. 26 (5), 1255–1268. 2008.
- *Solomon, S. C., Qian, L., Didkovsky, L. V., Viereck, R. A., Woods, T. N.* Causes of low thermospheric density during the 2007–2009 solar minimum. *J. Geophys. Res.*, 116, A00H07, 2011. doi:10.1029/2011JA016508.
- *Solomon, S. C., Qian, L., Burns, A. G.* The anomalous ionosphere between solar cycles 23 and 24. *J. Geophys. Res., Space Physics*, 118, 6524–6535, 2013. doi:10.1002/jgra.50561

TRENDS $foF2$ AND 24th SOLAR ACTIVITY CYCLE

Danilov A. D., Konstantinova A. V.

The trends in $foF2$ are analyzed based on the data of Juliusruh and Boulder ionospheric stations. It is shown that using the traditional solar activity index $F10.7$ leads to an impossible trend in $foF2$ when the data for the 24th solar activity cycle are included into the analysis. It is assumed that the $F10.7$ index does not describe correctly the solar ultraviolet radiation variations in that cycle. A correction of this index using the R_z (sunspot number) and Ly (intensity of the Lyman- α line in the solar spectrum) is performed, and it is shown that in that case reasonable values of the $foF2$ trends are obtained.

KEYWORDS: IONOSPHERIC $F2$ -LAYER, LONG-TERM TRENDS, 24TH SA CYCLE