

УДК 550.388.2

ТРЕНДЫ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ F_2 И 24-Й ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2020 г. А. Д. Данилов¹, *, А. В. Константинова¹, **

¹Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова Роскомгидромета (ИПГ), г. Москва, Россия

*e-mail: adanilov99@mail.ru

**e-mail: anna@tabulata.ru

Поступила в редакцию 27.04.2020 г.

После доработки 16.05.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Проанализированы тренды foF_2 по данным ионосферных станций Juliusruh и Boulder до 2018 г. Показано, что использование традиционного индекса солнечной активности $F_{10.7}$ приводит к необъяснимому тренду foF_2 при включении в анализ данных для 24-го цикла солнечной активности. Высказано предположение, что индекс $F_{10.7}$ в этом цикле не описывает правильно вариации солнечного ультрафиолетового излучения. Проведена корректировка этого индекса с помощью индексов R_z (число солнечных пятен) и $Ly-\alpha$ (интенсивность линии Лайман-альфа в солнечном спектре) и показано, что в этом случае получают разумные величины трендов foF_2 . Аналогичный анализ для трендов hmF_2 приводит к тем же результатам.

DOI: 10.31857/S0016794020050041

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование трендов параметров ионосферных слоев представляет большой интерес и важно, как в теоретическом, так и в прикладном плане (см. недавний обзор [Данилов и Константинова, 2020]).

Авторами [Данилов и Константинова, 2015; Danilov, 2015] были изучены сезонные и суточные вариации критической частоты слоя F_2 , foF_2 , 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 (СА) 2008–2009 гг. поведение foF_2 носило необычный характер. На временном ходе величины ΔfoF_2 , которая характеризует тренд foF_2 , в большинстве случаев наблюдались особенности (“крюки”, “горбы”), которые нарушали гладкий ход ΔfoF_2 , 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 $F_{10.7}$ и интенсивностью коротковолнового солнечного излучения, которое определяет состояние термосферы и ионосферы.

Мы провели анализ трендов foF_2 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 foF_2 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 foF_2 от индекса солнечной активности $F_{10.7}$, и с этой зависимостью сравниваются величины foF_2 в анализируемый период. Изменение со временем разницы ΔfoF_2 между величинами foF_2 при тех же значениях $F_{10.7}$ в эталонный и анализируемый периоды и дает искомый тренд. Как и в предыдущих работах, мы при нахождении трендов используем сглаженные за 11 лет величины ΔfoF_2 .

Для описываемого метода существенно, что зависимость foF_2 от $F_{10.7}$ для эталонного периода очень хорошо выражена и имеет высокую статистическую значимость. Коэффициент определенности R^2 по F-тесту Фишера для этой зависи-

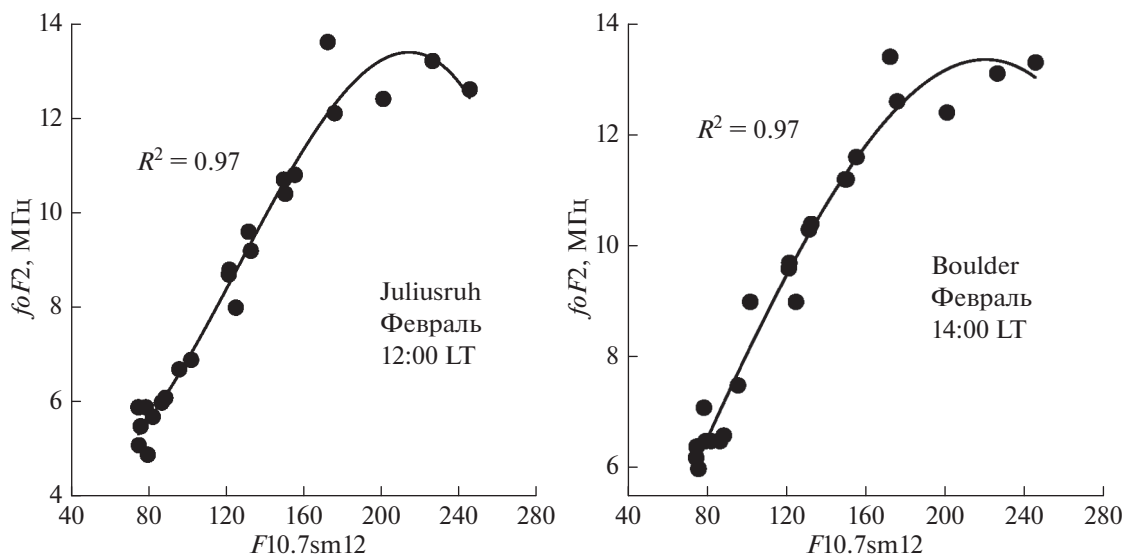


Рис. 1. Примеры зависимости $foF2$ от $F10.7$ для эталонного периода.

мости 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 $foF2$ и $hmF2$ 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 10:00 до 14:00 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 14:00 LT и март 12:00 LT). Эти результаты 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 рисун-

ках и в таблице приведены в единицах МГц в год). Например, в работе Данилова и Константиновой [2015] для 14:00 LT в феврале на ст. Juliusruh был получен отрицательный тренд, равный 0.046 МГц в год, а наклон $\Delta foF2$ на рис. 2а дает 0.031 МГц в год. Аналогичная ситуация наблюдается и для 12:00 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 мес. 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 гг. 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 четырех Симпозиумах по долгосрочным трендам в атмосфере и, в частности, в итоговых докладах J. Laštovička. Laštovička [2016] указывал на проблемы, связанные с пра-

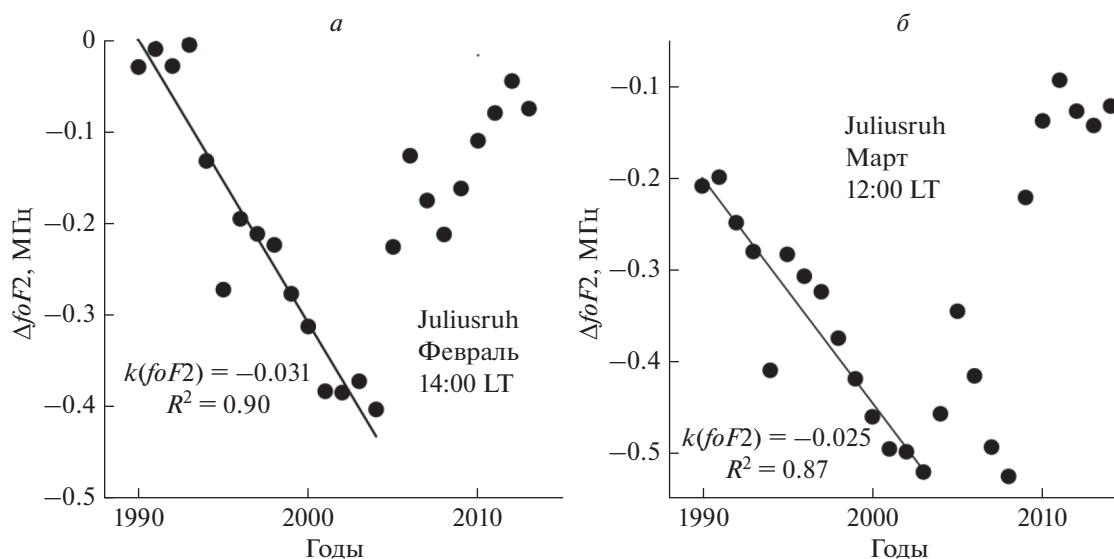


Рис. 2. Зависимость $\Delta foF2$ от времени для ст. Juliusruh.

вильным учетом солнечной активности при поисках ионосферных трендов. В недавней работе De Haro Barbas and Elias [2020] 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.

Чтобы проверить указанную гипотезу, мы сравнили связь $F10.7sm12$ с другими солнечными индексами: числом солнечных пятен Rz и интенсивностью линии $Ly-\alpha$. Мы использовали среднемесячные значения индексов Rz и $Ly-\alpha$ 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 Rz и $Ly-\alpha$ 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 Rz и $Ly-\alpha$ 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.

Мы приняли, что указанные связи “правильные” в 23-м цикле и (по неизвестным нам пока причинам) нарушены в 24-м цикле. Поскольку по очевидным физическим причинам следует ожидать, что индексы Rz и $Ly-\alpha$ более тесно связаны с

EUV, чем индекс $F10.7$, мы использовали связи Rz и $Ly-\alpha$ с $F10.7sm12$, найденные для 23-го цикла, чтобы скорректировать величины $F10.7sm12$ для 2010–2018 гг. по индексам Rz и $Ly-\alpha$, 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.

Необходимо подчеркнуть, что на рис. 4 рассмотрена та же ситуация (ст. Juliusruh, февраль, 14:00 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,

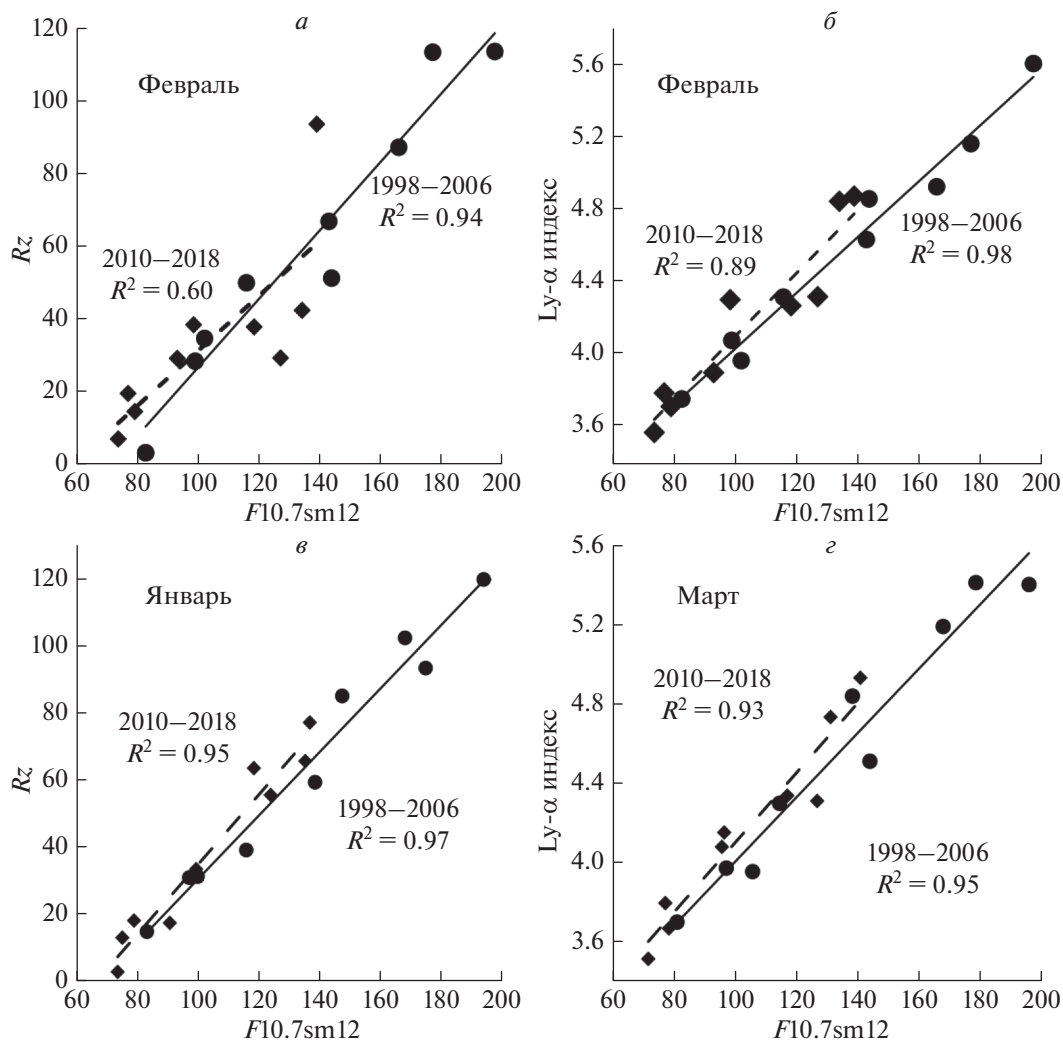


Рис. 3. Связь среднемесячных значений индексов Rz (*a*, *в*) и Ly-α (*б*, *г*) с индексом F10.7sm12.

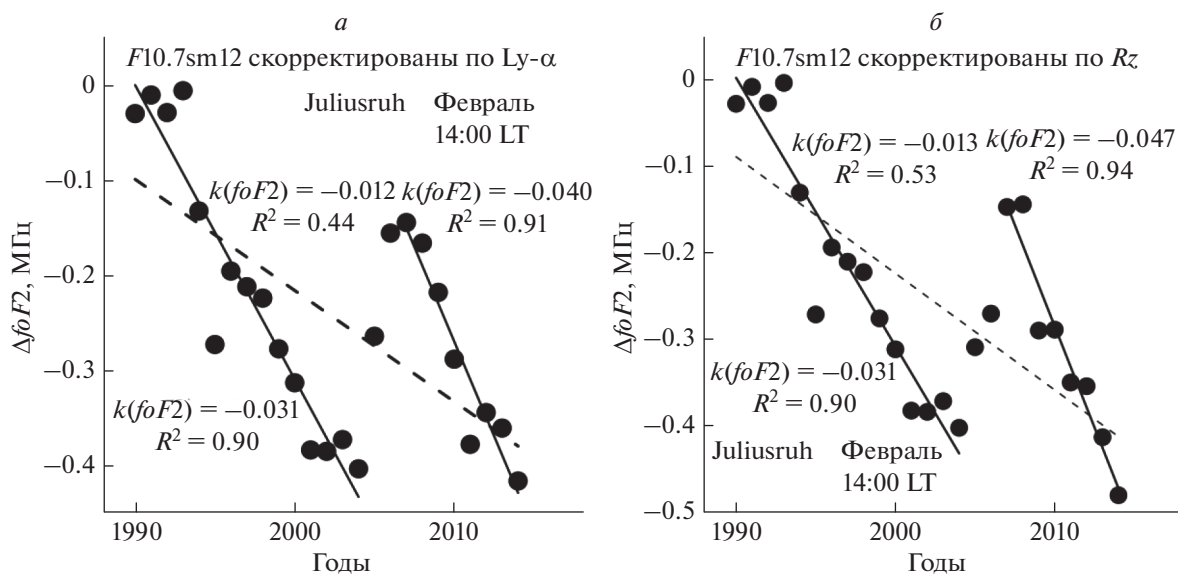


Рис. 4. Изменение величины $\Delta foF2$ со временем (ст. Juliusruh, февраль, 14:00 LT) при использовании скорректированных по Ly-α (*a*) и Rz (*б*) индексов F10.7sm12.

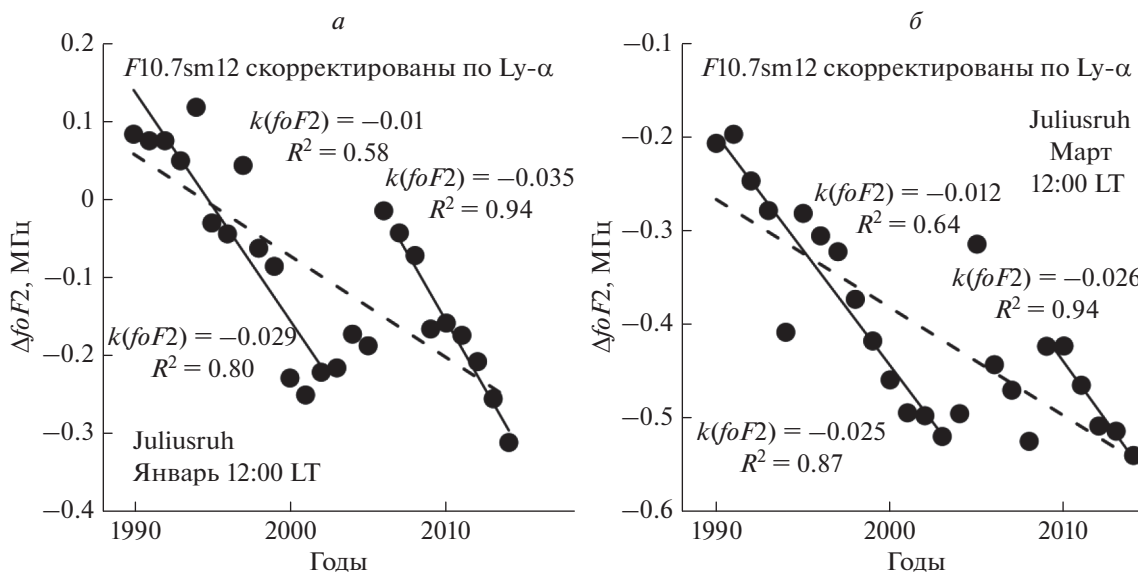


Рис. 5. Изменение величины $\Delta foF2$ со временем (ст. Juliusruh, январь и март, 12:00 LT) при использовании скорректированных по Ly- α индексов $F10.7sm12$.

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 течение 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 2003–2004 гг. и после 2007–2008 гг.) 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 пе-

риод” 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 табл. 1.

3. ТRENДЫ $hmF2$ И 24-Й ЦИКЛ СА

Мы проанализировали результаты измерений $hmF2$ на ст. Juliusruh за тот же период с 1957(1958) по 2018 гг., за который анализировались данные по $foF2$ в предыдущем параграфе. Как и в указанных работах, мы рассматривали три месяца (январь, февраль и март) и три момента местного времени (10:00, 12:00 и 14:00 LT), для которых в наших более ранних работах были получены наиболее выразительные отрицательные тренды $foF2$ в суточных и сезонных вариациях этих трендов. Величины $hmF2$ рассчитывались на основании величин M3000 методом Шимазаки [Shimazaki, 1955]. Мы применили к анализу величин $hmF2$ тот же метод, что использовался нами в течение многих лет для анализа трендов параметров ионосферных слоев. Так же, как и в предыдущем параграфе, мы использовали индекс $F10.7sm12$, сглаженный за 12 мес., аналогично индексу R_{12} , используемому в модели IRI [Bilitza, 1990].

Следуя процедуре предыдущего параграфа, мы первоначально построили изменение величины $\Delta hmF2$, характеризующей изменение $hmF2$ в текущий период по сравнению с “эталонным” периодом 1958–1980 гг., используя индекс $F10.7sm12$ без всякой коррекции. Результаты оказались качественно подобны результатам, полученным по

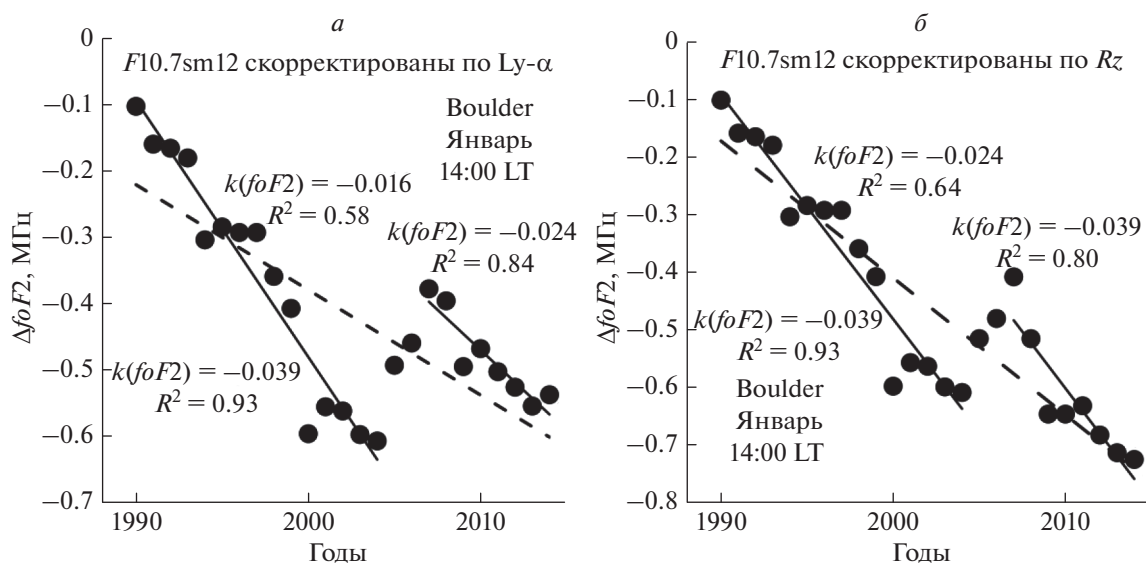


Рис. 6. Изменение величины $\Delta foF2$ со временем (ст. Boulder, январь, 14:00 LT) при использовании скорректированных по Ly- α (6а) и Rz (6б) индексов F10.7sm12.

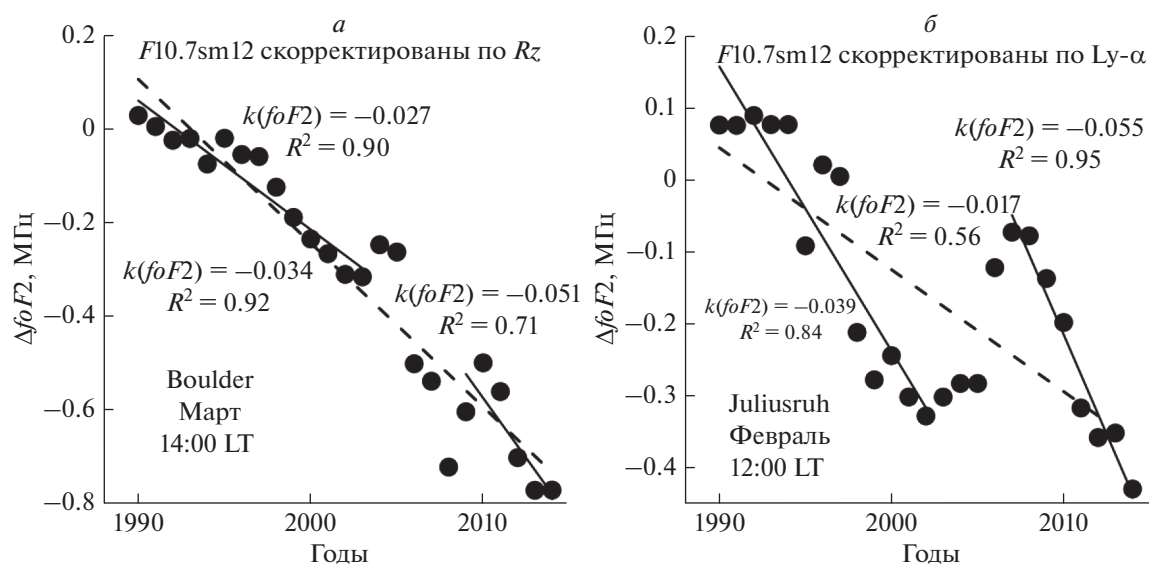


Рис. 7. Изменение величины $\Delta foF2$ со временем (ст. Boulder, март, 14:00 LT и ст. Juliusruh, февраль, 12:00 LT) при использовании скорректированных по Rz (а) и Ly- α (б) индексов F10.7sm12.

$foF2$. Примеры изменения $\Delta hmF2$ для 12:00 LT в феврале и 14:00 LT в марте приведены на рис. 8.

Как следует из рис. 8, в случае $hmF2$ наблюдается та же картина изменения тренда $hmF2$ ($k(hmF2)$) со временем: до 2002–2003 гг. как и в случае $foF2$ (см. выше рис. 4). Мы имеем хорошо выраженный отрицательный тренд с высокой статистической значимостью (коэффициент определенности $R^2 = 0.96$ и 0.90). После 2002–2003 гг. уменьшение $\Delta hmF2$ прекращается и наблюдается его рост. Если рассматривать все годы

на рис. 8, то в обоих случаях получается падение $\Delta hmF2$ (сплошная линия), но она соответствует гораздо более низкому тренду при гораздо более низких величинах R^2 .

Поскольку, как и в случае $foF2$, такое поведение $\Delta hmF2$ представляется нам нереальным и противоречащим текущей ситуации с увеличением количества CO_2 и усилением оседания и охлаждения верхней атмосферы, мы провели с величинами $hmF2$ ту же процедуру, что и с $foF2$ в предыдущем параграфе, т.е. использовали для

Таблица 1. Тренды $k(foF2)$ в МГц/год для разных месяцев и двух станций

LT	k [2015]	k для 1990–2003 гг.		k для 2007–2018 гг.	
		Ly	Rz	Ly	Rz
Juliusruh					
Январь					
10:00	–0.020	–0.011	–0.011	–0.030	–0.019
12:00	–0.026	–0.029	–0.029	–0.035	–0.046
14:00	–0.041	–0.028	–0.028	–0.032	–0.037
Февраль					
10:00	–0.061	–0.025	–0.025	–0.018	–0.012
12:00	–0.071	–0.039	–0.039	–0.055	–0.053
14:00	–0.046	–0.031	–0.031	–0.040	–0.047
Март					
10:00	–0.013	–0.015	–0.015	–0.033	–0.028
12:00	–0.022	–0.025	–0.025	–0.026	–0.067
14:00	–0.046	–0.031	–0.031	–0.030	–0.085
Boulder					
Январь					
10:00		–0.021	–0.021	–	–
12:00		–0.041	–0.041	–0.034	–0.052
14:00		–0.039	–0.039	–0.024	–0.039
Февраль					
10:00	–0.050	–0.032	–0.032	–0.049	–0.053
12:00	–0.053	–0.036	–0.036	–0.018	–0.038
14:00	–0.050	–0.037	–0.037	–0.032	–0.039
Март					
10:00		–0.023	–0.023	–0.035	–0.042
12:00		–0.030	–0.030	–0.038	–0.027
14:00		–0.027	–0.027	–0.055	–0.051

24-го цикла величины $F10.7sm12$, скорректированные по величинам индексов Rz и $Ly-\alpha$, измеренным в этом цикле.

Результаты анализа данных по $hmF2$ оказались качественно подобны результатам по $foF2$. До 2002–2003 гг. наблюдается хорошо выраженный отрицательный тренд с высокой статистической значимостью, а затем падение $\Delta hmF2$ нарушается (наступает “смутный период”). И лишь в последние 4–6 лет вновь появляется тенденция уменьшения $\Delta hmF2$ со временем, дающая отрицательный тренд $hmF2$. Наиболее яркий пример такого поведения $\Delta hmF2$ приведен на рис. 9 для 12:00 LT в феврале при корректировке величин $F10.7sm12$ индексами Rz и $Ly-\alpha$. На рисунке 9 и следующих рисунках сплошной линией показаны аппроксимации всех точек. Штриховые линии соответствуют аппроксимации точек до 2002–2003 гг.

(левая линия) и для последнего периода (правая линия). Рядом с линиями показаны соответствующие величины тренда в единицах км/год и коэффициента определенности R^2 .

Как видно из рис. 9, до примерно 2002 г. в обеих ситуациях наблюдается хорошо выраженный отрицательный тренд (–1.75 км в год), затем в течение “смутного периода” поведение $\Delta hmF2$ носит достаточно хаотичный характер и лишь в последние несколько лет вновь намечается тенденция отрицательного тренда. В этом отношении картина близка к тому, что наблюдается для поведения величин $\Delta foF2$ (см. соответствующие рисунки в предыдущем параграфе).

Во всех 18 рассмотренных ситуациях (3 мес., 3 момента LT и два корректирующих параметра) указанный эффект присутствует и хорошо выра-

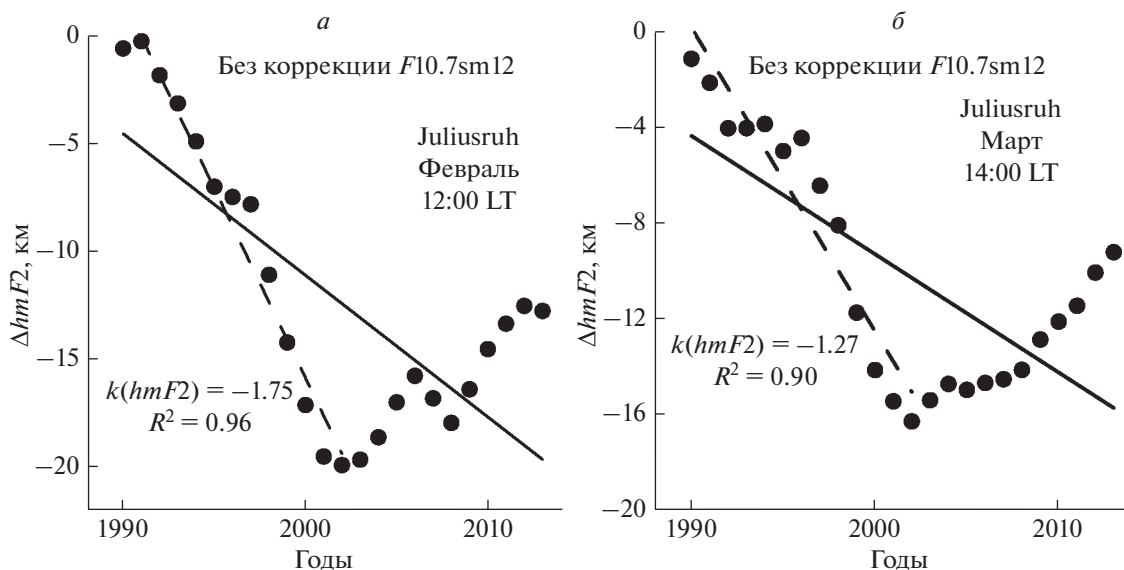


Рис. 8. Примеры изменения $\Delta hmF2$ по данным ст. Juliusruh в 12:00 LT в феврале и в 14:00 LT в марте.

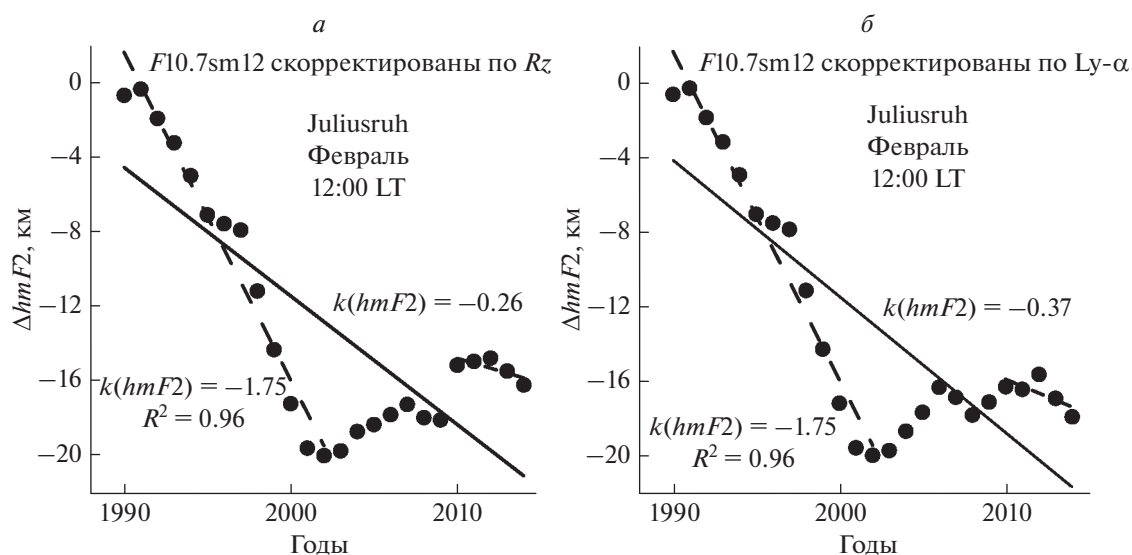


Рис. 9. Изменение $\Delta hmF2$ со временем (февраль, 12:00 LT) при корректировке индекса $F10.7sm12$ индексами Rz (а) и $Ly-\alpha$ (б).

жен в 14 случаях. Для полноты иллюстрации на рис. 10 приводится картина, аналогичная рис. 9, но для 12:00 LT в марте.

В 4 случаях из 18 эффект “смутного периода” выражен не так четко, как на рисунках 9 и 10. Пример для 10:00 LT в марте и январе приведен на рис. 11. Как видно из рис. 11, там эффект “смутного периода” только намечается в виде небольшого отклонения точек $\Delta hmF2$ от хорошо выраженного хода до 2002–2003 гг. Отрицательный тренд после 2007–2008 гг. выражен лучше, чем на рисунках 9 и 10. Он больше по абсолютной величине и более

значим статистически (R^2 равен 0.84 и 0.95). При этом аппроксимация по всем точкам дает отрицательный тренд с высокой статистической значимостью, близкий по величине к тренду, получаемому до 2002–2003 гг.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, проведенный в параграфе 2 анализ данных о критической частоте слоя $F2$ ионосферы $foF2$ привел к выводу, что применение наиболее часто используемого индекса солнечной актив-

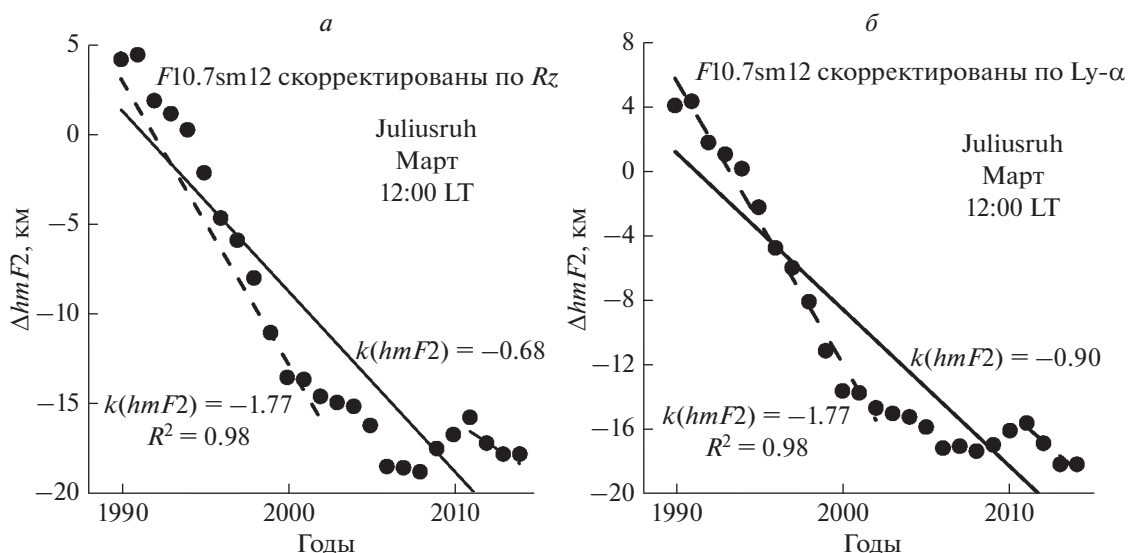


Рис. 10. Изменение $\Delta hmF2$ со временем (март, 12:00 LT) при корректировке индекса $F10.7sm12$ индексами Rz и $Ly-\alpha$.

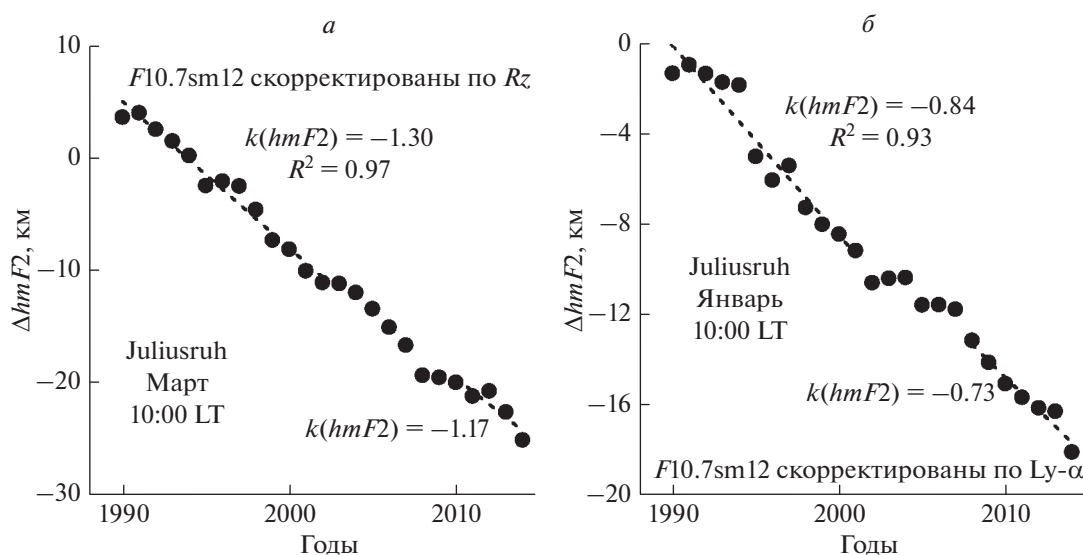


Рис. 11. Изменение $\Delta hmF2$ со временем при корректировке индекса $F10.7sm12$ индексами Rz (а, (март, 10:00 LT) и $Ly-\alpha$ (б, январь, 10:00 LT).

ности $F10.7$ 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 долгосрочным изменениям и трендам в атмосфере [Laštovička, 2018]).

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, 2020; Laštovička, 2016]). Наиболее четко эта проблема

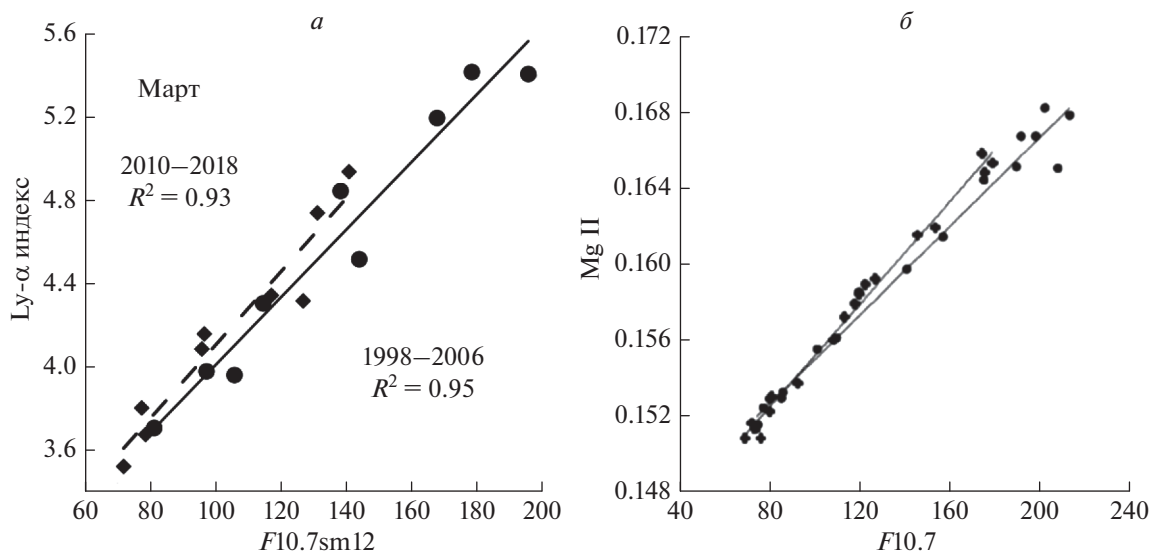


Рис. 12. Связь между индексами солнечной активности: (а) Ly- α и $F10.7sm12$ согласно авторам и (б) Mg II и $F10.7$ согласно Laštovička [2019]. Ромбы и кружки соответствуют более поздним и более ранним периодам (см. текст).

сформулирована в недавней работе De Naro Barbas and Elias [2020]. 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 Naro Barbas and Elias [2020] 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).

Прекрасный пример того, как ведут себя два типа индексов СА, опубликованный независимо двумя группами авторов, приведен на рис. 12. На рисунке 12а приведено сравнение между индексами солнечного EUV (Ly- α) и $F10.7$ в более ранний период и в 24-м цикле СА. Он с целью наглядности повторяет наш рис. 3а, приведенный в параграфе 2. На рисунке 12б 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.

Исходя из предположения о нарушении связи между $F10.7$ и солнечным EUV в 24-м цикле, 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- α (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 величин $\Delta foF2$ и $\Delta hmF2$ после 2003–2004 гг. Характер получаемых зависимостей подробно описан и проиллюстрирован в предыдущих параграфах. Получено, что эффект “смутного периода” между 2002–2003 и 2007–2008 гг. проявляется в поведении и критической частоты, и высоты слоя $F2$. Для обоих параметров наблюдается хорошо выраженный отрицательный тренд с высокой статистической значимостью до 2002–2003 гг., а затем на несколько лет этот ход нарушается и наблюдается хаотический характер поведения $\Delta foF2$ и $\Delta hmF2$ со временем. При сглаживании величин $\Delta foF2$ и $\Delta hmF2$, которое мы применяем в нашем методе, этот характер начинает проявляться как раз около 2003–2004 гг. Влияние данных после 2010 г. приводит к восстановлению “нормального” падения $\Delta foF2$ и $\Delta hmF2$, начиная с 2007–2009 гг. Для $foF2$ это восстановление выражено лучше, чем для $hmF2$.

Мы считаем, что хаотический характер поведения $foF2$ во время “смутного периода” связан со спецификой очень низкого минимума солнечной активности 2008–2009 гг. На эту специфику обращали внимание многие исследователи (соответствующие ссылки приведены в предыдущих па-

раграфах). Предполагается, что это связано с особенностями поведения EUV в период 23/24 минимума. Полученные нами результаты по поведению $foF2$ и $hmF2$ в “смутный период” косвенно подтверждают это предположение. Тот факт, что хаотичный характер изменения в течение этого периода для $\Delta foF2$ выражен сильнее, чем для $\Delta hmF2$, соответствует тому факту, что критическая частота прямо зависит от EUV (через скорость ионизации), тогда как высота слоя зависит опосредованно через вызванное изменением EUV изменение температуры термосферы. В этом случае более слабая реакция $hmF2$ на особенности поведения EUV в течение “смутного периода” вполне понятна.

5. 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 CA.

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 $foF2$ и $hmF2$.

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

Важным выводом настоящего исследования является то, что индекс CA $F10.7$ не годится для описания поведения параметров ионосферного слоя $F2$ и, возможно, других ионосферных параметров в период 24-го цикла CA. Насколько восстановится “нормальная” связь этого индекса с $foF2$ и $hmF2$ в 25-м цикле, можно будет сказать лишь через 5–6 лет.

Важным является также и заключение о том, что при корректировке индекса $F10.7$ с помощью других индексов CA, более тесно связанных с изменением солнечного ультрафиолета, после “смутного периода” продолжают отрицательные тренды как $foF2$, так и $hmF2$.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Данные о медианах критической частоты $foF2$ взяты из банка данных Дамбольдта и Суэсмана [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- α были взяты с сайта (<http://lasp.colorado.edu>).

Авторы выражают благодарность К.Г. Цыбуле за помощь в получении данных по $foF2$ и $hmF2$ для ст. Boulder.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д., Константинова А.В. Поведение параметров ионосферного слоя $F2$ на грани веков. 1. Критическая частота // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 3. С. 361–372. 2013.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Вариации трендов $foF2$ сезоном и временем суток // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 55. № 1. С. 56–63. 2015.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Тренды критической частоты $foF2$ после 2009 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 56. № 3. С. 324–332. 2016.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 4. С. 411–435. 2020.
- 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. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA016301>
- Chen Y., Libo L., Le H., Wan W. How does ionospheric TEC vary if solar EUV irradiance continuously decreases? // Earth Planets Space. V. 66. 2014. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-52>
- 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.
- Bilitza D. International Reference Ionosphere 1990. National Space Science Data Center, NSSDC 90–92, Greenbelt, Maryland, 1990.
- 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. 2015. <https://doi.org/10.1002/2014JA020971>
- 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.
- Emmert J.T., Lean J.L., Picone J.M. Record-low thermospheric density during the 2008 solar minimum // Geophys. Res. Lett. V. 37. L12102. 2010. <https://doi.org/10.1029/2010GL043671>
- 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.* A review of progress in trends in the mesosphere-thermosphere-ionosphere system // Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere, Hefei, China, May 14–18, 2018.

– *Laštovička J.* Is the relation between ionospheric parameters and solar proxies stable? // *Geophys. Res. Letters*. V. 46. № 24. P. 14208–14213. 2019.

<https://doi.org/10.1029/2019GL085033>

– *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. № 5. P. 1255–1268. 2008.

– *Shimazaki T.* World wide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric F2 layer // *J. Radio Res. Labs. (Japan)*. V. 2. P. 85–97. 1955.

– *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.* V. 116. A00H07. 2011.

<https://doi.org/10.1029/2011JA016508>

– *Solomon S.C., Qian L., Burns A.G.* The anomalous ionosphere between solar cycles 23 and 24 // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 118. P. 6524–6535. 2013.