



УДК 550.388.2

АНАЛИЗ ТРЕНДОВ $foF2$ ДО 2022 Г. С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНЫХ ИНДЕКСОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А. Д. Данилов¹, А. В. Константинова¹, Н. А. Бербенева²¹Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова, Москва, Россия²Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Тренды критической частоты слоя F2 $foF2$ анализируются на основании наблюдений на ст. Juliusruh до 2022 г. Для удаления эффектов солнечной активности используются пять индексов СА: $Ly-\alpha$, $MgII$, Rz , $F10.7\text{mop}$ и $F30$. Найдено, что с использованием всех пяти индексов подтверждаются полученные ранее выводы о суточных (днем сильнее, чем ночью) и сезонных (зимой сильнее, чем летом) вариаций амплитуды отрицательных трендов $foF2$, $k(foF2)$. Максимальные отрицательные величины $k(foF2)$ составляют 0.03-0.04 МГц/год в околополуденные часы в зимние месяцы. Использование метода «Дельта» подтверждает эти выводы. Обнаружено, что отрицательные тренды $foF2$ в последнее десятилетие сильнее, чем для всего рассмотренного периода 1996-2022 гг.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРНЫЙ СЛОЙ F2, ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ, ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

DOI 10.5425/2304-7380_2022_37_42

<https://elibrary.ru/mupcnc>

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долгосрочных трендов параметров ионосферы и, особенно, критической частоты слоя F2, $foF2$, хорошо известна и ей посвящено много работ. Обсуждение проблемы и соответствующие ссылки можно найти в обзорной работе Данилова и Константиновой [2020], а также в обзорных докладах Ластовичка на Симпозиумах по трендам [Laštovička, 2018; 2022a].

При поисках трендов $foF2$ очень большую роль играет правильный выбор индексов солнечной активности (СА), которые используются для того, чтобы удалить зависимость $foF2$ от СА и получить «чистое» изменение со временем, которое позволит найти искомые тренды $k(foF2)$. Проблема выбора лучших индексов СА (proxies) для поиска трендов ионосферных параметров достаточно сложна и обсуждалась многими исследователями. Отметим здесь лишь работы аргентинской группы [De Haro Barbas and Elias, 2020; De Haro Barbas et al., 2020, 2021] и три недавних публикации Laštovička [2021a, b; 2022b]. В последних публикациях, а также в работе Sivakandan et al. [2022], рассматривалось использование нескольких индексов СА для выделения трендов критических частот слоев E и F2. Мы вернемся к результатам этих работ ниже.

Электронная почта автора для переписки:
Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: adanilov99@mail.ru
Константинова Анна Владимировна, e-mail: anna@tabulata.ru

<https://elibrary.ru/mupcnc>

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

Высокая чувствительность получаемых трендов $foF2$ к выбору используемого индекса солнечной активности была подчеркнута в работах Danilov and Konstantinova [2020] и Danilov [2021]. Было показано, что использование индекса $F10.7sm12$, вычисляемого определенным образом, как это сделано в модели IRI [Bilitza, 1990], хорошо описывают поведение $foF2$ со временем в предыдущие циклы, но в 24-м цикле CA приводит к нереальным результатам. Была проведена корректировка этого индекса другими индексами CA ($Ly-\alpha$, Rz и $MgII$) и предложены «правильные» величины $F10.7sm12$ для нахождения трендов ионосферных параметров в 24-м цикле.

В данной работе мы возвращаемся к проблеме определения трендов $foF2$ в течение последних двух десятилетий при использовании различных индексов CA.

2. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПОИСКУ ТРЕНДОВ $foF2$

Большинство исследователей (см., например, Laštovička [2021a, b, 2022b], Sivakandan et al., [2022], De Haro Barbas and Elias [2020], De Haro Barbas et al. [2020]) для поиска трендов анализируют отклонение $foF2$, полученное по некоторой модели, $foF2$ (мод), от реально наблюдаемых величин $foF2$ (наб) в рассматриваемый период:

$$\Delta foF2 = foF2(\text{наб}) - foF2(\text{мод}).$$

Очень важен вопрос о том, что берется в качестве $foF2(\text{мод})$. Как правило, в качестве $foF2$ (мод) берется зависимость $foF2$ от какого-то индекса солнечной активности за большой период времени (несколько десятилетий) до настоящего момента [Laštovička, 2021a, b, 2022b; Sivakandan et al., 2022; De Haro Barbas and Elias 2020; De Haro Barbas et al., 2020] Вопрос о выборе этого индекса представляет отдельную проблему, и мы вернемся к нему ниже.

На наш взгляд такой подход к выбору $foF2$ (мод) представляется неправильным. Если тренды существуют (а это как раз и требуется определить), то, анализируя зависимость $foF2$ от индекса CA, мы используем величины $foF2$, в которых уже есть искомым тренд, и, следовательно, получаем зависимость $foF2$ от CA, искаженную влиянием этого тренда.

Гораздо правильнее, на наш взгляд, брать в качестве модели зависимость $foF2$ от CA для периода, когда можно ожидать, что не было хотя бы трендов антропогенного происхождения, связанных с ростом CO_2 в атмосфере. И сравнивать зависимость $foF2$ от CA в анализируемый период (например, в последние 10, или 20 лет) с этой зависимостью в «эталонный» период. Учитывая, что регулярное вертикальное зондирование (ВЗ) началось на многих станциях в период МГТ, мы предлагаем брать в качестве «эталонного» период 1957-1980 гг. Аргументы в пользу того, что заметные изменения ионосферных параметров как по данным некогерентного рассеяния, так и по данным ВЗ, начались после 1980 г. можно найти в работе Данилова [2012].

Очень важен вопрос о том, какие данные $foF2$ анализировать. В некоторых исследованиях берутся средние-годовые значения $foF2$. Мы считаем, что это является основной причиной очень малых трендов, которые получаются в таких исследованиях. По нашим данным [Данилов и Константинова, 2015] амплитуда отрицательных трендов $foF2$ имеет хорошо выраженные сезонную и суточную зависимость. Эта амплитуда больше днем, чем ночью и зимой, чем летом. Этот факт имеет очень большое значение для всей проблемы нахождения трендов $foF2$. Мы будем несколько раз возвращаться к этому вопросу ниже.

Особую проблему представляет собой выбор индекса CA для устранения при выделении трендов зависимости $foF2$ от солнечной активности.

Во многих работах в качестве такого индекса использовался хорошо известный индекс $F10.7$. Однако, анализируя данные до 2018 г., мы получили, что индекс $F10.7sm12$ плохо согласуется с другими индексами CA в 24-м цикле CA, и его надо корректировать [Данилов и Константинова, 2020]. Плохое согласие $F10.7$ с другими индексами CA в 24-м цикле отмечалась и другими авторами (см., например, Chen et al. [2011, 2014, 2018], De Haro Barbas and Elias [2020], De Haro Barbas et al. [2020], Laštovička [2016, 2019]). Laštovička [2016] указывал на проблемы, связанные с правильным учетом солнечной активности при определении трендов ионосферных параметров. В дальнейшем этой проблеме была посвящена целая серия его работ [Laštovička, 2021a, b; 2022b]. Мы вернемся к проблеме выбора лучшего индекса CA ниже.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕНДОВ $foF2$ ПО ДАННЫМ ДО 2022 Г.

3.1 Основной метод

В данной работе мы используем метод определения трендов, который был подробно описан и многократно использовался нами ранее. Напомним кратко суть этого метода. Строится зависимость $foF2$ от индекса солнечной активности (до данной работы использовался индекс $F10.7_{sm12}$, предложенный в модели IRI [Bilitza, 1990]) для «эталонного» периода. Для анализируемого периода считается величина $\Delta foF2$ – разность между величиной $foF2$, которую дает эта зависимость для текущих величин индекса CA, и реально наблюдаемым значением $foF2$. Зависимость $\Delta foF2$ от времени и дает искомый тренд.

Мы анализируем два зимних месяца (январь и февраль) и дневные условия (10:00, 12:00 и 14:00 LT), когда отрицательные тренды максимальны, и сравниваем их с соответствующими величинами $k(foF2)$ ночью и летом (июнь).

Поскольку в описанном методе используется 11-летнее сглаживание исходных величин $\Delta foF2$ и так как дальше мы в одном случае обратимся к исходным (не сглаженным) величинам, уместно заметить следующее.

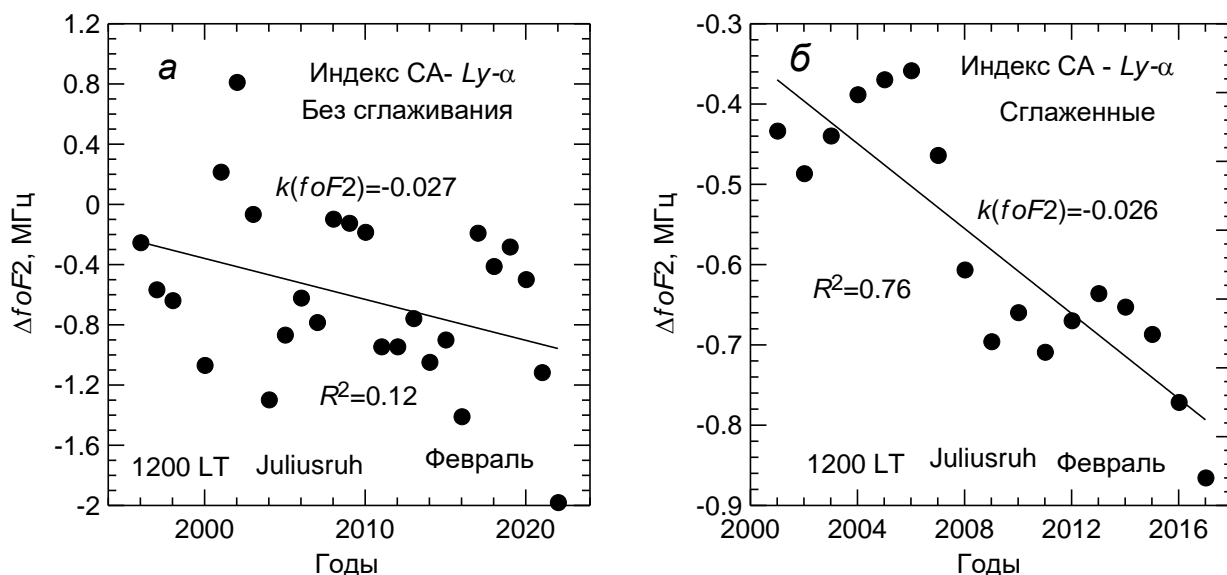


Рис. 1. Изменение $\Delta foF2$ для одних и тех же условий без сглаживания (а) и после сглаживания (б)

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. На рисунке 1 в качестве примера приводится изменение величины $\Delta foF2$ для 12:00 LT, февраля и Ly-α в качестве индекса CA без сглаживания (а) и после сглаживания (б). Хорошо видно, что характер изменения $\Delta foF2$ не изменился, но, естественно, в результате сглаживания существенно уменьшился разброс точек и выросли величины R^2 . Близость полученных на двух рисунках величин $k(foF2)$ является случайной. При сглаживании характер зависимости (знак тренда) сохраняется, но в большинстве случаев магнитуда тренда увеличивается. Представляется, что получаемые в результате сглаживания величины тренда лучше отражают исследуемую зависимость, поскольку сглаживается влияние случайно ошибочных точек, существование которых неизбежно. Единственным недостатком сглаживания является то, что при этом на 5 лет с каждой стороны сужается интервал анализируемых величин (в нашем случае – $\Delta foF2$). Может создаться впечатление, что на рис. 1б мы определяем тренды только до 2017 г. Но необходимо помнить, что при усреднении точка 2017 г. «впитала в себя» все значения $\Delta foF2$ вплоть до 2022 г.,

поэтому мы можем по-прежнему считать, что данные на рис. 1б и последующих аналогичных рисунках характеризуют тренд до 2022 г.

Новым в данной работе является использование различных индексов солнечной активности. Оно было продиктовано серией работ J. Laštovička, указанных выше и направленных на сравнение различных индексов СА для поиска трендов $foF2$. Следуя этим работам, мы в данной работе использовали 5 индексов СА: интенсивность линии $Ly-\alpha$ ($Ly-\alpha$), отношение интенсивностей в центре и в крыльях линии $MgII$ ($MgII$), число солнечных пятен (Rz), среднеемесячное значение потока радиоизлучения на 10.7 см ($F10.7mon$) и среднеемесячное значение потока радиоизлучения на волне 30 см ($F30mon$). Подчеркнем, что индекс $F10.7mon$ отличается от индекса $F10.7sm12$, который мы использовали в предыдущих работах и для 24-го цикла СА корректировали другими индексами СА [Данилов и Константинова, 2020; Danilov, 2021].

Примеры зависимостей $\Delta foF2$ от времени в разные месяцы в околорассветные часы приведены на рис. 2 и 3 для января и февраля, соответственно. На всех рисунках и в таблицах тренды $k(foF2)$ приведены в единицах МГц в год.

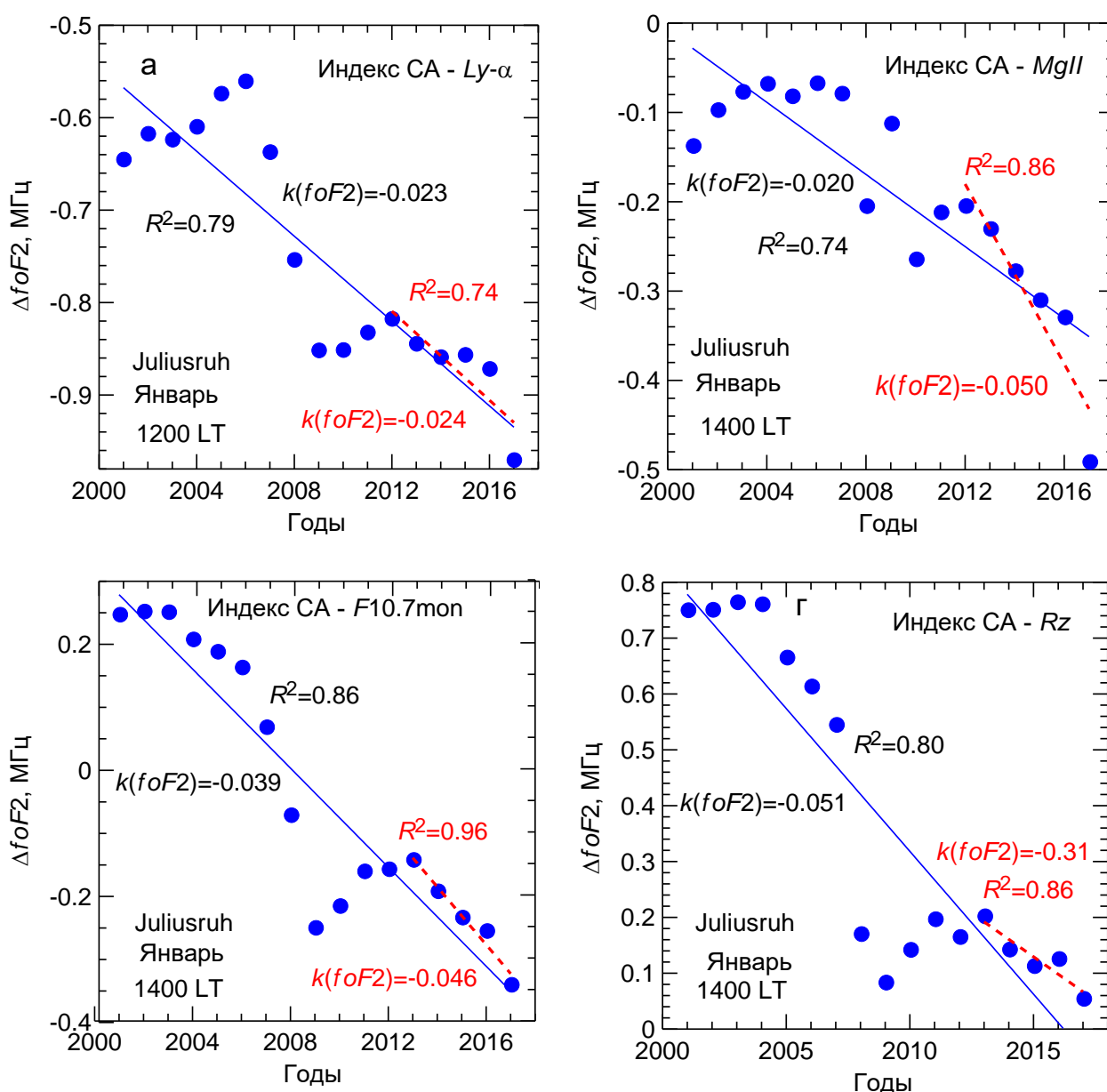


Рис. 2. Примеры изменения $\Delta foF2$ для января

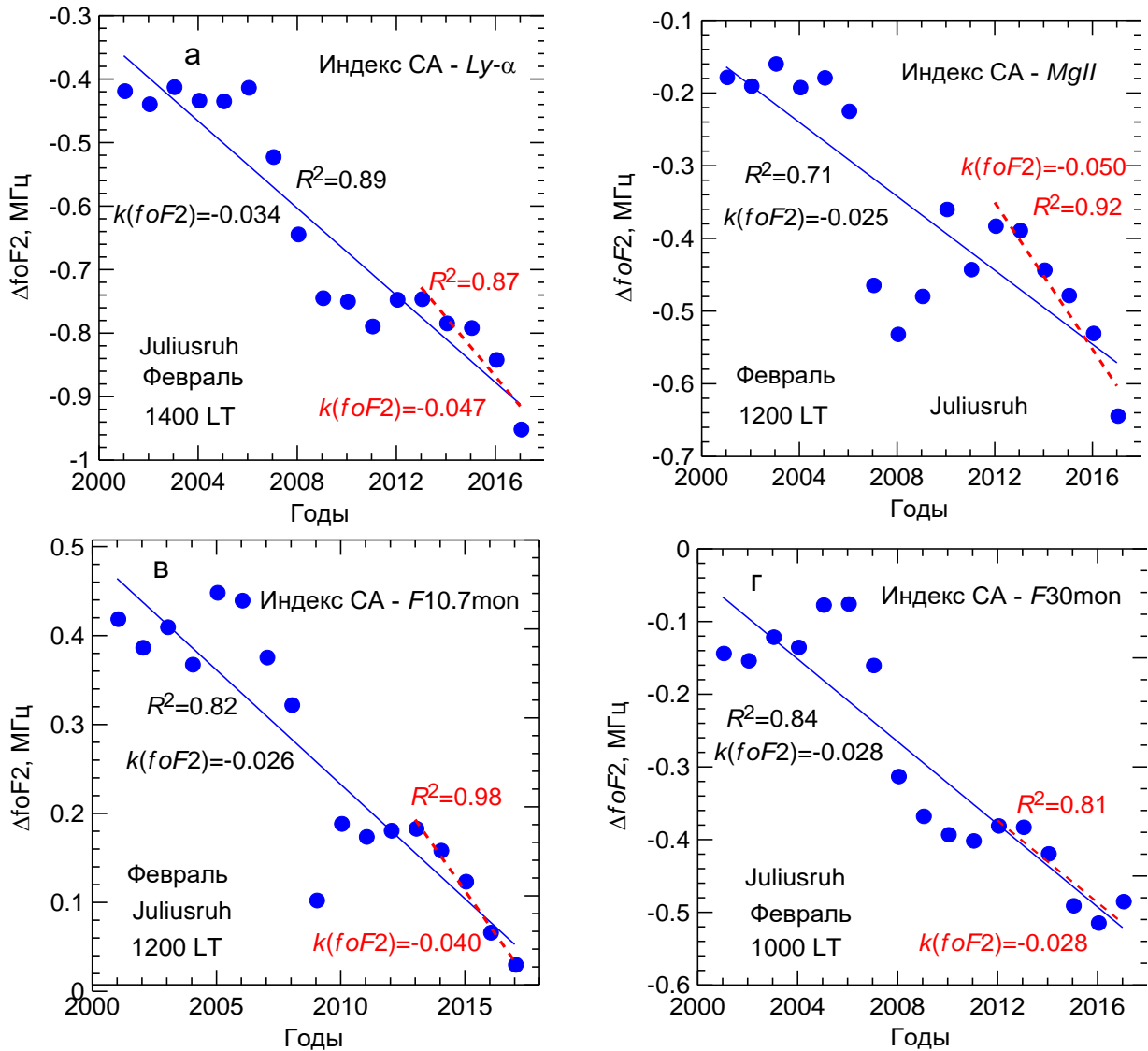


Рис. 3 Примеры изменения $\Delta foF2$ для февраля

Рисунки 2 и 3 показывают, что наблюдается хорошо выраженное уменьшение $\Delta foF2$ (отрицательный тренд $foF2$) со временем при использовании всех солнечных индексов. Во всех случаях величины коэффициента определенности R^2 по F-тесту Фишера при имеющемся количестве точек обеспечивают статистическую значимость S более 95%.

Следует обратить внимание на тот факт, что хорошо выраженные тренды начинаются примерно с 2010-2012 гг. До этого на некоторых рисунках хорошо видны эффекты «смутного периода», подробно описанного в предыдущих публикациях [Данилов и Константинова, 2020; Danilov 2021].

Результаты вычислений для всех четырех моментов LT для января и февраля представлены в таблицах 1 и 2, соответственно.

Таблицы 1 и 2 показывают, что использование всех пяти индексов CA приводит к одному главному выводу: при анализе данных до 2022 г. подтверждается уменьшение $\Delta foF2$ со временем, что означает отрицательный тренд $foF2$. При этом во всех случаях величина R^2 достаточно велика, чтобы обеспечить при имеющемся количестве точек статистическую значимость S выше 95%.

Сравнение величин $k(foF2)$, полученных при использовании различных индексов CA дает следующие результаты. В целом получаемые величины $k(foF2)$ для околополуденных имеют один порядок величины – только в одном случае (12:00 LT в январе) они различаются более, чем в два раза.

Таблица 1. Тренды за период 1996-2022 гг. для января для ст. Juliusruh

LT	$Ly-\alpha$		Rz		$MgII$		$F10.7mon$		$F30mon$		Среднее
	$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2	
10:00	-0.016	0.89	-0.029	0.74	-0.030	0.95	-0.020	0.82	-0.024	0.94	-0.024
12:00	-0.023	0.79	-0.051	0.83	-0.046	0.93	-0.040	0.89	-0.040	0.85	-0.040
14:00	-0.027	0.78	-0.051	0.80	-0.047	0.91	-0.039	0.86	-0.040	0.85	-0.041
04:00	-0.004	0.06	-0.006	0.15	-0.006	0.10	-0.006	0.13	-0.005	0.15	-0.004
20:00	Нет данных за 2019-2022 гг.										

Таблица 2. Тренды за период 1996-2022 гг. для февраля, для ст. Juliusruh

Индекс СА	$Ly-\alpha$		Rz		$MgII$		$F10.7mon$		$F30mon$		Среднее
	$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2	
10:00	-0.018	0.56	-0.027	0.77	-0.018	0.47	-0.029	0.83	-0.028	0.84	-0.024
12:00	-0.026	0.76	-0.042	0.89	-0.025	0.71	-0.037	0.88	-0.037	0.89	-0.035
14:00	-0.034	0.89	-0.043	0.90	-0.033	0.76	-0.046	0.93	-0.041	0.94	-0.039
04:00	+0.017	0.51	+0.013	0.50	+0.017	0.55	+0.011	0.32	+0.010	0.23	+0.014
20:00	-0.006	0.24	-0.013	0.64	-0.003	0.09	-0.013	0.60	-0.016	0.71	-0.010

Обращает на себя внимание почти идеальное согласие величин $k(foF2)$, получаемых при использовании индексов $Ly-\alpha$ и $MgII$ для февраля: для 10:00 LT обе величины $k(foF2)$ равны -0.018 МГц/год, почти то же справедливо и для 12:00 LT (-0.026 и -0.025 МГц/год) и для 14:00 LT (-0.034 и -0.033 МГц/год). Это позволяет нам считать, что эти два индекса являются наилучшими индексами для нахождения трендов $foF2$.

Наше заключение частично совпадает с выводами, полученными другими авторами. Laštovička [2021a, b; 2022b] для поиска трендов среднегодовых величин $foF2$ рекомендует индексы $MgII$ и $F30$. Perna and Pezzorane [2016] и Venchiarutti et al. [2021] рекомендовали $MgII$ для описания поведения $foF2$. Gulyaeva et al. [2018] рекомендовала $MgII$ как наилучший индекс для построения эмпирических ионосферных моделей. De Naro Varbas et al. [2021] пришли к выводу, что для поиска трендов $foF2$ наилучшим индексом является $MgII$.

Средние по всем индексам СА значения $k(foF2)$ для обоих месяцев приведены в последних столбцах таблиц 1 и 2. Видно, что эти средние значения для обоих месяцев совпадают для 10:00 LT, почти совпадают для 14:00 LT, и различаются не слишком сильно для 12:00 LT. Поскольку мы не ожидаем значительных различий в трендах $foF2$ в зимние месяцы, такое согласие является еще одним аргументом в пользу правильности использованного метода нахождения трендов.

Данные таблиц 1 и 2 подтверждают также вывод, полученный ранее [Данилов и Константинова, 2015], что отрицательные тренды $foF2$ максимальны в околополуденные часы и минимальны ночью. Как видно из этих таблиц, в ночное время величины $k(foF2)$ осциллируют вокруг нуля и малы по амплитуде. Соответственно, их статистическая значимость очень мала (низкие величины R^2).

Результаты расчетов для июня приведены в Таблице 3. Эта таблица показывает, что:

1. Тренды в околополуденные часы в июне малы и обладают меньшей статистической значимостью, чем в феврале и январе. Как это было в некоторых случаях в таблицах 1 и 2, величины $k(foF2)$ при использовании Rz отличаются от величин, полученных при использовании других индексов СА.
2. Полуночные величины $k(foF2)$ колеблются вокруг нуля для четырех индексов СА (за исключением величин для Rz).
3. Сравнение с таблицами 1 и 2 дает еще одно подтверждение того, что тренды $foF2$ наибольшие зимой и наименьшие (близкие к нулю) летом.

Таблица 3. Тренды за период 1996-2022 гг. для июня, для ст. Juliusruh

LT	<i>Ly-α</i>		<i>Rz</i>		<i>MgII</i>		<i>F10.7mon</i>		<i>F30</i>		Среднее <i>k(foF2)</i>
	<i>k(foF2)</i>	<i>R²</i>	<i>k(foF2)</i>	<i>R²</i>	<i>k(foF2)</i>	<i>R²</i>	<i>k(foF2)</i>	<i>R²</i>	<i>k(foF2)</i>	<i>R²</i>	
10:00	+0.007	0.21	+0.021	0.61	+0.006	0.29	+0.013	0.06	+0.024	0.03	+0.010
12:00	+0.008	0.52	+0.027	0.87	+0.004	0.16	+0.001	0.05	0	0	+0.008
14:00	+0.004	0.29	+0.021	0.91	+0.005	0.20	+0.008	0.50	-0.003	0.22	+0.008
04:00	-0.001	0.03	+0.022	0.82	-0.004	0.11	+0.004	0.06	-0.002	0.06	+0.004

3.2 Метод «Дельта»

Метод «Дельта», предложенный авторами ранее [Данилов и Константинова, 2017] является наиболее наглядным методом определения характера и примерной магнитуды трендов *foF2*. Он основан на том же сравнении величин *foF2* для одинакового индекса солнечной активности в «эталонный» период, когда не было трендов антропогенной природы, и в анализируемый период, как и основной метод. В тренде нет сглаживания – сравниваются две кривые (зависимости от выбранного индекса СА в каждом из периодов), и их различие и дает изменение *foF2* (величину Дельта) за время, прошедшее после «эталонного периода». Примеры зависимости месячных медиан *foF2* от различных индексов СА в «эталонный» и анализируемый периоды приведены на рис. 4. Точки – чисто экспериментальные величины медианы *foF2* для соответствующего месяца и момента LT. Кривые – аппроксимация этих точек полиномом 3-й степени.

В соответствии с выводами предыдущего параграфа, мы рассмотрели применение метода «Дельта» с использованием индексов СА *Ly-α* и *MgII*. Рассматривался тот же интервал 1996-2022 гг., что и предыдущем параграфе.

Примеры указанных кривых для «эталонного» и анализируемых периодов приведены на рисунках 5 (январь) и 6 (февраль). Для лучшего чтения рисунков мы убрали точки, оставив только аппроксимирующие их линии.

Таблица 4. Величины Дельта для двух месяцев и двух индексов СА

LT	Январь				Февраль			
	<i>Ly-α</i>		<i>MgII</i>		<i>Ly-α</i>		<i>MgII</i>	
	1996-2022	2013-2022	1996-2022	2013-2022	1996-2022	2013-2022	1996-2022	2013-2022
10:00	-0.74	-0.72	-0.72	-0.82	-0.68	-0.77	-0.56	-0.45
12:00	-0.94	-0.99	-0.43	-0.65	-0.77	-1.03	-0.61	-0.64
14:00	-0.97	-1.05	-0.45	-0.67	-0.73	-0.93	-0.65	-0.72

Результаты определения величины Дельта для зимних месяцев и околополуденных часов LT приведены в таблице 4. Как видно из этой таблицы, полученные величины Дельта для различных ситуаций согласуются между собой и с выводами о наличии отрицательных трендов *foF2*, полученными в предыдущем параграфе. Определить методом «Дельта» точные величины *k(foF2)* нельзя, поскольку мы не знаем, как формируются тренды в течение интервала ΔT между «эталонным» периодом и 1996-2022 гг. Но для примерной оценки этих величин мы можем принять, что тренды стали формироваться с 1980 г., и, таким образом, $\Delta T = 25$ лет. В этом случае мы получаем, что средние тренды для 1996-2022 гг. составляют около -0.030 МГц в год, что по порядку величины совпадает с величинами *k(foF2)*, найденными основным методом в предыдущем параграфе.

На рисунках 5 и 6 приведены также кривые для последнего десятилетия (синий цвет). Надежность построения зависимостей в этом случае гораздо меньше, чем для двух других периодов. Но обращает на себя внимание факт, что соответствующие кривые идут систематически ниже, чем кривые для 1996-2022 гг. Мы вернемся к вопросу о трендах в последнее десятилетие ниже.

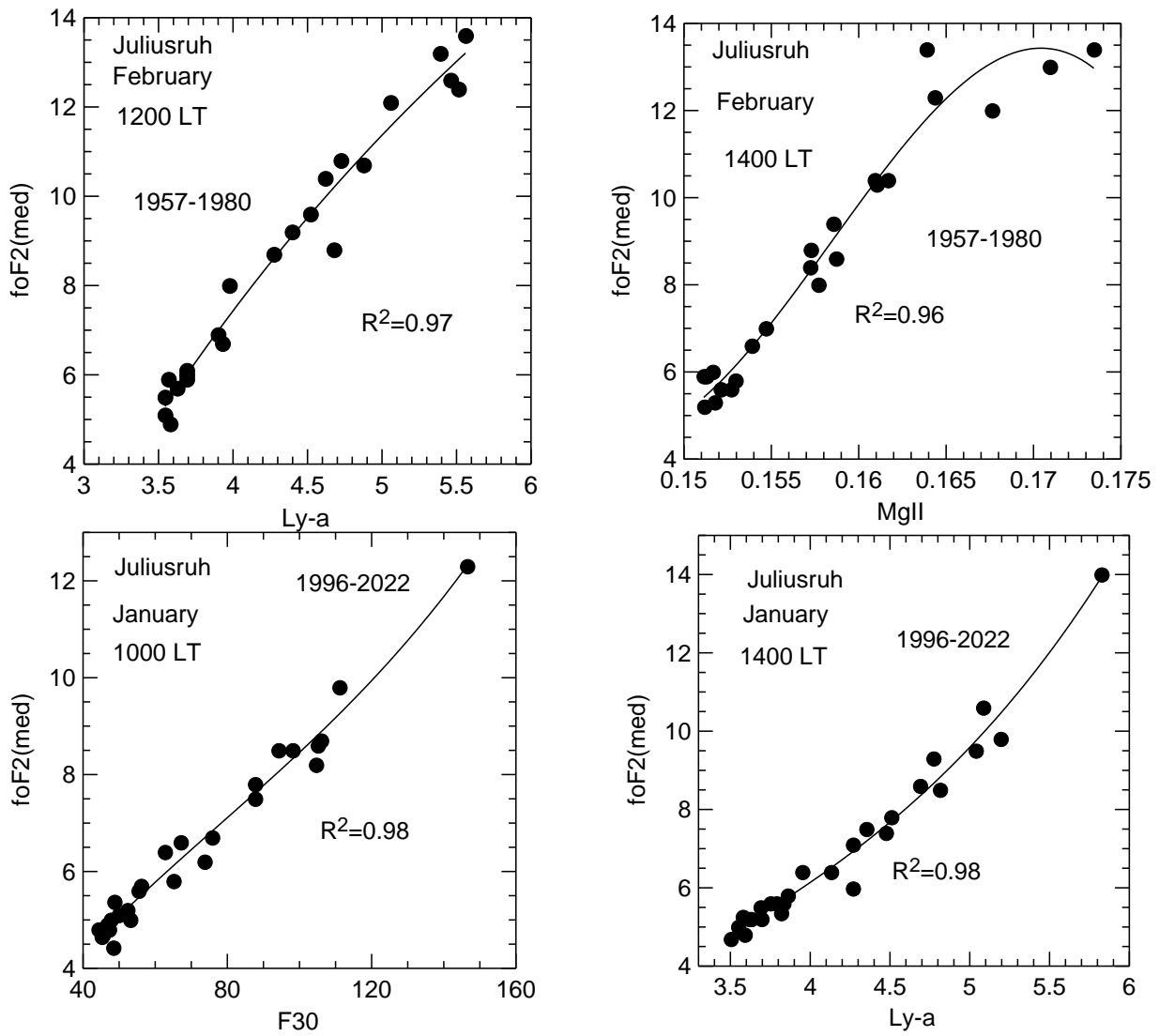


Рис. 4. Примеры зависимости $foF2$ от индексов СА в эталонный и анализируемый периоды

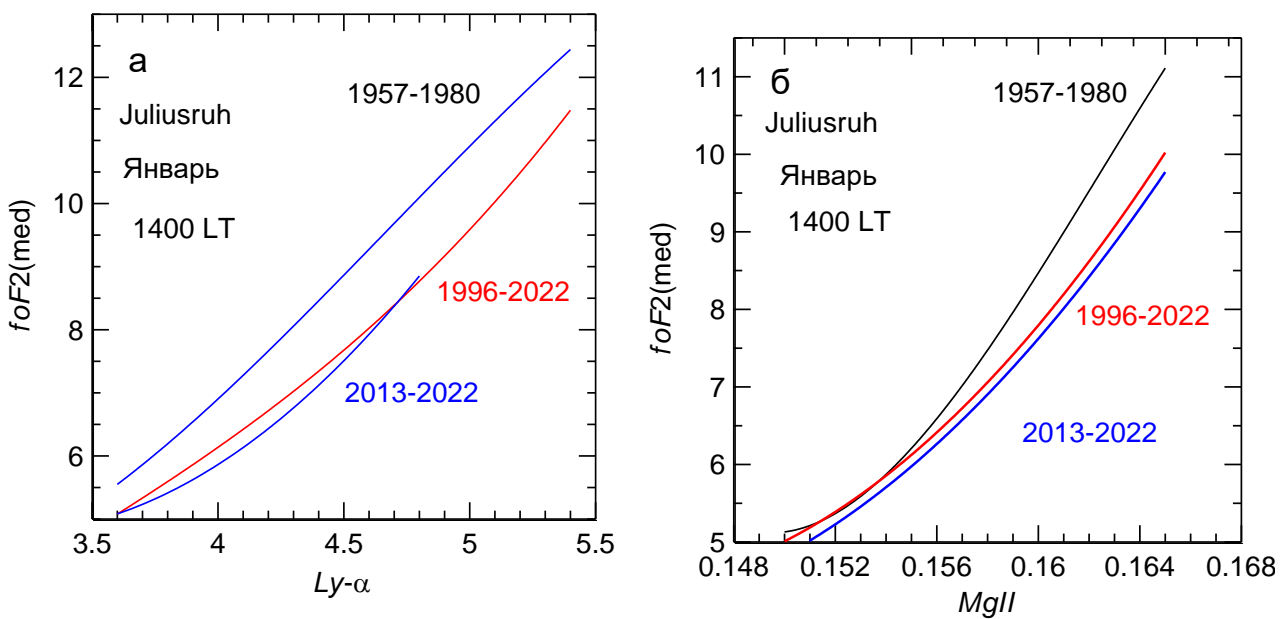


Рис. 5. Примеры изменения зависимости $foF2$ от индекса солнечной активности (январь)

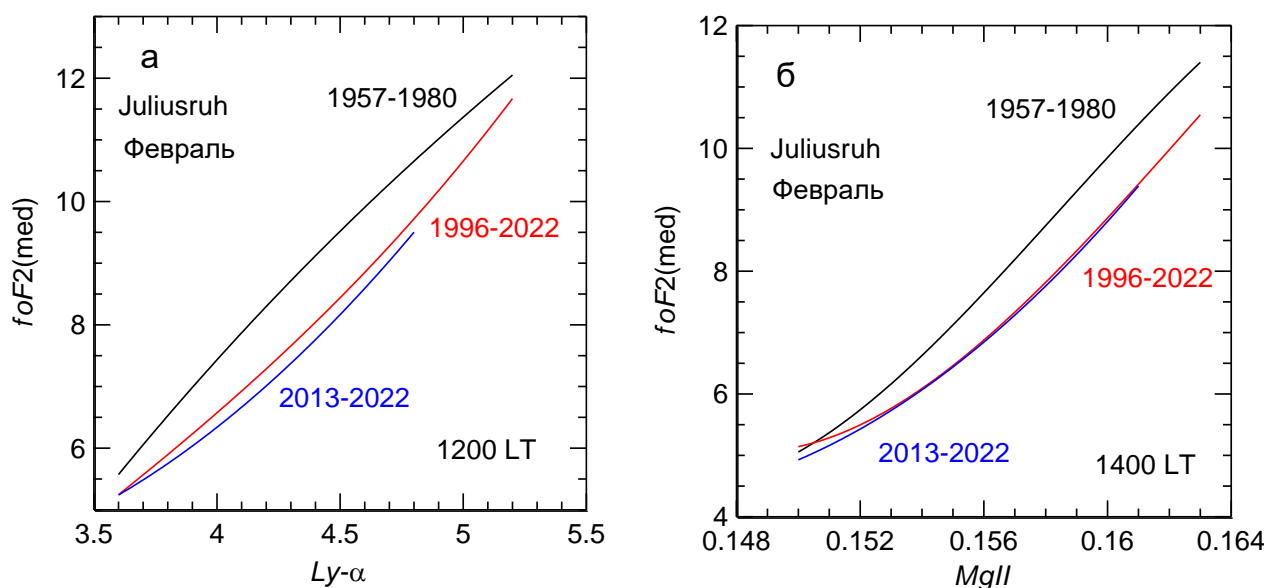


Рис. 6. Примеры изменения зависимости $foF2$ от индекса солнечной активности (февраль)

3.3 Тренды в последнее десятилетие

При анализе рисунков типа рис. 2 и 3 обращает на себя внимание одна особенность поведения точек $\Delta foF2$ в течение недавних лет. На этих рисунках аппроксимация точек за 1996-2022 гг. показана сплошной синей линией, а точек для последнего десятилетия – красной штриховой линией. Видно, что последние 5-7 точек почти на всех подобных рисунках дают значительно более высокий и гораздо лучше выраженный (большинство величин R^2 выше 0.9) тренд, чем получается при анализе всех точек интервала 1996-2022 гг. При этом, хотя количество точек и невелико, статистическая значимость S оказывается высокой за счет высоких величин R^2 .

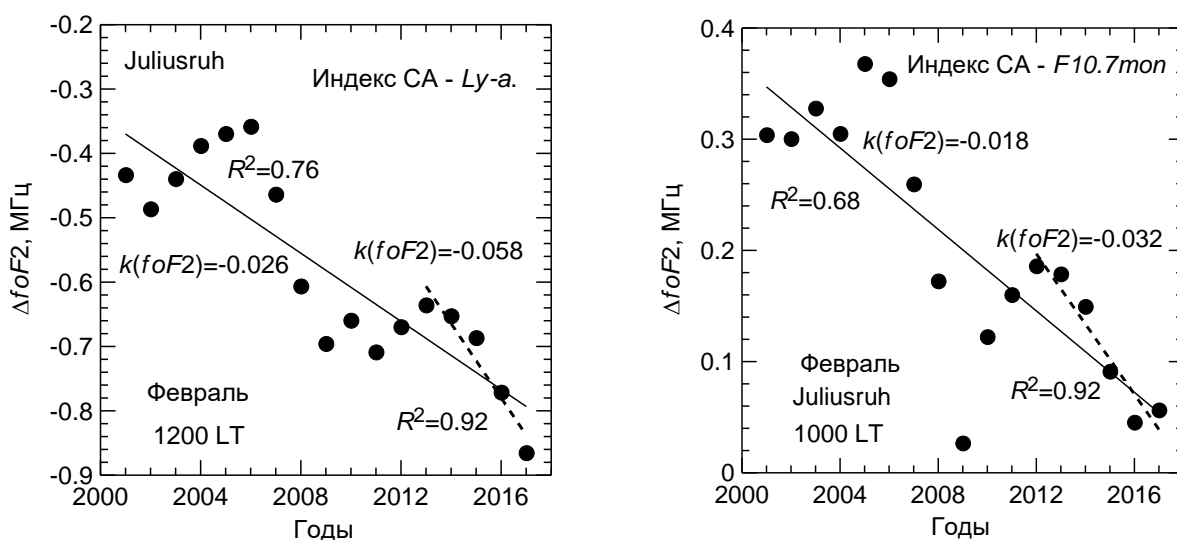


Рис. 7. Изменение $\Delta foF2$ в течение всего анализируемого периода и в течение последних лет

Примеры для ситуаций, не рассмотренных на рис. 2-3, приведены на рис. 7. Однако описываемый эффект можно видеть и на большинстве графиков на рис. 2-3.

Сводка полученных таким образом трендов за недавние годы для наиболее надежных, по нашему мнению, индексов $Ly-\alpha$ и $MgII$ (см. выше) приведена в табл. 5. Эта таблица дает тренды за недавний период с величинами R^2 и соответствующие величины (взяты из табл. 1) для 1996-2022 гг.

Таблица 5. Тренды для двух периодов (Juliusruh), в МГц/год

LT	Индекс солнечный	Январь				Февраль			
		Недавние годы		1996-2022		Недавние годы		1996-2022	
		$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2	$k(foF2)$	R^2
10:00	$Ly-\alpha$	-0.022	0.89	-0.016	0.89	-0.048	0.98	-0.018	0.56
	$MgII$	-0.035	0.91	-0.030	0.95	-0.045	0.98	-0.018	0.47
12:00	$Ly-\alpha$	-0.024	0.74	-0.023	0.79	-0.058	0.92	-0.026	0.76
	$MgII$	-0.031	0.89	-0.046	0.93	-0.050	0.92	-0.025	0.71
14:00	$Ly-\alpha$	-0.050	0.91	-0.027	0.78	-0.047	0.87	-0.034	0.89
	$MgII$	-0.032	0.96	-0.047	0.91	-0.044	0.90	-0.033	0.76

Как видно из табл. 5, при использовании обоих индексов СА тренды для последнее десятилетие оказываются существенно выше (в большинстве случаев с очень высокими R^2), чем для всего рассмотренного периода с 1996 г. Этот эффект наблюдается в 10 случаях из 12.

Аналогичный анализ показал, что подобный эффект наблюдается и в июне. Поскольку летом даже днем тренды слегка положительны (см. табл. 3), при переходе к недавним годам знак трендов меняется и появляются небольшие отрицательные тренды с невысокой в целом статистической значимостью.

Поскольку результаты на рис. 5 и в табл. 3 приведены для сглаженных величин $\Delta foF2$ (см. выше в параграфе 2), стоит посмотреть на эти величины без сглаживания, чтобы точно определить в какие годы происходит указанное усиление трендов.

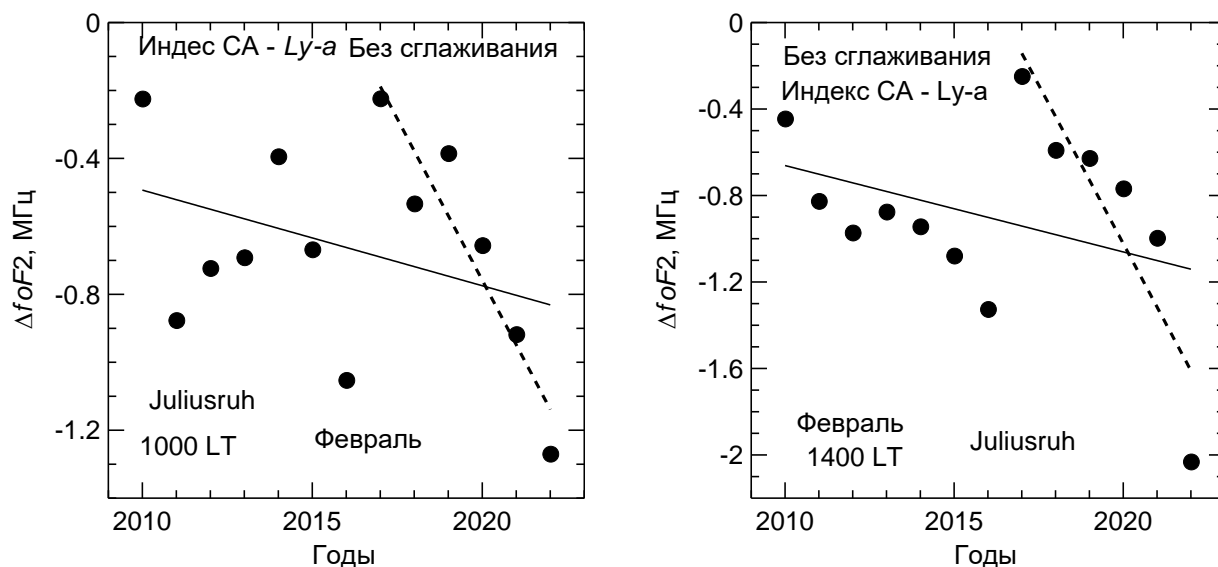


Рис. 8. Тренды $foF2$ в недавние годы по данным без сглаживания

На рисунке 8 приведены два примера изменения $\Delta foF2$ с 2010 по 2022 гг. по не сглаженным данным согласно недавней работе Данилова и Бербенева [2023]. Видно, что более высокие тренды в недавний период, полученные по сглаженным данным и приведенные в табл. 3, обусловлены усилением отрицательных трендов именно в последние годы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при использовании величин $foF2$, измеренных в 2019-2022 гг., подтверждены выводы, полученные ранее на основании анализа данных до 2018 г. При этом учет эффектов солнечной активности проведен для пяти индексов SA и получены согласующиеся результаты.

Результаты, полученные основным методом в параграфе 3.1, подтверждаются результатами, полученными методом «Дельта» в параграфе 3.2. Подтверждены также полученные ранее выводы о наличии суточных (днем больше по амплитуде, чем ночью) и сезонных (зимой больше по амплитуде, чем летом) вариаций отрицательных трендов $k(foF2)$.

Отрицательные тренды максимальны по амплитуде днем зимой и малы (ночью они могут даже становиться несколько положительными) летом ночью. Это очень важно в следующем плане. Если среднегодовые и среднесуточные величины $foF2$ используются для поиска трендов (как это делается в ряде исследований), они будут приводить к низким величинам трендов из-за усреднения достаточно высоких зимних дневных отрицательных трендов и низких (или даже положительных) ночных трендов в другие сезоны. Однако, наши исследования показывают, что по крайней мере в некоторых условиях (зима, день) в течение двух предыдущих десятилетий наблюдаются достаточно высокие отрицательные тренды порядка 0.03-0.04 МГц/год. Этот вывод важен в двух аспектах. Во-первых, мы знаем из других данных, что происходит охлаждение и оседание верхней атмосферы [Laštovička et al. 2008], а потому следует ожидать систематического уменьшения $foF2$. Во-вторых, для многих прикладных проблем необходимо знать величины максимально возможных трендов даже если они присутствуют только в определенный сезон и определенное время суток. Тренды, полученные выше, дают уменьшение $foF2$ на 1.0-1.2 МГц за 30 лет. Это достаточно большая величина для некоторых проблем ионосферного распространения радиоволн.

Наличие суточного хода трендов $foF2$ было подтверждено в недавней работе Yue et al. (2017), в которой анализировались наблюдения на станции Wuhan. Полученный суточный ход $k(foF2)$ приведен на рис. 7 (адаптирован из указанной работы). Видно, что знак тренда и его суточный ход полностью согласуется с нашими результатами, но абсолютные величины получены значительно меньше, чем у нас. Причина этого различия представляется вполне очевидной – Yue et al. [2017] анализировали среднегодовые величины $foF2$. Это означает, что они получили среднее значение между сильным отрицательным трендом зимой и близким к нулю или даже слегка положительным трендами летом.

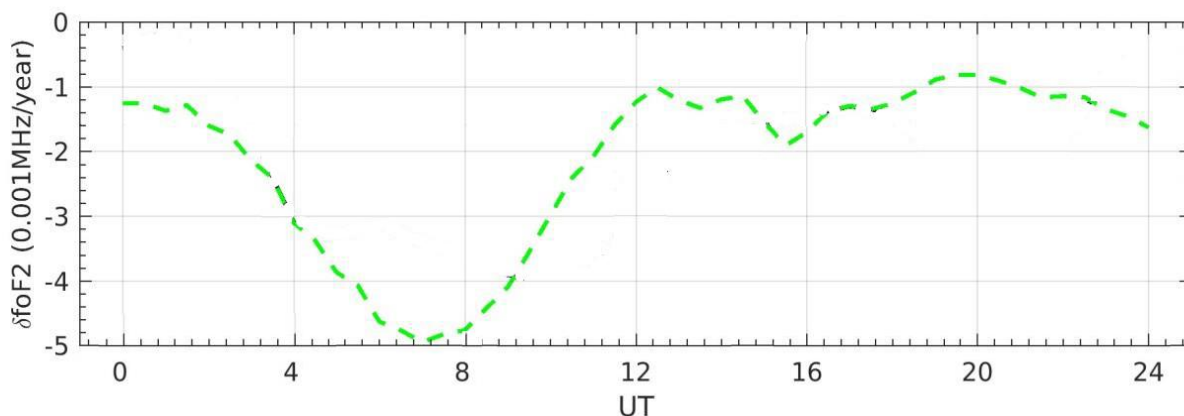


Рис. 9. Суточные вариации тренда $foF2$ для ст. Uhan (LT=UT+7.6 h) (адаптировано из Yue et al. [2017])

В указанной работе получено, что величина среднегодового тренда $foF2$ по измерениям на станции Wuhan составляет -0.002 МГц/год. Мы использовали амплитуды трендов по ст. Juliusruh для всех месяцев и всех моментов LT, полученные нами [Данилов и Константинова, 2015], и посчитали среднюю величину $k(foF2)$. Мы получили -0.004 МГц/год. Это близко к величине, полученной Yue et al. [2017].

Таким образом, среднесуточный среднегодовой тренд мал. Мы акцентируем внимание на наиболее сильных отрицательных трендах, которые наблюдаются зимой днем. Что является причиной такого долговременного изменения $foF2$ – это другой вопрос. Очевидно, что наблюдаемый тренд включает в себя два эффекта – охлаждение и оседание верхней атмосферы и вековые вариации магнитного поля. Нам представляется, что доминирует тренд антропогенного происхождения.

Elias [2009] анализировала вклад вековых вариаций в долговременные тренды $foF2$. Было получено, что этот вклад значителен в области южно-атлантической аномалии и около экватора, а на средних широтах он мал. Примерно такой же вывод получен и в недавней статье Chen et al. [2022]. Для прикладных задач ионосферного распространения радиоволн совершенно не важно знать природу трендов (антропогенная или геомагнитная), важно знать, что они существуют. Но вопрос об именно антропогенной природе очень важен для понимания всей проблемы оседания и охлаждения верхней атмосферы из-за увеличения количества парниковых газов.

ЛИТЕРАТУРА

- Данилов А. Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия Т. 52. № 3. С. 291-312. 2012.
- Данилов А. Д. Индексы солнечной активности в 24-м цикле и поведение слоя $F2$ ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 61. №2. С. 213-223. 2021.
- Данилов А. Д., Бербенева Н. А. Тренды критической частоты слоя $F2$ в последнее десятилетие // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. №2. С. 139-146. 2023.
- 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. 2020.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Долговременные изменения параметра “Дельта $foF2$ ” по данным двух европейских ионосферных станций // Геомагнетизм и аэрономия Т. 57. №5. С. 623-627. 2017.
- Bilitza D. International Reference Ionosphere // National Space Science Data Center, NSSDC 90-92, Greenbelt, Maryland. 1990.
- Danilov A. D. Behavior of $F2$ -layer parameters and solar activity indices in the 24th cycle // Adv. Space Res. V. 67. P. 102-110. 2021
- 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., Elias A. G., Fagre M., 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.
- De Haro Barbás, D. F., Elias, A. G., Venchiarutti, J. V., FagreM, M., Bruno, S., Zossi B. S., Jun G. T., Medina F. D. MgII as a solar proxy to filter $F2$ -region ionospheric parameters // Pure and Applied Geophysics 178, 4605–4618. 2021.
- Elias A. G. Trends in the $F2$ ionospheric layer due to long-term variations in 488 the Earth’s magnetic field // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 71. P. 1602-1609. doi:10.1016/j.jastp.2009.05.014.
- 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.
- 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, Kuhlungsborn, 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. <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. No. 1. P. 2–8. doi: 10.1016/j.asr.2020.07.025, 2021a

- *Laštovička, J.* The best solar activity proxy for long-term ionospheric investigations. *Adv. Space Res.*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.06.032>. 2021b
- *Laštovička, J.* Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere and ionosphere. Paper presented at the 11th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere, Helsinki, Finland, May 30–June 3, 2022a.
- *Laštovička, J.* The optimum solar activity proxy for long-term studies of *foF2*. Paper presented at the 11th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere, Helsinki, Finland, May 30–June 3, 2022b.
- *Sivakandan M., J. Mielich J., Renkowitz T., Chau J. L., Jaen J., and Laštovička J.* Long-term variations and trends in the E, F and sporadic E (Es) layer over Juliusruh, Europe. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128, e2022JA031097. <https://doi.org/10.1029/2022JA031097>. 2023.
- *Vencharutti, J. V., Farge, M., Zossi, B. S., Tan Juan Rios, G., Medina, F. D.* Mg II as a solar proxy to filter F2-region ionospheric parameters. *Pure and Applied Geophysics*, 178, 4605-4618. doi: 10.1007/s00024-021-02884-2021.
- *Chen Y., Liu L., Le H., Zhang H., Zhang R.* Responding trends of ionospheric F2-layer to weaker geomagnetic activities, *J. Space Weather Space Clim.* 12, 6 <https://doi.org/10.1051/swsc/2022005> 2022.
- *Yue X, Hu L., Wei Y., Wan W., Ning B.* Ionospheric trend over Wuhan during 1947-2017: comparison between simulation and observation. *J. Geoph. Res.* doi: 10.1002/2017JA024675. 2017.

ANALYSIS OF TRENDS IN *foF2* TO 2022 USING VARIOUS SOLAR ACTIVITY INDICES

Danilov A. D., Konstantinova A. V., Berbeneva N. A.

The trends in the F2-layer critical frequency *foF2* are analyzed based on the observations at Juliusruh station to 2022. Five solar activity indices (*Ly-a*, *MgII*, *Rz*, *F10.7mon*, and *F30*) are used to remove the solar activity effect. It is found that the conclusions obtained earlier on the diurnal (in the daytime stronger than at night) and seasonal (in winter stronger than in summer) variations in the amplitudes of the negative trends in *foF2*, *k(foF2)*, are confirmed using all five indices. The maximal negative values of *k(foF2)* are 0.03-0.04 MHz/year at near-noon hours in winter months. The use of the “Delta” method conforms these conclusions. It is found that the negative trends in *foF2* are stronger in the recent decade than in the entire considered period of 1996-2022.

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