



УДК 550.388.2

ДАЛЬНЕЙШИЙ АНАЛИЗ ТРЕНДОВ $foF2$ ДО 2022 Г.А. Д. Данилов¹, А. В. Константинова¹¹Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

Продолжен анализ поведения критической частоты слоя $F2$, $foF2$ в текущем столетии по данным ст. Juliusruh и Boulder, начатый в предыдущих работах авторов. К данным до 2018 г., рассмотренным в прошлых публикациях, добавлены данные за 2019–2022 гг. Для исключения эффекта солнечной активности используется несколько индексов SA. Получено, что новые точки очень хорошо ложатся на графики предыдущих публикаций и подтверждают приведенные там основные выводы. Прежде всего, подтверждается вывод о наличии сезонных и суточных вариаций анализируемых трендов. Получено также указание на то, что в течение последнего десятилетия амплитуда отрицательных трендов возросла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: солнечная активность, ионосферный слой $F2$, долговременные тренды.

DOI 10.5425/2304-7380_2023_37_6

<https://elibrary.ru/hsbrtc>**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 к обзору авторов [Данилов и Константинова, 2020а].

В серии работ авторов [Данилов и Константинова, 2019; 2020б; Danilov and Konstantinova 2020a, b] были 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 (СА), $F10.7$, не описывает правильно изменение солнечного ультрафиолетового излучения EUV, ответственного за образование большей части ионосферы. Мы использовали версию этого индекса $F10.7sm12$, предложенную Bilitza [1990] и использованную в международной справочной модели IRI. Оказалось, что при коррекции этого индекса двумя другими индексами солнечной активности (число солнечных пятен Rz и интенсивность линии Ly- α), 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.

Электронная почта автора для переписки:

Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: adanilov99@mail.ru
Константинова Анна Владимировна, e-mail: anna@tabulata.ru<https://elibrary.ru/hsbrtc>Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

Многие исследователи обращали внимание на необычное поведение индекса солнечной активности $F10.7$ в течение минимума 23/24 и 24-го цикла СА (см., например, [Chen et al., 2011; 2018; De Haro Barbas and Elias, 2020; Laštovička, 2016; 2019]). Laštovička [2016; 2021a, b] указывал на проблемы, связанные с правильным учетом солнечной активности при определении 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 работах De Haro Barbas and Elias [2020] и De Haro Barbas et al. [2020]. Авторы этих работ анализировали тренды $foF2$ как в дневные, так и в ночные 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 магнитуа отрицательных трендов, либо они даже превращаются в положительные.

В работе Данилова и Константиновой [2020в] к индексам $Ly-\alpha$ и R_z был добавлен еще один индекс солнечной активности $MgII$ (отношение интенсивности в центре линии $MgII$ в солнечном спектре к ее интенсивности в крыльях) для корректировки индекса $F10.7$ в 24-м цикле СА.

Целью настоящей работы является дальнейший анализ трендов $foF2$ по данным станций Juliusruh и Boulder, используя величины $foF2$ для 2019-2022 гг. (январь-март и июнь) и 2019-2021 гг. (октябрь). Для большей наглядности мы будем добавлять четыре точки для указанных лет на рисунки с результатами расчетов до 2018 г.

2. ТРЕНДЫ $foF2$ ПО ДАННЫМ СТАНЦИИ JULIUSRH

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 СА и в 24-м цикле СА, 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 число солнечных пятен R_z , интенсивность линии Ly -альфа и индекс $MgII$ (см. выше). Эта же корректировка использована и в расчетах, приведенных ниже. Кроме того, добавлена корректировка еще одним индексом СА, $F30$. Это – среднемесячное значение потока солнечного радиоизлучения с длиной волны 30 см. Как и в работе Данилова и Константиновой (2020в), для корректировки $F10.7$ по указанным индексам была использована связь $F10.7$ с этими индексами в 22-м и 23-м циклах СА.

Мы провели анализ для четырех месяцев и пяти моментов LT. Первоначально в серии наших публикаций мы анализировали только три месяца (январь, февраль и март) и три момента LT (1000, 1200 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. Однако для полноты рассмотрения мы добавили анализ трендов в июне и октябре и в ночные часы (2000 LT и в 0400 LT в зимние месяцы и 2400 LT в июне).

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 $foF2$ при фиксированном индексе СА в «эталонный период» 1958-1980 гг. и в рассматриваемый момент времени. Поскольку в описанном методе используется 11-летнее сглаживание исходных величин $\Delta foF2$, уместно заметить следующее. Сглаживание не вносит принципиальных изменений в анализируемую зависимость (в данном случае величин $\Delta foF2$ от года), но подчеркивает эту зависимость, т.е. обеспечивает более высокие значения ее статистической значимости.

Примеры получаемых результатов для каждого месяца приведены на рис. 1-4. Четыре новых точки показаны красным цветом. Поскольку мы используем 11-и летнее сглаживание, точки, полученные в данном анализе, все еще относятся к 24-му циклу СА.

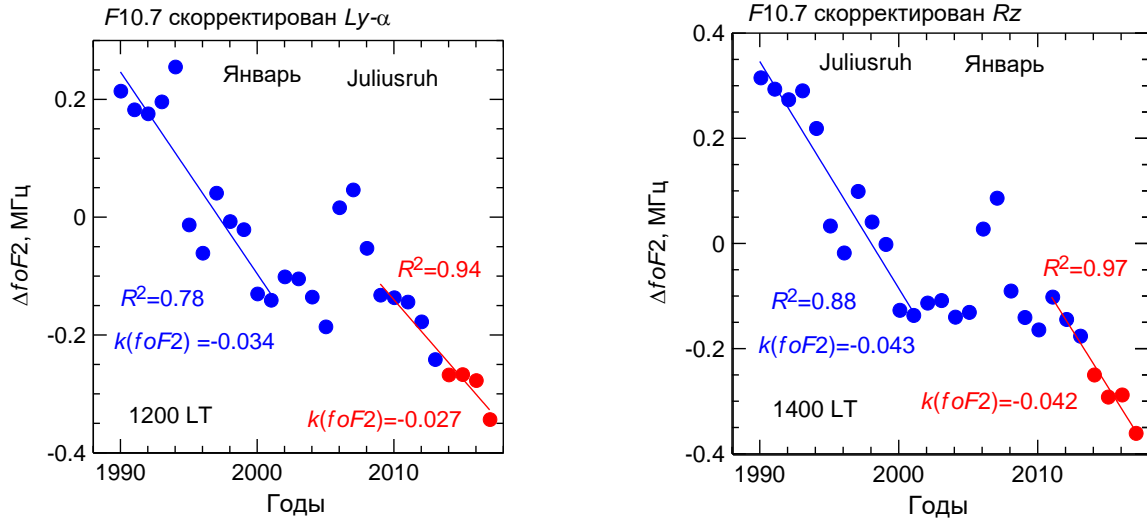


Рис. 1. Примеры трендов для января

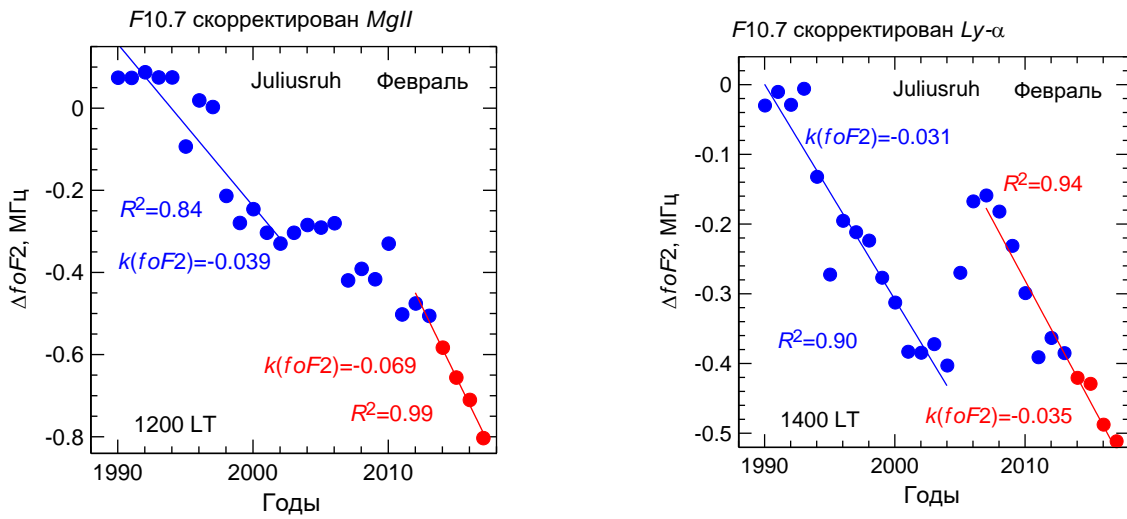


Рис. 2. Примеры трендов для февраля

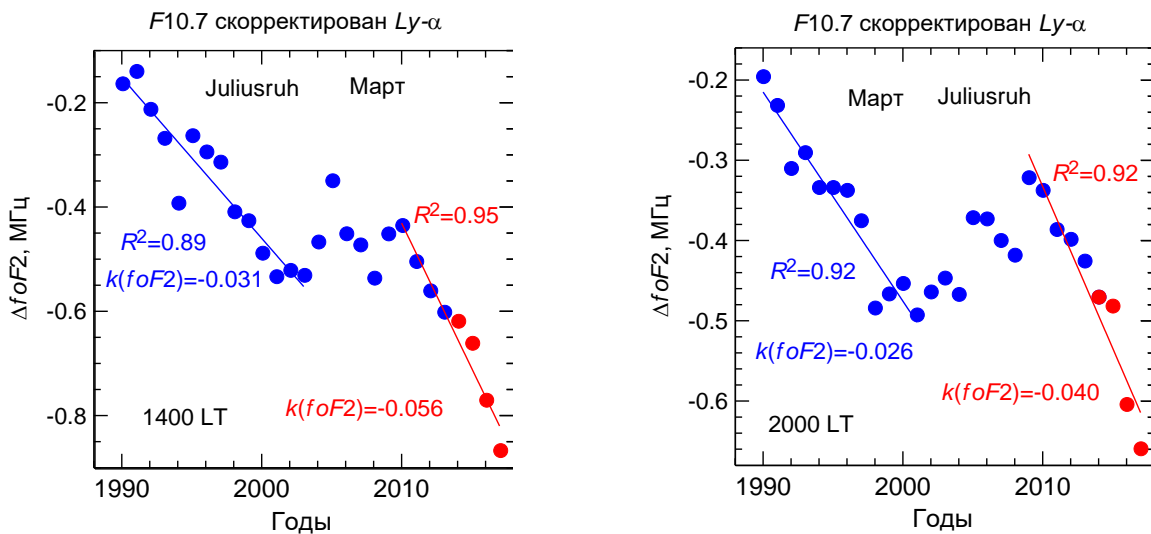


Рис. 3. Примеры трендов для марта

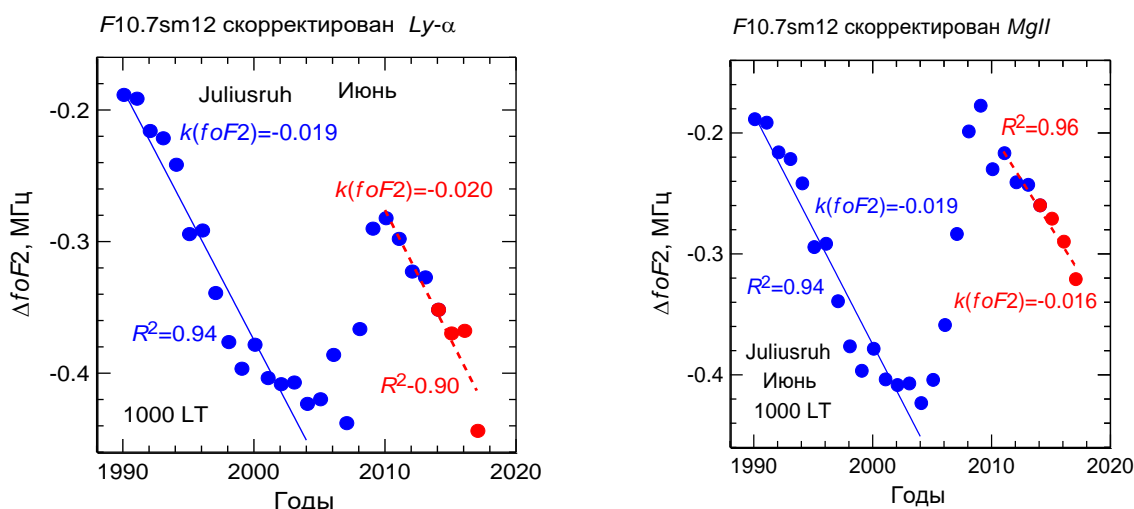


Рис. 4. Примеры трендов для июня

Таблица 1. Величины $k(foF2)$, МГц и R^2 для января-марта и июня (ст. Juliusruh).

LT	Прошлый	Новый		Прошлый	Новый		Прошлый	Новый		Новый	
		<i>Ly</i>		<i>Rz</i>		<i>Mg II</i>		<i>F30</i>			
Январь											
10	-0.029	-0.026	0.97	-0.058	-0.033	0.73	-0.012	-0.020	0.76	-0.028	0.91
12	-0.027	-0.027	0.94	-0.032	-0.032	0.87	-0.034	-0.028	0.81	-0.034	0.85
14	-0.023	-0.021	0.90	-0.035	-0.042	0.97	-0.025	-0.036	0.81	-0.030	0.95
04	-0.023	-0.026	0.94	-0.030	-0.027	0.95	-0.025	-0.025	0.93	-0.022	0.85
20	Противоречия данных по <i>foF2</i>										
Февраль											
10	-0.009	-0.029	0.79	-0.072	-0.042	0.99	-0.045	-0.044	0.92	-0.039	0.95
12	-0.052	-0.047	0.94	-0.043	-0.068	0.99	-0.073	-0.069	0.99	-0.047	0.95
14	-0.040	-0.035	0.94	-0.040	-0.047	0.94	-0.064	-0.055	0.94	-0.063	0.98
04	-0.020	-0.025	0.81	-0.012	-0.019	0.74	-0.021	-0.033	0.88	-0.014	0.80
20	-0.026	-0.027	0.97	-0.036	-0.047	0.93	-0.035	-0.035	0.96	-0.033	0.97
Март											
10	-0.045	-0.051	0.93	-0.042	-0.049	0.92	-0.032	-0.034	0.88	-0.048	0.78
12	-0.029	-0.044	0.89	-0.085	-0.072	0.94	-0.009	-0.026	0.72	-0.047	0.74
14	-0.040	-0.056	0.98	-0.072	-0.069	0.97	-0.017	-0.038	0.88	-0.055	0.97
04	-0.026	-0.024	0.82	-0.022	-0.027	0.87	-0.011	-0.021	0.76	-0.019	0.86
20	-0.029	-0.043	0.92	-0.051	-0.053	0.97	-0.018	-0.027	0.94	-0.034	0.96
Июнь											
10	-0.011	-0.017	0.88	-0.014	-0.007	0.71	-0.011	-0.017	0.85	-0.007	0.68
12	-0.013	-0.022	0.98	-0.014	-0.013	0.81	-0.011	-0.020	0.90	-0.006	0.68
14	-0.020	-0.019	0.97	-0.019	-0.009	0.87	-0.009	-0.018	0.87	-0.003	0.18
24		-0.033	0.92		-0.021	0.94		-0.018	0.95	-0.013	0.63

Рисунки 1-4 иллюстрируют картину, которая уже подробно обсуждалась в наших предыдущих публикациях: 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 $foF2$. Как видно из приведенных рисунков, новые точки хорошо (а иногда даже отлично) ложатся на продолжение трендов после «смутного» периода, полученных ранее.

Все результаты определения $k(foF2)$ для станции Juliusruh для 4-х месяцев приведены в табл. 1. В таблице для корректировки $F10.7$ каждым из указанных выше индексов для каждого месяца и каждого момента LT приводятся величины тренда по данным до 2018 г. («Прошлый») и по данным до 2022 г. («Новый»). Кроме того, для «нового» тренда приведена также величина R^2 . Поскольку индекс

$F30$ не рассматривался в предыдущей публикации, для корректировки этим индексом приведена только величина «Новый». Все тренды приведены в единицах МГц в год.

Как видно из таблицы 1, получаемые в результате добавления новых точек тренды хорошо согласуются по величине с «прошлыми» трендами. Случаи, где эти новые тренды больше, чем на 0.003 МГц, меньше «прошлых» выделены в таблице. Видно, что статистика такова: 2 случая уменьшения тренда в январе, 4 в феврале, 1 в марте и 2 в июне. Итого 9 случаев из 57. Таким образом, для большей части случаев новые тренды равны, или выше «прошлых». Это важно, поскольку является подтверждением правильности предложенного нами подхода к анализу зависимости $foF2$ от CA . Косвенным подтверждением правильности этого подхода является и тот факт, что днем в зимние месяцы, когда тренд определяется наиболее надежно, величина R^2 всего в 4 случаях из 36 меньше 0.80 и в 24 случаях больше 0.90. Иначе говоря, «новые» тренды обладают высокой статистической значимостью.

Результаты, приведенные в таблице 1, подтверждают вывод, полученный нами ранее, что в период высоких отрицательных трендов в сезонном ходе $k(foF2)$ (январь-март) тренды в 0400 LT и 2000 LT также достаточно хорошо выражены и статистически значимы. В подавляющем большинстве случаев они меньше по амплитуде, чем в дневные часы, что вполне согласуется с суточным ходом $k(foF2)$, полученным ранее (см. Данилов и Константинова, [2015]).

Важен вопрос о том, насколько «новые» тренды для одной и той же ситуации (месяц, LT), получаемые при корректировке $F10.7$ каждым из трех других индексов CA ($Ly-\alpha$, Rz , $MgII$ и $F30$) согласуются между собой. В целом мы считаем согласие хорошим.

Таблица 2. Те же «новые» величины $k(foF2)$, что и в таблице 1, и результаты усреднения.

LT	$Ly-\alpha$	Rz	$Mg II$	$F30$	Средне и SD		Средне и SD	
По 4 индексам без RZ								
Январь								
10	-0.026	-0.033	-0.020	-0.028	-0.027	(0.005)	-0.025	(0.004)
12	-0.027	-0.032	-0.028	-0.034	-0.033	(0.003)	-0.030	(0.004)
14	-0.021	-0.042	-0.036	-0.030	-0.032	(0.009)	-0.029	(0.008)
04	-0.026	-0.027	-0.025	-0.022	-0.025	(0.002)	-0.024	(0.002)
20								
Противоречия данных по $foF2$								
Февраль								
10	-0.029	-0.042	-0.044	-0.039	-0.039	(0.007)	-0.037	(0.008)
12	-0.047	-0.068	-0.069	-0.063	-0.062	(0.010)	-0.060	(0.011)
14	-0.035	-0.047	-0.055	-0.063	-0.050	(0.012)	-0.051	(0.014)
04	-0.025	-0.019	-0.033	-0.014	-0.023	(0.008)	-0.024	(0.010)
20	-0.027	-0.047	-0.035	-0.033	-0.036	(0.008)	-0.032	(0.004)
Март								
10	-0.051	-0.049	-0.034	-0.048	-0.046	(0.008)	-0.044	(0.009)
12	-0.044	-0.072	-0.028	-0.047	-0.048	(0.018)	-0.040	(0.010)
14	-0.056	-0.069	-0.038	-0.055	-0.055	(0.013)	-0.050	(0.010)
04	-0.024	-0.027	-0.021	-0.019	-0.023	(0.004)	-0.021	(0.003)
20	-0.043	-0.053	-0.027	-0.034	-0.039	(0.011)	-0.035	(0.008)
Июнь								
10	-0.014	-0.007	-0.013	-0.004	-0.010	(0.005)	-0.010	(0.006)
12	-0.020	-0.013	-0.017	-0.004	-0.014	(0.007)	-0.014	(0.009)
14	-0.019	-0.009	-0.016	-0.003	-0.012	(0.007)	-0.013	(0.009)
24	-0.026	-0.021	-0.018	-0.013	-0.020	(0.005)	-0.019	(0.007)

Для более подробного обсуждения этого вопроса приводится таблица 2. В ней даны те же величины «новых» трендов, что и в таблице 1. Кроме того, приведены результаты усреднения трендов для каждой ситуации по всем четырем индексам CA и получаемое при этом среднеквадратическое отклонение SD . Если рассматривать в таблице 2 только дневные часы в январе-марте (когда тренды максимальны по амплитуде и определяются наиболее надежно), то из 9 ситуаций, только в одной (март 1200 LT) разброс трендов, получаемых при корректировке $F10.7$ разными индексами, превышает

фактор два. Даже в июне, когда тренды (в соответствии с сезонным ходом, полученным нами ранее) меньше, чем в зимние месяцы, наблюдается очень хорошее согласие при корректировке разными индексами. Обращает на себя внимание тот факт, что наилучшее взаимное согласие получаемых величин $k(foF2)$ наблюдается при корректировке индексами $Ly-\alpha$ и $MgII$. Это как раз то, что и следовало ожидать, поскольку оба этих индекса наиболее тесно связаны с EUV, контролирующим поведение ионосферы. Однако, очень близки и величины $k(foF2)$, получаемые при корректировке индексом $F30$. В то же время, индексы, полученные при корректировке числом солнечных пятен Rz , во многих случаях заметно отличаются от величин для трех других индексов (см., например, 1200 и 1400 LT в марте). Мы вернемся к этому вопросу ниже.

Результаты расчетов для октября представлены в табл. 3 несколько в ином виде, чем в таблицах 1 и 2. Дело в том, что при анализе данных до 2018 гг. для октября получалось мало точек после «смутного» периода, поэтому и величина R^2 была невелика. При добавлении точек за 2019-2021 гг. эта величина заметно выросла, что и показывают данные в табл. 3. Это является, на наш взгляд, важным фактом в поддержку правильности нашей концепции.

Таблица 3. Величины $k(foF2)$ и R^2 для октября (ст. Juliusruh)

Коррекция индексом $Ly-\alpha$						
	1000 LT		1200 LT		1400 LT	
	Прош.	Нов.	Прош.	Нов.	Прош.	Нов.
$k(foF2)$	-0.034	-0.039	-0.007	-0.017	-0.005	-0.016
R^2	0.76	0.91	0.11	0.70	0.13	0.51
Коррекция индексом Rz						
$k(foF2)$	-0.032	-0.035	-0.010	-0.071	-0.003	-0.016
R^2	0.79	0.93	0.31	0.50	0.01	0.70
Коррекция индексом $MgII$						
$k(foF2)$	-0.044	-0.058	-0.030	-0.026	-0.022	-0.029
R^2	0.78	0.96	0.65	0.82	0.69	0.89
Коррекция индексом $F30mon$						
$k(foF2)$	–	-0.050	–	-0.021	–	-0.030
R^2	–	0.95	–	0.87	–	0.83

Как и в табл.1, мы маркировали случай, когда «новый» тренд оказался меньше «прошлого». Такой случай в табл. 3 оказался только один. В остальных 8 случаях «новые» тренды оказались (иногда – очень существенно) выше «прошлых». Это – еще один важный факт в подтверждение правильности нашей концепции выделения трендов $foF2$ в период 24-го цикла СА. Это согласуется также с полученным выше соотношением между «прошлыми» и «новыми» трендами.

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. 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.

Так же, как и в таблице 1, в таблице 4 выделены случаи, когда «новые» тренды оказались меньше «предыдущих». Таких случаев всего 8 из 27. В остальных случаях величины $k(foF2)$ при добавлении точек за 2019-2022 гг. либо остались неизменными (2 случая), либо выросли. Таким образом, можно утверждать, что в среднем, так же, как и в случае Juliusruh, «новые» тренды выше предыдущих.

Основной вывод, который следует из рассмотрения таблицы 4, таков же, как и из рассмотрения таблицы 1. Он состоит в том, что использование индекса $F10.7$, скорректированного для 24-го цикла СА по другим индексам ($Ly-\alpha$, Rz , $MgII$ и $F30$) для всех рассмотренных ситуаций приводит к отрицательным трендам $foF2$ после «смутного периода». Эти тренды хорошо выражены и статистически значимы (высокие величины R^2) и в большинстве случаев их магнитуды больше, чем

магнитуды соответствующих «прошлых» трендов. Соответствующие примеры приведены на рис. 5 и 6.

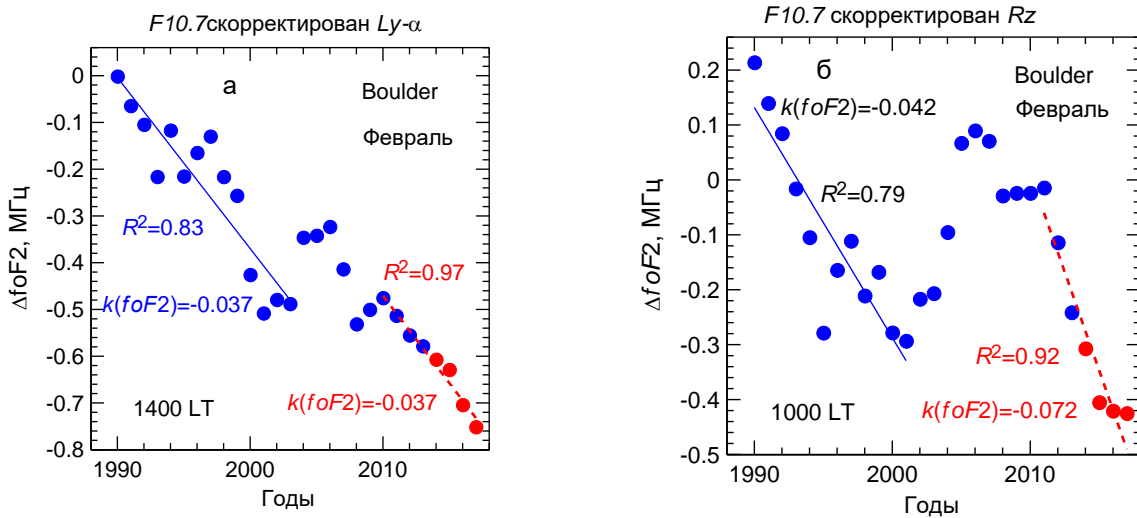


Рис. 5. Примеры изменения $\Delta foF2$ от времени для ст. Boulder в феврале

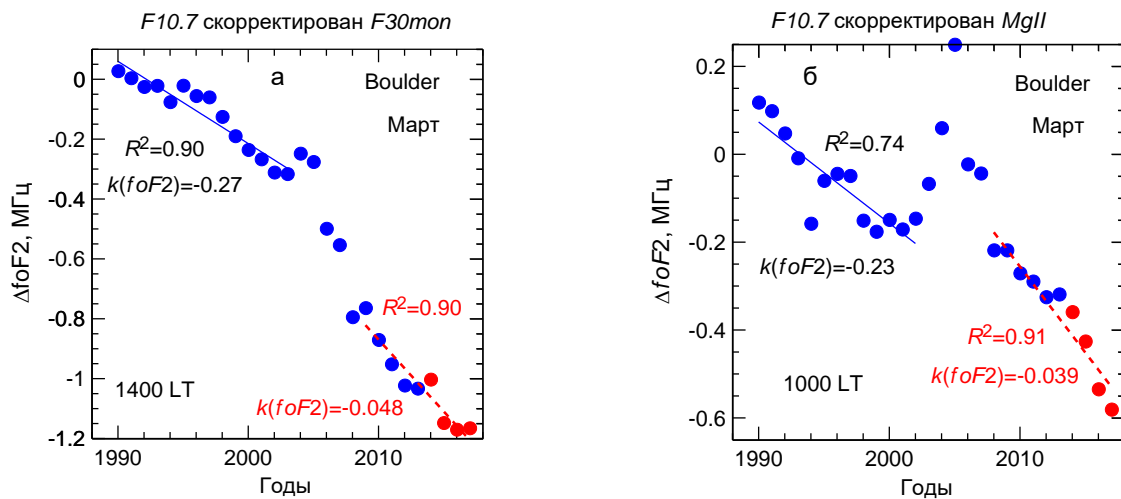


Рис. 6. Примеры изменения $\Delta foF2$ от времени для ст. Boulder в марте

Разброс величин $k(foF2)$, получаемых для одной и той же ситуации, но с использованием разных индексов СА, для данных ст. Boulder несколько выше, чем для данных ст. Juliusruh. Это связано с тем, что в ряде случаев при корректировке числом солнечных пятен для ст. Boulder получаются тренды, отличающиеся от величин, получаемых с помощью трех других индексов. Наилучшее взаимное согласие получается, как и в случае ст. Juliusruh, при корректировке индексами $Ly-\alpha$ и $MgII$, а $F30$ уступает им лишь немного. Этот вывод практически согласуется с выводом серии работ J. Lastovicka (см. ниже) о том, что лучшими индексами СА (SA proxies) для поиска трендов $foF2$ являются $MgII$ и $F30$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует сделать несколько замечаний, касающихся характера полученных результатов по обеим станциям. Напомним, что мы нанесли на рисунки, построенные ранее с использованием данных до 2018 г., точки, полученные с данными до 2022 г. Для всех ситуаций (месяц, момент LT) мы получили продолжение тренда, который уже был виден, или намечался, по предыдущим данным. Во всех случаях

подтвердился вывод о том, что после «смутного периода» для всех ситуаций наблюдаются значимые отрицательные тренды.

Длительность «смутного периода» несколько различна для разных ситуаций. Период начинается в 2002–2004 гг. А систематическое падение $\Delta foF2$ начинается в 2008–2010 гг. Более подробный анализ поведения $\Delta foF2$ до 2010 г., включая «смутный период» можно найти в предыдущей публикации [Данилов и Константинова, 2020 б,в].

Не смотря на описанные сложности анализа поведения критической частоты в новом столетии, мы считаем, что новые результаты подтверждают вывод полученный в серии наших публикаций [Данилов и Константинова, 2019; 2020 б, в; 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 четырех индексов СА для корректировки индекса $F10.7$ в течение минимума 23/24 и 24-го цикла СА дает результаты, как качественно, так и количественно, согласующиеся между собой. При этом наилучшее взаимное согласие получается, если для корректировки используются индексы $Ly-\alpha$ и $MgII$.

Обращает на себя внимание и принципиально новый результат. Как следует из таблиц 1 и 4, для обеих станций «новые» отрицательные тренды в большинстве случаев выше «прошлых». Это наводит на предположение, что в течение последнего десятилетия происходит усиление отрицательных трендов $foF2$. Насколько такое предположение справедливо, станет ясно в течение следующих 4-5 лет.

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 $F10.7$ 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 et al. 2020; De Haro Barbas and Elias, 2020; Laštovička, 2016; 2019]). Фактически De Haro Barbas et al. [2020] and De Haro Barbas and Elias [2020] пришли к тому же выводу, что и мы [Данилов и Константинова, 2020б]: 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 групп авторов, был дан на рис 12 в работе Данилова и Константиновой [2020б]. На этом рисунке приведено сравнение между индексами солнечного EUV ($Ly-\alpha$) 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 ($MgII$) 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.

Наше заключение о том, что в 24-м цикле СА индекс $F10.7$ не годится для поиска трендов $foF2$ и его необходимо корректировать другими индексами СА согласуется с выводами других авторов. Так, Lean et al. [2011] рекомендовали использовать $MgII$ вместо $F10.7$ для анализа ТЕС в период глубокого минимума СА 2008–2009 гг., а Perna and Pezzopane [2016] рекомендовали использовать, $MgII$ а не $F10.7$ при поиске трендов $foF2$ по данным станции Rome.

В серии недавних публикаций [Lastovicka 2020, 2021a, b; Lastovicka and Buresova, 2022; Sivakandan et al. 2022] подробно обсуждается вопрос о том, какие индексы СА дают наилучшие результаты при поиске трендов $foF2$ и foE . Анализировались данные ВЗ на сети европейских станций. Было получено [Lastovicka 2020, 2021a], что для поиска трендов $foF2$ наилучшим индексом является $MgII$, а затем следуют $Ly-\alpha$ и $F10.7$. В более поздней работе [Lastovicka, 2021b] для описания поведения $foF2$ рекомендуются индексы $MgII$ и $F30$, причем подчеркивается, что именно они должны использоваться для анализа периодов глубоких солнечных минимумов 2008–2009 и 2018–2019 гг. Этот вывод подтвержден и в недавней публикации [Lastovicka and Buresova, 2022].

Анализируя среднегодовые величины $foF2$ по измерениям на ст. Pruhonice, Lastovicka [2021a] получил, что при использовании наилучших индексов СА удастся описать большую часть (~90%) вариаций критической частоты, т.е. тренды $foF2$ достаточно малы. Это не противоречит нашим

результатам, поскольку при усреднении по всем месяцам года и всем моментам ЛТ как раз и должен получаться практически нулевой тренд. Наши результаты относятся, прежде всего, к периодам суток и года, когда эти тренды максимальны по амплитуде. Мы считаем, что именно наиболее сильные тренды представляют интерес как с точки зрения изучения процессов в ионосфере термосфере, так и в прикладном аспекте.

ЛИТЕРАТУРА

- 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. 619–630. 2020б.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Дальнейший анализ трендов $foF2$ до 2018-2019 гг. // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 27. С. 46-54. 2020в
- Balan, N., Bailey, G., Moffett, R. Modeling studies of ionospheric variations during an intense solar cycle. // J. Geophys. Res. V. 99. No. A9. P. 17,467–17,475. 1994. <https://doi.org/10.1029/94JA01262>
- Balough, A., Hudson, H.S., Petrovary, K., von Steiger, R. Introduction to the solar cycle: Overview of causes and consequences // Space Sci. Rev. V. 186. No. 1-4. P. 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.
- 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>. 2020а
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Trends in $hmF2$ and the 24th solar activity cycle // Adv. Space Research V. 66. P. 292-298. 2020б.
- 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. V. 177. P. 1071–1078. 2020.
- De Haro Barbás D.F., Elias A.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 2020.
- Elias, A. G. Trends in the F2 ionospheric layer due to long-term variations in the Earth’s magnetic field, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 71, 1602-1609, 489 doi:10.1016/j.jastp.2009.05.014. 2009.
- 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.* What is the optimum solar proxy for long-term ionospheric investigations? // *Adv. Space Res.* V. 67. P. 2–8. 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.07.025>
- *Laštovička J.* The best solar activity proxy for long-term ionospheric investigations // *Adv. Space Res.* V. 68. P. 2354–2360. 2021b.
- *Laštovička J., Buresova D.* What is happening with the Sun – and ionospheric impact? // A preprint. 2022.
- *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*, V. 757. No. 1, P. L8. 2012. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/757/1/L8>
- *Sivakandan M., J. Mielich J., Renkwitz T., Chau J. L., Jaen J., and Lastovicka J.* // Long-term variations and trends in the E, F and sporadic E (Es) layer over Juliusruh, Europe. *Space Weather 2022* (presented).
- *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. doi:10.1029/2011JA016508. 2011.
- *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.
- *Yue, X., Liu L., Wan W., Wei Y., Ren Z.* Modeling the effects of secular variation of geomagnetic field orientation on the ionospheric long-term trend over the past century, *J. Geophys. Res.*, 113, A10301, doi:10.1029/2007JA012995.566, 2008.

FURTHER ANALYSIS OF THE *foF2* TRENDS TO 2022

Danilov A.D., Konstantinova A.V.

The analysis of the behavior of the *F2*-layer critical frequency, *foF2*, in the current century based on the Juliusruh and Boulder data which has been started in the previous publications of the authors is continued. The data for 2019–2022 are added to the data to 2018 considered in the previous publications. Several indices of solar activity are used to get rid of its effects on *foF2*. It is obtained that the new points agree well with the graphs of the previous publications and confirm the main conclusions presented there. First of all, the conclusion on the existence of seasonal and diurnal variations of the analyzed trends is confirmed. An indication is also found to the fact that the amplitude of the negative trends increased during the recent decade.

KEYWORDS: SOLAR ACTIVITY, IONOSPHERIC LAYER F2, LONG-TERM TRENDS