



УДК 550.388.2

## ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ $foF2$ ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ СЕВЕРНОГО И ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЙ

А. Д. Данилов<sup>1</sup>, А. В. Константинова<sup>1</sup>, Н. А. Бербенева<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт прикладной геофизики имени Е.К. Федорова Росгидромета (ИПГ), Москва, Россия<sup>2</sup>Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Выполнен поиск долговременных трендов критической частоты слоя F2,  $foF2$ , на основании наблюдения методом вертикального зондирования на трех станциях Северного Полушария (Juliusruh, Boulder и Moscow) и трех станциях Южного Полушария (Townsville, Hobart и Canberra). Использовался метод, разработанный и неоднократно описанный авторами ранее. Анализировались данные для двух зимних месяцев в каждом полушарии и для пяти околополуденных моментов местного времени. Для устранения эффектов солнечной активности использовались три индекса SA ( $F30$ ,  $Ly-\alpha$ , и  $MgII$ ). Для всех рассмотренных ситуаций (станция, месяц, момент LT, индекс SA) получены отрицательные тренды. Они хорошо согласуются друг с другом как при сравнении между собой отдельно станций Северного и Южного полушарий, так и при сравнении станций обоих полушарий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ионосферный слой F2, долговременные тренды<https://elibrary.ru/ptfzfg>

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долговременных 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 работах Lastovicka [2017; 2022]. Наиболее подробное обсуждение современного состояния исследований приводится в недавней работе Lastovicka [2023].

Авторами был разработан и неоднократно использовался метод определения долговременных трендов параметров ионосферного слоя F2. Достаточно подробное описание метода можно найти в работе Данилова и Бербеновой [2023а]. Здесь мы напомним только, что метод основан на сравнении величин  $foF2$  в течение двух последних десятилетий с величинами  $foF2$  для тех же условий в течение «эталонного» периода 1957–1980 гг., когда еще не было трендов  $foF2$  антропогенной природы. Между соответствующими величинами  $foF2$  вычисляется разница  $\Delta foF2$ , изменение которой со временем в течение анализируемого периода и дает искомый тренд  $k(foF2)$ .

При определении трендов ионосферных параметров очень важен вопрос о выборе индексов солнечной активности (СА) для устранения эффектов СА. Вопрос обсуждался многими

Электронная почта авторов для переписки:

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

исследователями. Отметим здесь лишь две работы аргентинской группы [De Haro Barbas and Elias, 2020; De Haro Barbas et al., 2020] и публикации Lastovicka [2022] и Laštovička and Buresova [2023].

Авторами [Данилов и Бербенева, 2023б, 2024; Данилов и др. 2024] подробно рассматривался вопрос о качестве описания изменения  $foF2$  со временем различными индексами СА. Вывод этих работ состоит в том, что наилучшее описание обеспечивает индекс  $F30$ . Далее следуют индексы  $Ly-\alpha$  и  $MgII$ . Наихудшим для такого описания является индекс  $Rz$ . Следуя этим результатам, мы в данной работе использовали для устранения эффектов СА индексы  $F30$ ,  $Ly-\alpha$  и  $MgII$ .

В статье Данилова и Бербенева [2023а] были рассмотрены тренды  $foF2$  по данным ст. Juliusruh до 2022 г. Более подробный анализ полного суточного хода этих трендов был представлен в работе Данилова и др. [2023а].

Целью данной работы явился анализ трендов критической частоты ионосферного слоя  $F2$  по данным нескольких станций, расположенных как в Северном, так и в Южном полушариях. Мы анализировали только среднеширотные ( $\phi = 30-60^\circ$ ) станции ВЗ, для которых нам удалось найти в банках данных месячные медианы  $foF2$  для обоих периодов (1957–1980 и 1996–2023 гг.).

Поскольку наиболее значимые тренды  $foF2$  наблюдаются днем, а ночью они близки к нулю, (подробнее см. [Данилов и др., 2023б]) мы рассматривали только пять околополуденных моментов LT. Точно так же, поскольку эти тренды хорошо выражены зимой, но практически отсутствуют летом (см. [Данилов и Бербенева, 2023а]), мы провели поиск этих трендов для двух зимних месяцев. Это январь и февраль для станций Северного Полушария, а также июнь и июль для станций Южного Полушария.

## 2. СТАНЦИИ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

На рисунках 1–4 представлены примеры изменения со временем величины  $\Delta foF2$ . Чтобы не перегружать статью рисунками, мы приводим их только для двух станций – Moscow и Boulder. Аналогичные рисунки для ст. Juliusruh можно найти в работе Данилова и Бербенева [2023а]. Сводка результатов для всех станций Северного Полушария будет представлена ниже в таблицах. Все тренды (величины  $k(foF2)$ ) на всех рисунках и в таблицах приводятся в единицах МГц/год. На рисунках приводятся величины коэффициента определенности  $R^2$  согласно критерию Фишера, которые позволяют судить о статистической значимости получаемых зависимостей.

Как видно из приведенных рисунков, для обоих зимних месяцев на обеих станциях наблюдается систематическое уменьшение величины  $\Delta foF2$  со временем, которое дает отрицательный тренд. Разброс точек относительно аппроксимирующей их прямой линии несколько различается (что естественно), однако все рисунки позволяют утверждать (в соответствии с приведенными на них величинами  $R^2$ ), что получаемый тренд имеет высокую статистическую значимость. Для справки отметим, что для имеющегося на каждом рисунке количества точек 18 при величине  $R^2$  выше 0.70 статистическая значимость получаемых трендов  $S$  превышает 99%.

Необходимо сделать следующее пояснение. Не следует удивляться тому, что поведение точек относительно аппроксимирующей линии при заданном месяце может быть различным для одной станции, но для различных часов LT. Приводимые в банках величины медиан  $foF2$  содержат неизбежные ошибки (мы писали об этом и приводили примеры в работе [Данилов и Константинова, 2013]). Кроме того, они могут отражать наличие в данном месяце дней с магнитными возмущениями, нарушая тем самым зависимость от времени, которую мы анализируем. Все это и приводит к разбросу (иногда достаточно сильному) точек относительно аппроксимации. На наш взгляд, важным является статистическая сторона вопроса – во всех проанализированных ситуациях (станция, месяц, момент LT) наблюдается уменьшение  $\Delta foF2$  со временем, дающее отрицательный тренд  $foF2$ .

Штриховой линией на всех рисунках показано изменение  $\Delta foF2$  в последние годы. Рассматривались точки, для которых наклон этого изменения увеличивался, указывая на более сильный отрицательный тренд. При этом первой точкой была та, где начиналось это изменение, а последней всегда была последняя точка рассматриваемого интервала. Мы вернемся к обсуждению недавних лет ниже.

По графику зависимости  $\Delta foF2$  от времени для каждой ситуации (станция, месяц, индекс СА) строилась соответствующая таблица с полученными параметрами. Чтобы не перегружать статью таблицами, мы приводим в таблице 1 в качестве примера результаты только для двух ситуаций. В этой таблице для каждой ситуации приводится тренд  $k(foF2)$  для всех пяти моментов LT для всего анализируемого периода 1996–2023 гг. с соответствующими величинами  $R^2$ , а также тренд для недавних лет также с величинами  $R^2$ .

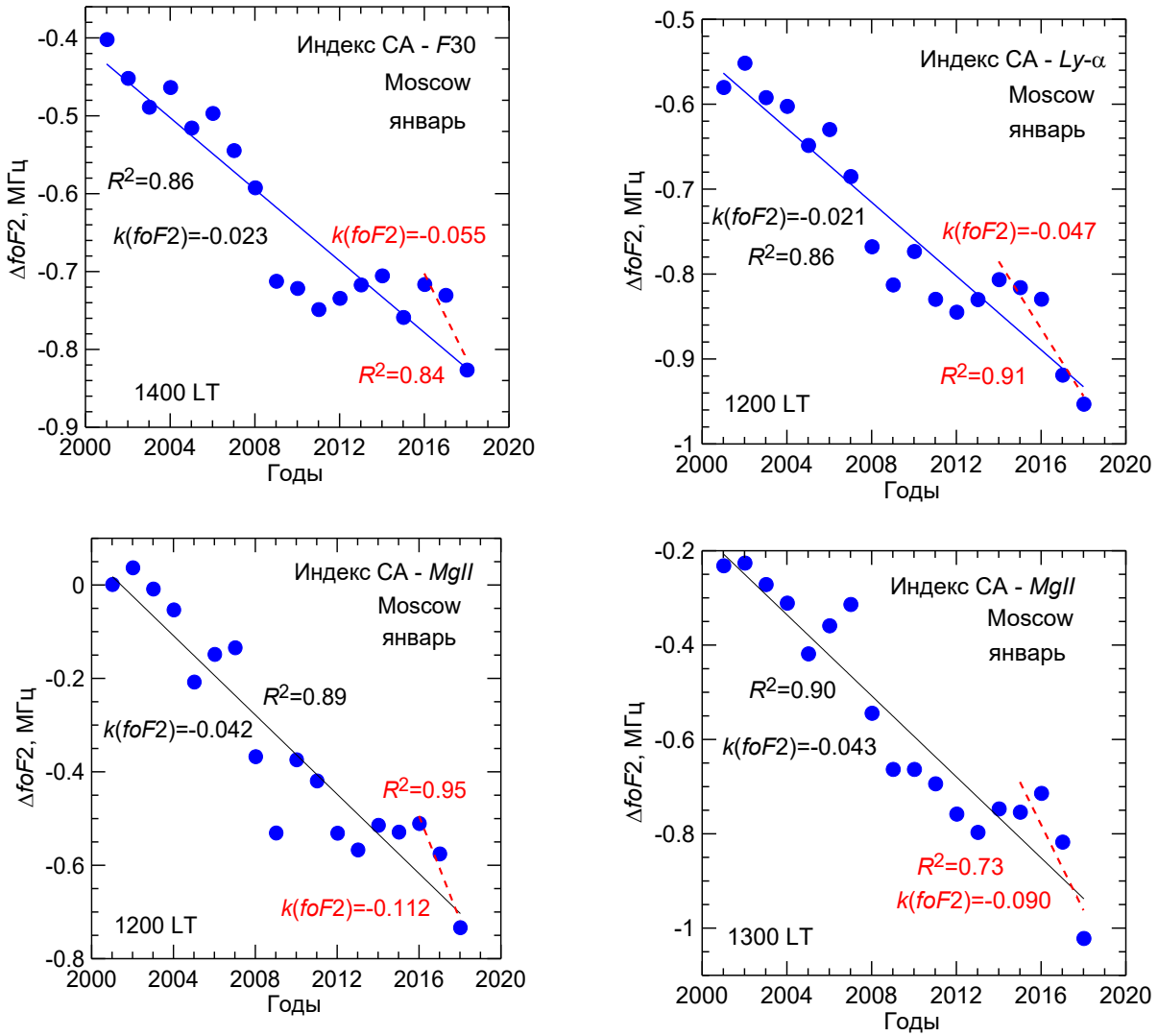


Рис. 1. Изменение  $\Delta foF2$  со временем для ст. Moscow в январе

Таблица 1. Величины  $k(foF2)$  для двух ситуаций

LT	Moscow, январь, MgII				Boulder, февраль, Ly- $\alpha$			
	1996–2023	$R^2$	недавно	$R^2$	1996–2013	$R^2$	недавно	$R^2$
1000	-0.025	0.85	-0.100	0.8	-0.028	0.70	-0.044	0.95
1100	-0.024	0.71	-0.069	0.86	-0.034	0.76	-0.044	0.95
1200	-0.042	0.89	-0.112	0.95	-0.029	0.75	-0.050	0.93
1300	-0.043	0.90	-0.090	0.73	-0.030	0.65	-0.040	0.70
1400	-0.031	0.80	-0.068	0.89	-0.031	0.60	-0.011	0.32

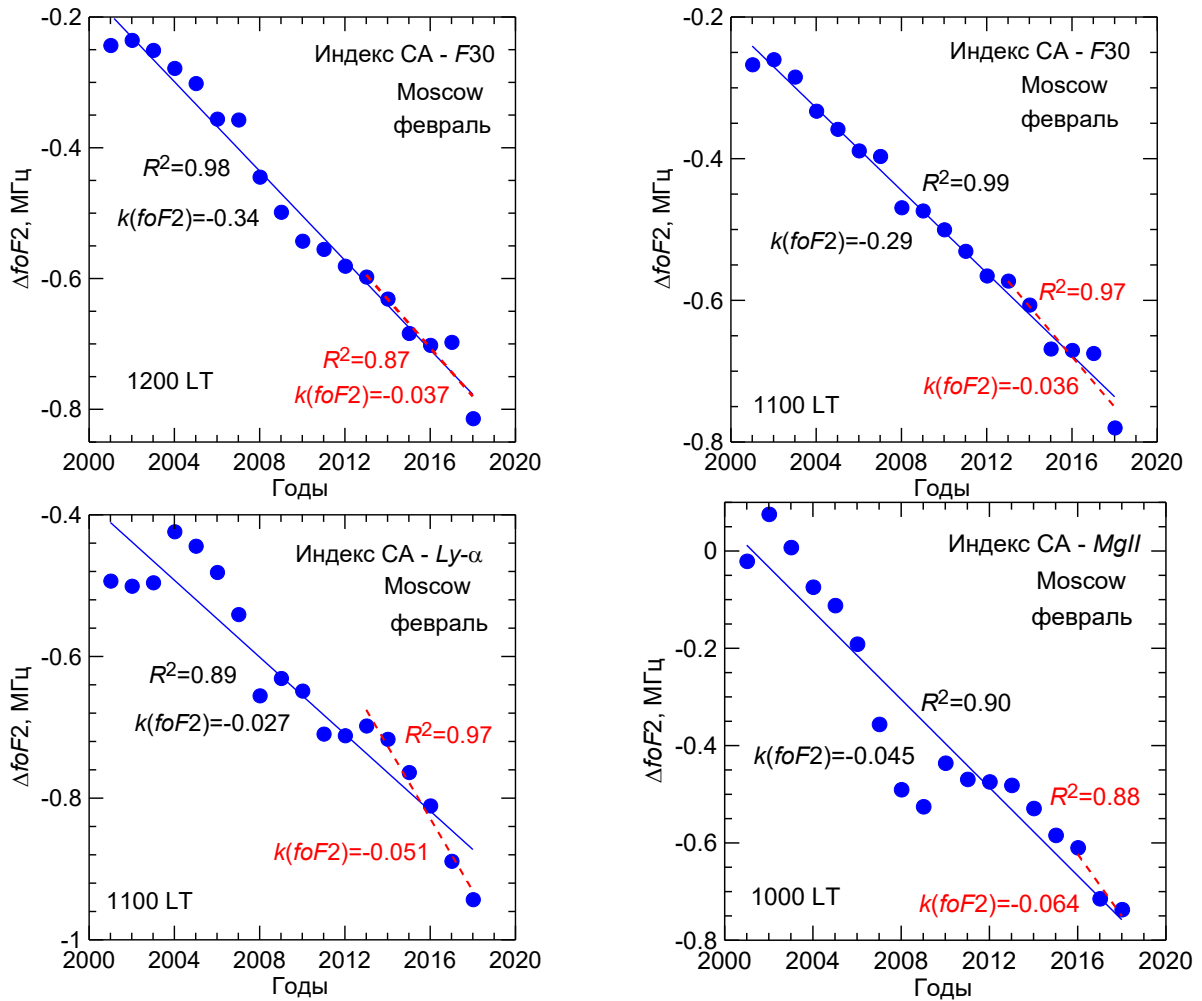


Рис. 2. Изменение  $\Delta foF2$  со временем для ст. Moscow в феврале

Суммарный результат по каждой станции представлен в таблицах 2 и 3. В этих таблицах даны величины  $k(foF2)$  для периода 1996–2023 гг. для пяти моментов LT для каждого индекса CA. В строке «Среднее» приводится среднее значение по всем пяти моментам LT. В следующей строке приводится среднеквадратическая ошибка (SD) при усреднении этих пяти величин. В столбце «Среднее» приводится результат усреднения трех средних для каждого индекса CA величин и соответствующая величина SD.

Таблица 2. Величины  $k(foF2)$  для 1996–2023 г. для ст. Moscow

LT	Январь				Февраль			
	F30	Ly- $\alpha$	MgII	Среднее	F30	Ly- $\alpha$	MgII	Среднее
1000	-0.007		-0.025		-0.032	-0.025	-0.048	
1100	-0.023		-0.024		-0.029	-0.027	-0.050	
1200	-0.027	-0.021	-0.042		-0.034	-0.021	-0.043	
1300	-0.019		-0.043		-0.038	-0.028	-0.048	
1400	-0.023	-0.022	-0.031		-0.044	-0.035	-0.042	
Среднее	-0.020	-0.022	-0.033	-0.025	-0.035	-0.027	-0.046	-0.036
SD	0.008	0.001	0.009	0.007	0.006	0.005	0.003	0.010

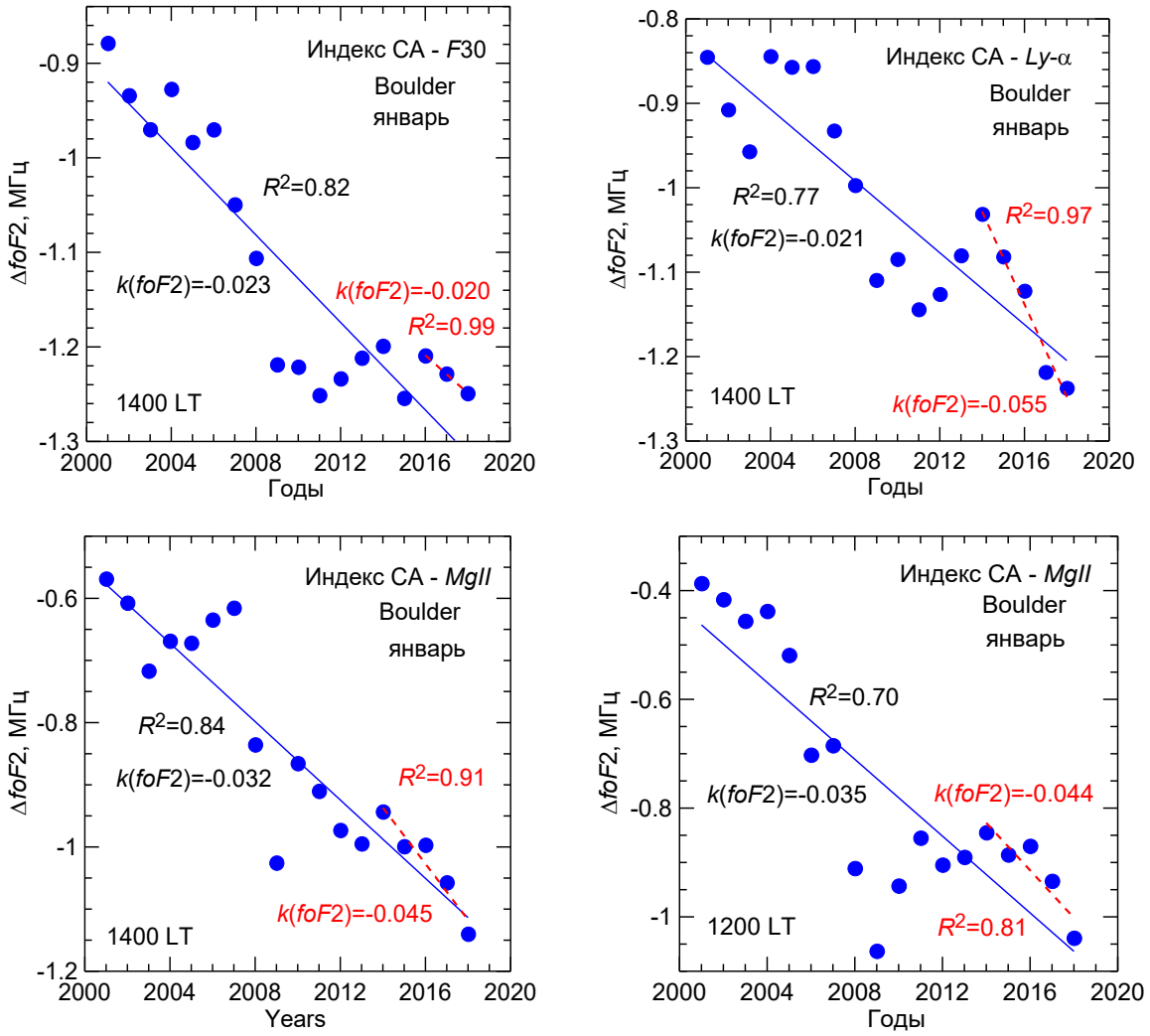


Рис. 3. Изменение  $\Delta foF2$  со временем для ст. Boulder в январе

Таблица 3. Величины  $k(foF2)$  для 1996–2023 г. для ст. Boulder

LT	Январь				Февраль			
	F30	Ly- $\alpha$	MgII	Среднее	F30	Ly- $\alpha$	MgII	Среднее
1000	-0.034	-0.030	-0.039		-0.035	-0.028	-0.040	
1100	-0.020	-0.017	-0.027		-0.029	-0.034	-0.043	
1200	-0.034	-0.025	-0.035		-0.021	-0.029	-0.042	
1300	-0.027	-0.020	-0.025		-0.026	-0.030	-0.043	
1400	-0.025	-0.021	-0.032		-0.024	-0.031	-0.042	
Среднее	-0.028	-0.023	-0.032	-0.028	-0.027	-0.030	-0.042	-0.033
SD	0.006	0.005	0.006	0.005	0.005	0.002	0.001	0.008

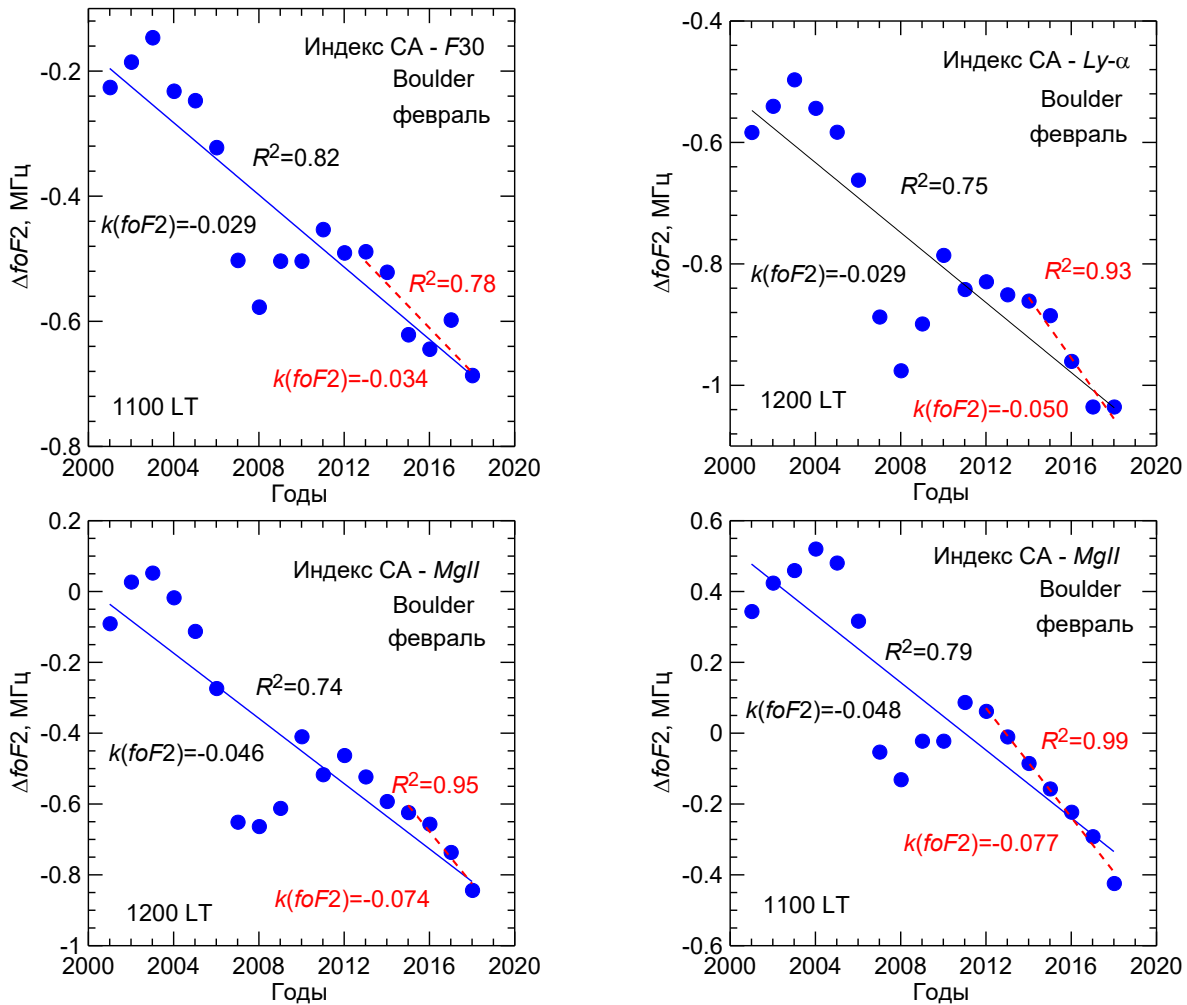
Рис. 4. Изменение  $\Delta foF2$  со временем для ст. Boulder в феврале

Таблица 2 показывает, что для ст. Moscow для двух индексов СА (F30 и MgII) для всех пяти моментов LT получают достаточно близкие величины  $k(foF2)$ , которые позволяют после усреднения получить средний тренд для околополуденных часов с относительно небольшой величиной SD.

Исключение составляет индекс Ly- $\alpha$ , для которого для трех моментов LT не удается получить систематического изменения  $\Delta foF2$  со временем – точки на рисунках 1–4 ведут себя хаотически. Поскольку при анализе всех моментов LT в данной ситуации используются одни и те же значения индекса Ly- $\alpha$ , причина эффекта может лежать только в ошибках в данных о медианах  $foF2$  для 1000, 1100 и 1300 LT, поскольку для 1200 и 1400 LT получается обычный ход  $\Delta foF2$  со временем, дающий разумные величины  $k(foF2)$ .

Видно также, что средние околополуденные величины  $k(foF2)$  достаточно близки для всех трех индексов СА. Например, для ст. Moscow в феврале, когда не обнаружено указанных проблем с трендами при использовании Ly- $\alpha$ , величины  $k(foF2)$  составляют  $-0.027$ ,  $-0.030$  и  $-0.042$  МГц/год при SD в пределах  $0.003$ – $0.006$  МГц/год. Для ст. Boulder проблем с трендами при использовании Ly- $\alpha$  не обнаружено – и в январе, и в феврале тренды, получаемые с помощью всех трех индексов СА, близки между собой.

Интересно сравнить также тренды, получаемые для каждого месяца после усреднения по всем моментам LT и индексам СА на разных станциях. В январе это  $-0.025$  МГц/год для ст. Moscow и  $-0.028$  МГц/год для ст. Boulder. В феврале эти величины равны, соответственно,  $-0.036$  МГц/год и  $-0.033$  МГц/год. Лучшего согласия ожидать просто невозможно.

В работе Данилова и др. [2023a] приведены результаты детального анализа суточных вариаций трендов  $foF2$  по данным ст. Juliusruh. В этой работе показано, что в дневные часы в суточном ходе  $k(foF2)$  наблюдается «плато»: в течение 5–7 часов величины  $foF2$  почти не меняются. Для сравнения с

приведенными выше результатами мы приводим в таблице 4 величины  $k(foF2)$  для этого «плато» из указанной статьи.

Таблица 4. Величины  $k(foF2)$  и длительность дневного «плато» для ст. Juliusruh

	$F30$		$Ly-\alpha$		$MgII$	
	LT	$k(foF2)$	LT	$k(foF2)$	LT	$k(foF2)$
январь	1100–1800	–0.038	1300–1800	–0.027	1000–1800	–0.031
февраль	1100–1800	–0.041	1100–1800	–0.034	1100–1800	–0.048

Как видно из этой таблицы, величины  $k(foF2)$  в дневное время по данным ст. Juliusruh лишь немного больше, чем соответствующие величины для ст. Moscow и Boulder в таблицах 2 и 3. В целом, на наш взгляд, согласие результатов для всех трех станций является хорошим.

### 3. СТАНЦИИ ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ

Для сравнения с результатами для станций Северного Полушария, описанными в предыдущем параграфе, мы провели поиски трендов тем же способом по данным станций Австралийского региона: Townsville, Hobart и Canberra. Выбор станций был обусловлен рассматриваемым интервалом средних широт и доступностью медиан  $foF2$  за два необходимых для нашего метода периода (1957–1980 гг. и 1996–2023 гг.) – эти медианы представлены на сайте Австралийского Центра Прогнозов Космической погоды.

Поскольку в этом параграфе речь идет о станциях Южного Полушария, мы анализировали два зимних месяца июнь и июль. Так же, как и при анализе станций Северного Полушария, для удаления эффектов солнечной активности мы использовали три индекса СА ( $F30$ ,  $MgII$  и  $Ly-\alpha$ ), которые, согласно нашим предыдущим исследованиям, являются наилучшими для описания зависимости  $foF2$  от СА. Анализировались те же пять околополуденных моментов LT, что и в предыдущем параграфе.

Результаты близки к результатам, полученным в предыдущем параграфе. Примеры зависимостей  $\Delta foF2$  от индексов СА приведены на рисунках 5 и 6 для ст. Townsville, на рисунках 7 и 8 для ст. Hobart и на рисунках 9 и 10 для ст. Canberra.

Как видно из приведенных рисунков, для обоих зимних месяцев на всех трех станциях наблюдается систематическое уменьшение величины  $\Delta foF2$  со временем, которое дает отрицательный тренд. Как и на рисунках 1–4, разброс точек относительно аппроксимирующей их прямой линии несколько различается (что естественно), однако все рисунки позволяют утверждать (в соответствии с приведенными на них величинами  $R^2$ ), что получаемый тренд имеет высокую статистическую значимость. Отметим, что, как и для станций Северного Полушария, в последние несколько лет наблюдается усиление отрицательного тренда (см. ниже).

Для каждой ситуации (станция, месяц) строилась таблица аналогичная таблице 1. Суммарный результат по каждой станции представлен в таблицах 5, 6 и 7.

Таблицы 5–7 показывают, что внутри каждой ситуации (станция, месяц, индекс СА) величины  $k(foF2)$  для разных моментов LT близки, что позволяет получить средние околополуденные тренды с небольшой среднеквадратической ошибкой. Соответственно, усреднение для данной станции и месяца по индексам СА также дает средние величины с относительно небольшими SD. Наконец, сравнение величин  $k(foF2)$ , усредненных по LT и индексам СА, дает достаточно близкие величины для разных станций. Так для июня эти величины равны –0.030, –0.024 и –0.026 МГц/год для ст. Townsville, Hobart и Canberra, соответственно. Эти величины для тех же станций для июля равны –0.024, –0.023 и –0.026 МГц/год. Как и для станций Северного Полушария в предыдущем параграфе, согласие можно считать очень хорошим.

Метод «Дельта», предложенный ранее [Данилов и Константинова, 2017] является наиболее наглядным методом определения характера и примерной амплитуды трендов  $foF2$ . Он основан на том же сравнении величин  $foF2$  для заданного индекса солнечной активности в «эталонный» период (1957–1980 гг.), когда не было трендов антропогенной природы, и в анализируемый период, как и основной метод. В тренде нет никаких искусственных процедур (сглаживания, усреднения и т. д.) – сравниваются

две кривые (зависимости  $foF2$  от выбранного индекса СА в каждом из периодов), и их различие и дает изменение  $foF2$  (величину Дельта) за время, прошедшее после «эталонного периода». Более подробное описание метода «Дельта» и результатов анализа этим методом данных для ст. Juliusruh можно найти в недавней работе авторов [Данилов и др. 2023б].

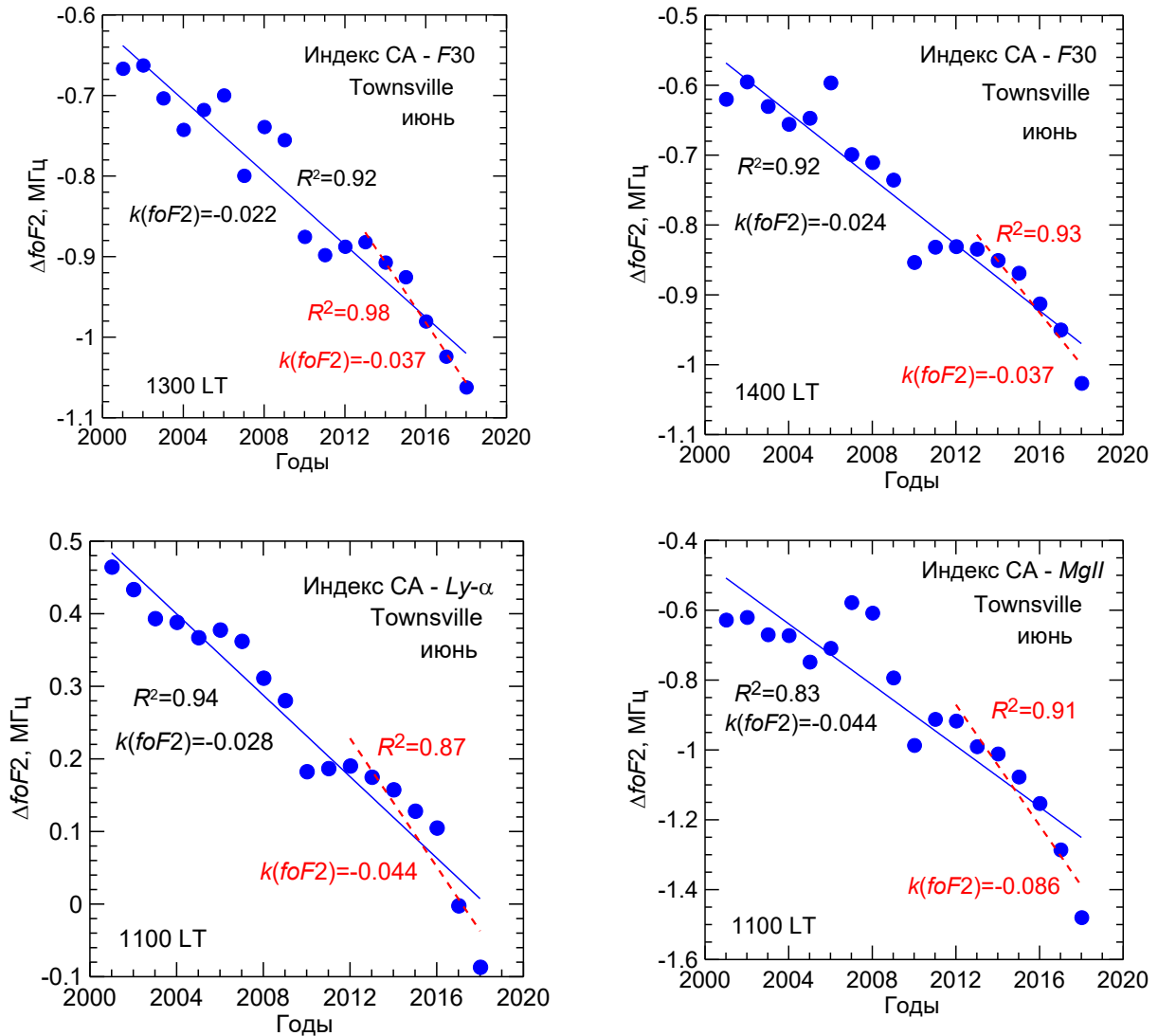


Рис. 5. Изменение  $\Delta foF2$  со временем для ст. Townsville в июне

Таблица 5. Тренды в МГц/год для 1996–2023 гг. в июне на ст. Townsville и Hobart

LT	Townsville				Hobart			
	F30	$Ly-\alpha$	MgII	Среднее	F30	$Ly-\alpha$	MgII	Среднее
1000	-0.041	-0.034	-0.044		-0.018	-0.006	-0.022	
1100	-0.040	-0.028	-0.044		-0.025	-0.011	-0.024	
1200	-0.034	-0.018	-0.031		-0.028	-0.019	-0.026	
1300	-0.022	-0.019	-0.027		-0.042	-0.028	-0.036	
1400	-0.024	-0.013	-0.032		-0.035	-0.018	-0.026	
Среднее	-0.032	-0.022	-0.036	-0.030	-0.030	-0.016	-0.027	-0.024
SD	0.009	0.008	0.008	0.007	0.009	0.008	0.005	0.007



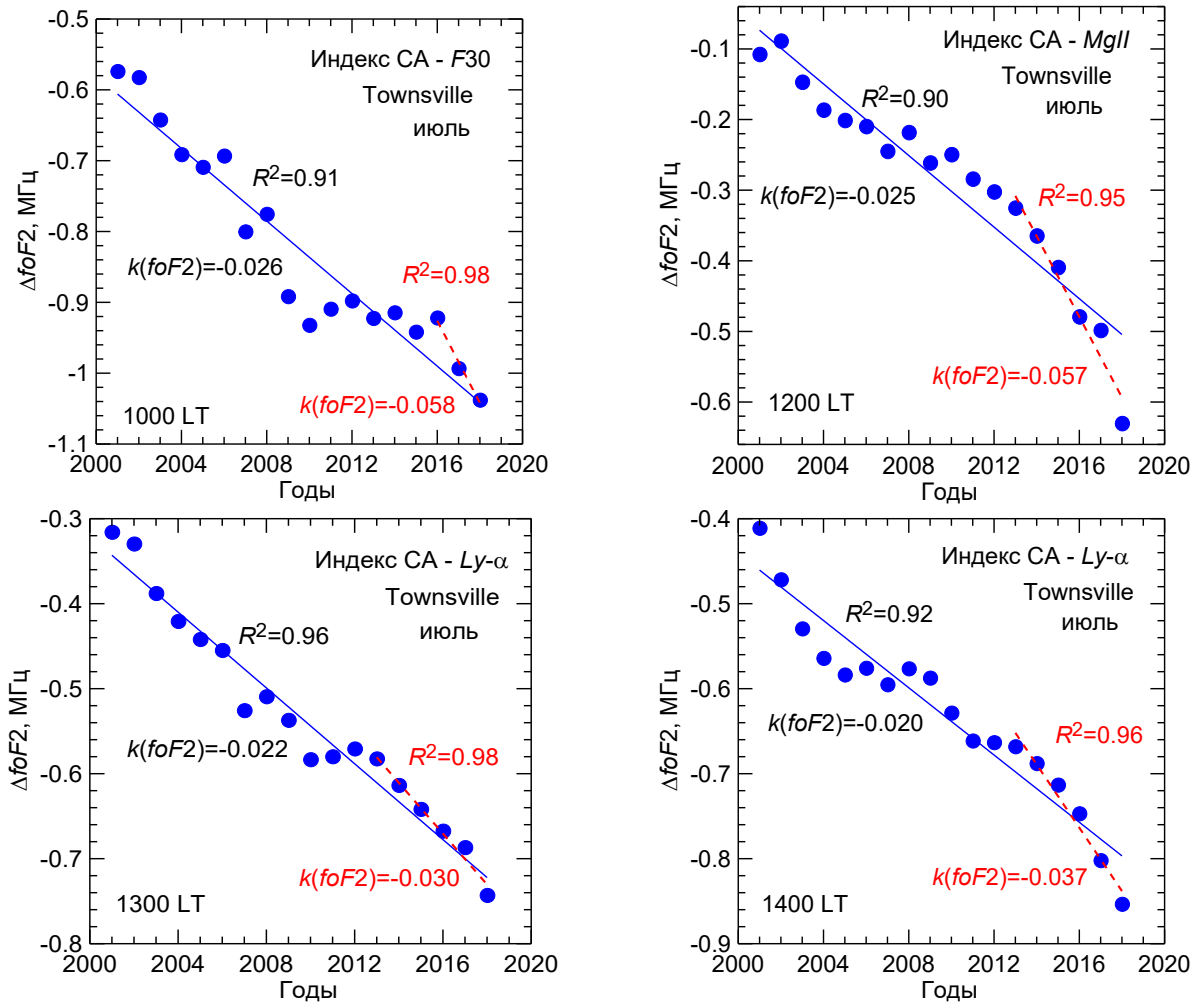


Рис. 6. Изменение  $\Delta foF2$  со временем для ст. Townsville в июле

Таблица 6. Тренды в МГц/год для 1996–2023 гг. в июле на ст. Townsville и Hobart

LT	Townsville				Hobart			
	F30	Ly- $\alpha$	MgII	Среднее	F30	Ly- $\alpha$	MgII	Среднее
10 00	-0.026	-0.022	-0.033		-0.020	-0.011	-0.023	
11 00	-0.028	-0.021	-0.031		-0.020	-0.018	-0.023	
12 00	-0.014	-0.010	-0.025		-0.025	-0.019	-0.025	
13 00	-0.024	-0.022	-0.027		-0.031	-0.027	-0.03	
14 00	-0.029	-0.020	-0.032		-0.031	-0.019	-0.028	
Среднее	-0.024	-0.019	-0.030	-0.024	-0.025	-0.019	-0.026	-0.023
SD	0.006	0.005	0.003	0.006	0.006	0.006	0.003	0.004

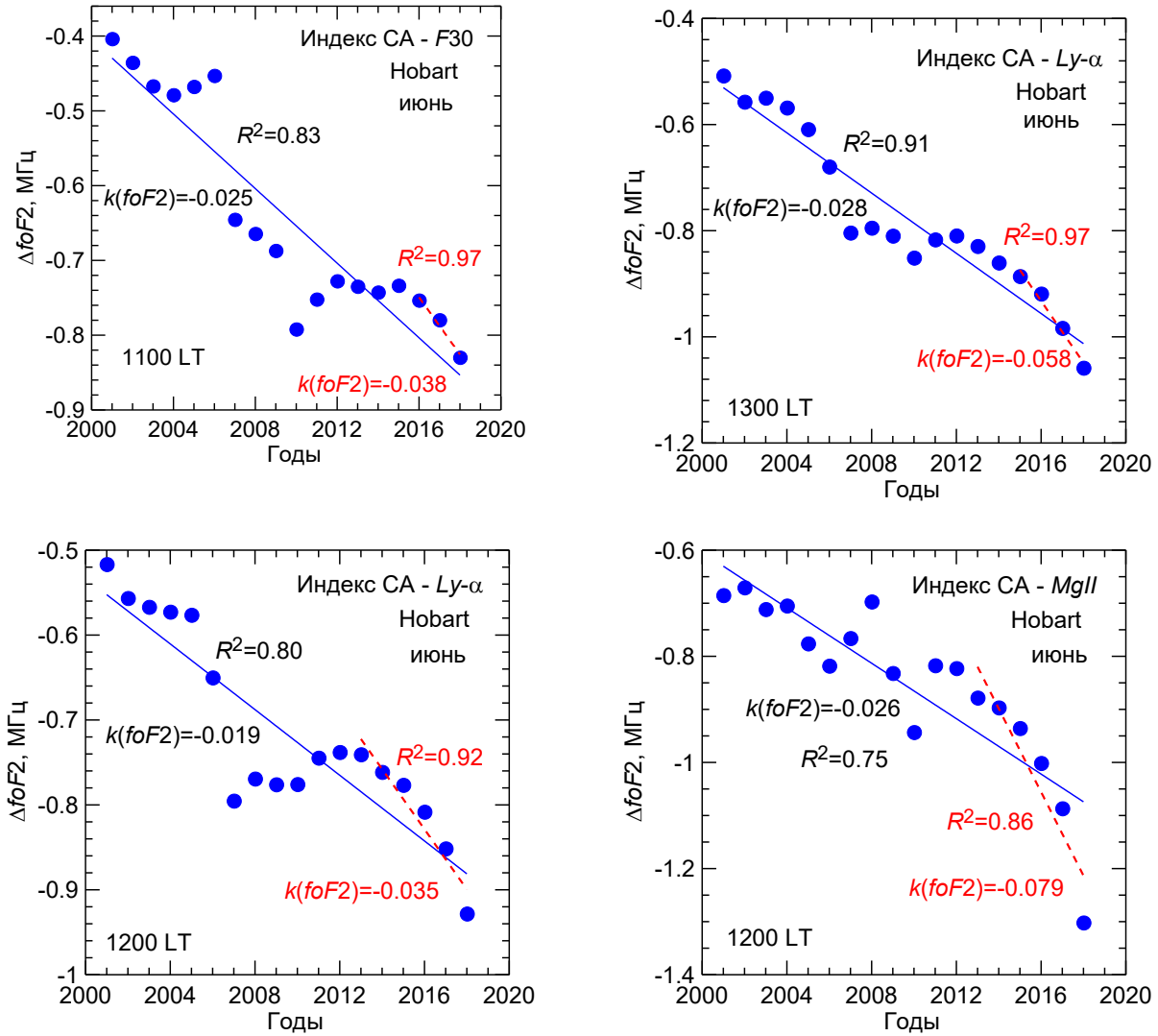


Рис. 7. Изменение  $\Delta foF2$  со временем для ст. Hobart в июне

Таблица 7. Тренды в МГц/год для 1996–2023 гг. в июне и июле на ст. Canberra

LT	Июнь				Июль			
	F30	Ly- $\alpha$	MgII	Среднее	F30	Ly- $\alpha$	MgII	Среднее
1000	-0.026	-0.018	-0.037		-0.023	-0.017	-0.029	
1100	-0.029	-0.017	-0.042		-0.024	-0.017	-0.028	
1200	-0.026	-0.014	-0.038		-0.023	-0.019	-0.03	
1300	-0.022	-0.01	-0.034		-0.032	-0.027	-0.042	
1400	-0.028	-0.014	-0.037		-0.029	-0.020	-0.037	
Среднее	-0.026	-0.015	-0.038	-0.026	-0.026	-0.020	-0.033	-0.026
SD	0.003	0.003	0.003	0.012	0.004	0.004	0.006	0.007

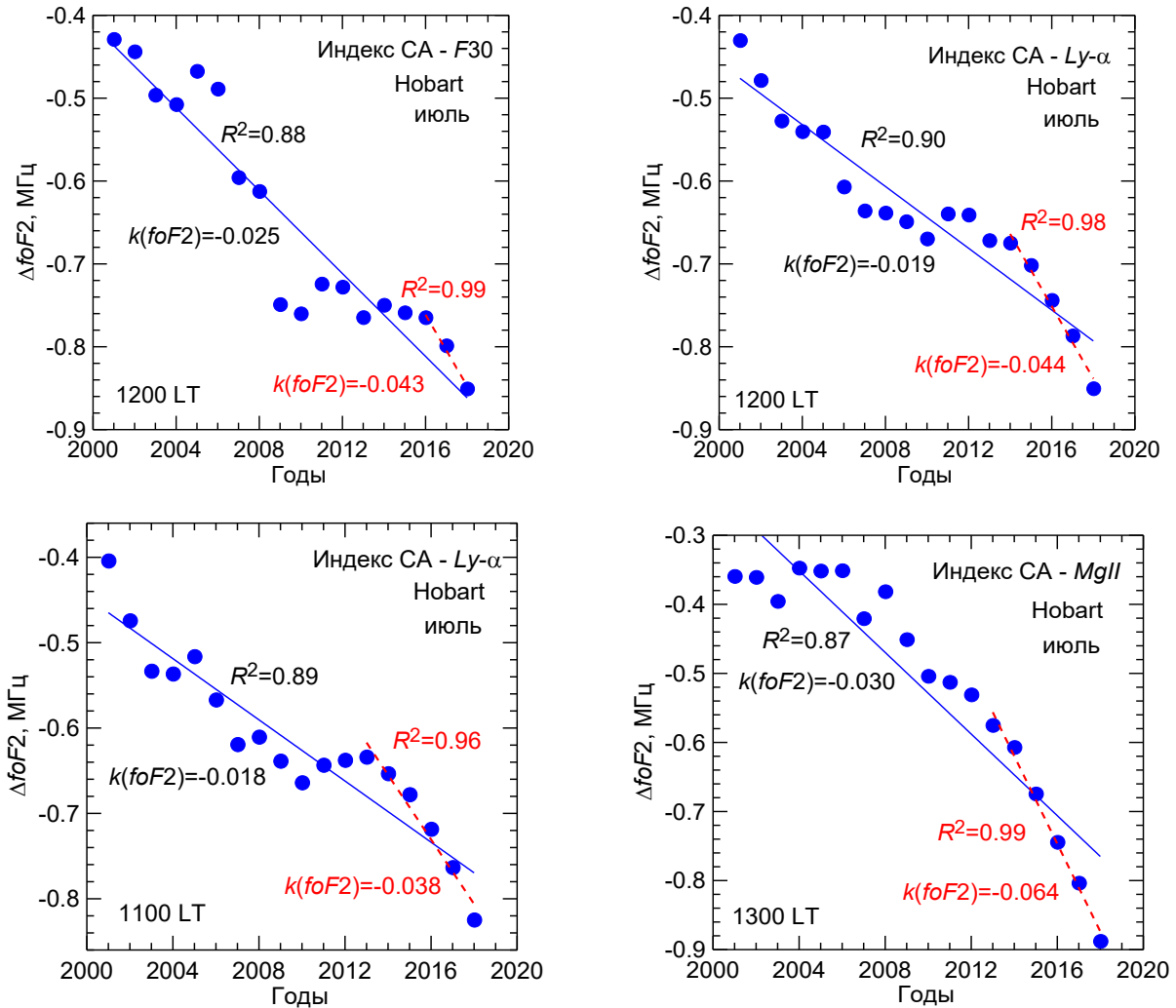


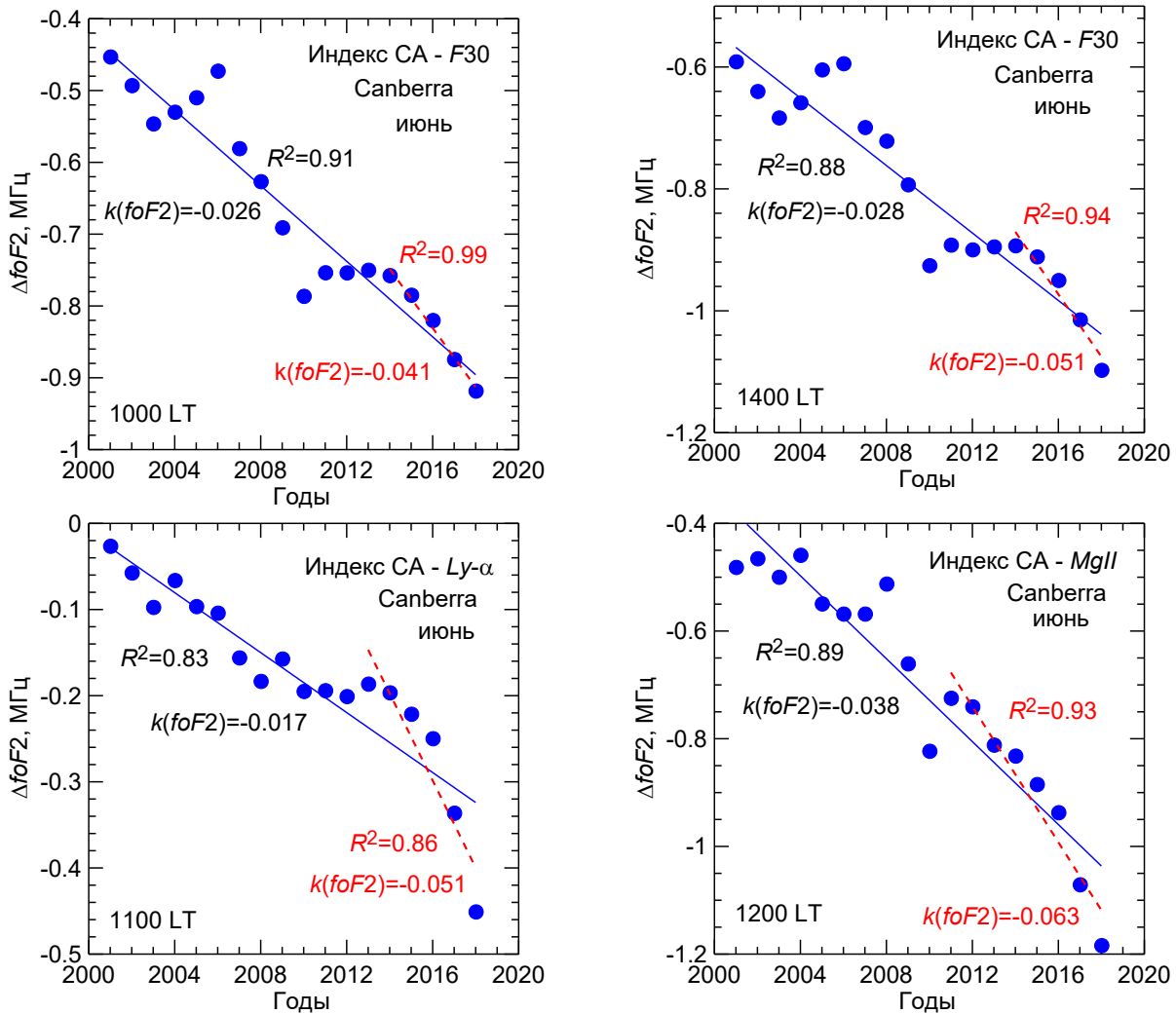
Рис. 8. Изменение  $\Delta foF2$  со временем для ст. Hobart в июле

Детальное исследование методом «Дельта» трендов для многих станций требует отдельной публикации. Мы ограничимся здесь лишь примерами построения зависимостей критической частоты от индекса СА для двух периодов, позволяющих наглядно увидеть тенденцию изменения  $foF2$  от одного периода к другому.

Примеры зависимости месячных медиан  $foF2$  от различных индексов СА в «эталонный» и анализируемый периоды приведены на рисунке 11. Точки – чисто экспериментальные величины медианы  $foF2$  для соответствующего месяца и момента LT, нанесенные как функция индекса СА для данного месяца. Кривые – аппроксимация этих точек полиномом 3-й степени. Возле кривых приведены интервалы лет и величины коэффициента определенности по критерию Фишера.

Как видно из примеров, приведенных на рисунке 11, кривые аппроксимации зависимости  $foF2$  от индекса СА идут для анализируемого периода существенно ниже, чем для эталонного. Усреднение разницы между двумя кривыми и дает искомую величину Дельта. Для панелей рисунка 11 она равна, соответственно,  $-0.77$ ,  $-1.10$ ,  $-0.93$ , и  $-0.93$  МГц. Иначе говоря, уменьшение  $foF2$  между двумя рассмотренными временными интервалами составляет около 1 МГц.

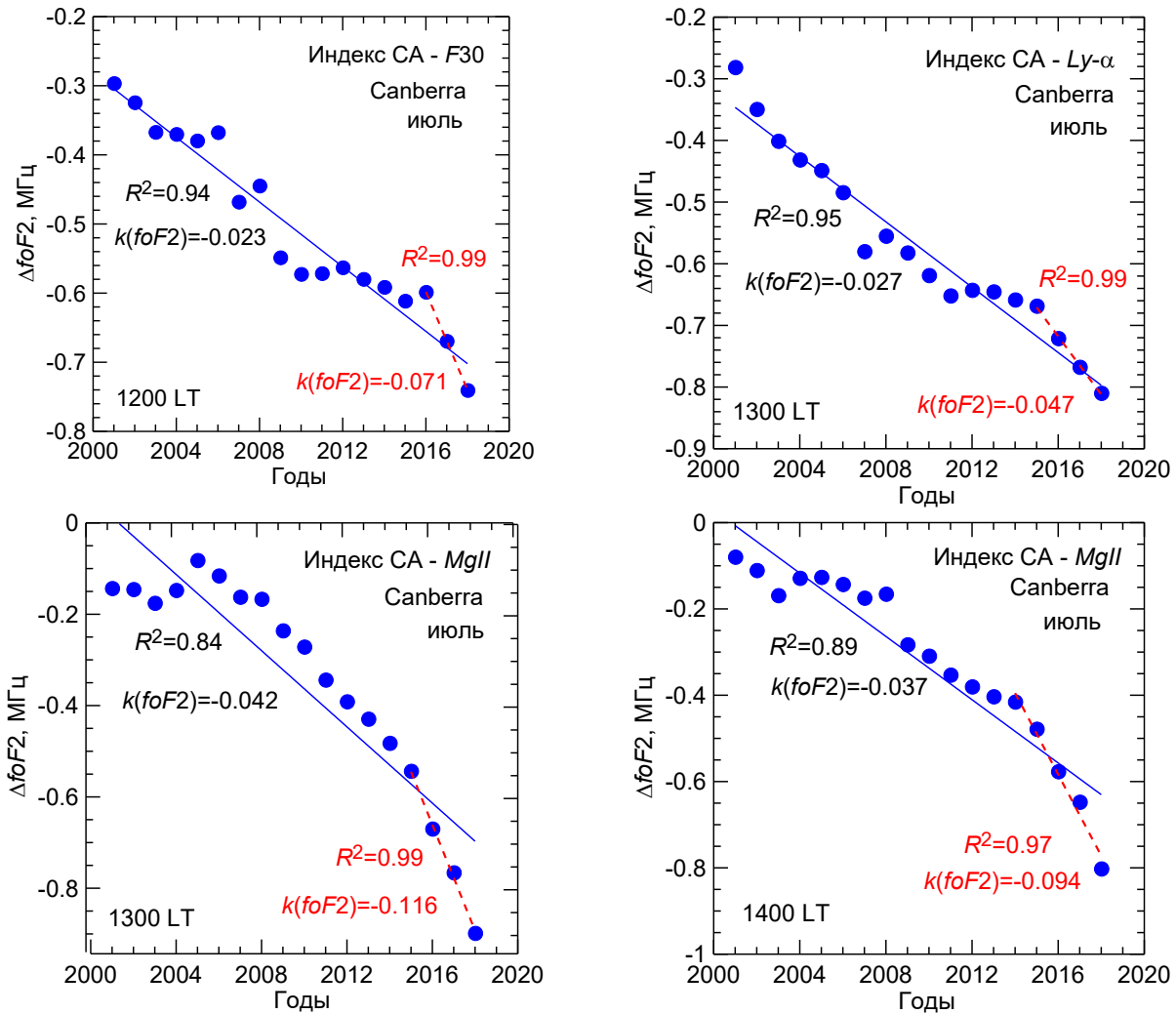
Как уже указывалось выше, этот метод не дает величин тренда  $k(foF2)$ . Но тенденция уменьшения величин  $foF2$  от эталонного периода к анализируемому хорошо видна. Это согласуется с конкретными величинами трендов, полученными в этом и предыдущем параграфах.

Рис. 9. Изменение  $\Delta foF2$  со временем для ст. Canberra в июне

#### 4. НЕДАВНИЕ ГОДЫ

В работах [Данилов и Бербенева, 2023а; Danilov and Berbeneva, 2023] уже рассматривался вопрос об усилении отрицательных трендов  $foF2$  в недавние годы. Но в указанных статьях анализировались данные только одной станции Juliusruh до 2022 г. В данной работе мы анализируем эту проблему на основании данных всех шести рассмотренных станций с добавлением величин  $foF2$  за 2023 г.

На всех рисунках 1–10 кроме основной линии, показывающей тренд  $foF2$  за период 1996–2023 гг., приводится также штриховая линия, показывающая тенденцию изменения величин  $\Delta foF2$  в течение недавних лет. Эта линия на всех рисунках кончается в конце анализируемого временного интервала, а начинается в разные годы. Мы во всех случаях начинали ее там, где наблюдается заметный «излом» в изменении точек со временем, поэтому длина периода, для которого анализируется величина  $\Delta foF2$  различна – от трех до восьми лет. Конечно, при таком подходе в определении величины  $k(foF2)$  есть элемент произвола. Однако это касается только амплитуды трендов, тогда как сам факт «убыстрения» падения величин  $\Delta foF2$  в недавние годы сомнения не вызывает. На всех приведенных выше рисунках отрицательные величины  $k(foF2)$  для недавних лет больше по абсолютной величине, чем для всего периода 1996–2023 гг.

Рис. 10. Изменение  $\Delta foF2$  со временем для ст. Canberra в июле

В силу упомянутого выше метода проведения аппроксимирующей линии для недавних лет, величины  $k(foF2)$  для этого периода для заданной ситуации (станция, месяц) меняются от одного момента LT к другому гораздо сильнее, чем величины  $k(foF2)$  для всего периода. Судить о степени этой изменчивости можно по данным таблицы 1, приведенной для примера выше в параграфе 1.

Получаемые для недавних лет величины  $k(foF2)$  лежат в широких пределах и для некоторых ситуаций опускаются ниже  $-0.1$ . Однако, наиболее часто встречающиеся значения лежат в пределах от  $-0.04$  до  $-0.07$  МГц/год.

Тот факт, что эффект усиления отрицательных трендов обнаружен для подавляющего большинства ситуаций (месяц, момент LT, индекс CA) на всех рассмотренных станциях в обоих полушариях важен, поскольку тем самым исключается объяснение этого эффекта какими-то локальными особенностями изменения  $foF2$  со временем.

Насколько надежен вывод об усилении отрицательных трендов  $foF2$  в недавние годы можно будет с большей уверенностью судить только через несколько лет. Однако, тот факт, что добавление к анализу данных за 2023 г. лишь усиливает эффект, который обсуждается в работах [5] на основании данных до 2022 г., увеличивает вероятность того, что эффект реален.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже указывалось выше, основной целью данной работы был анализ изменений критической частоты  $foF2$  со временем в течение последних десятилетий. Поскольку ранее уже было неоднократно показано (см., например, Данилов и Бербенева [2023а] и Данилов и др. [2023б]), что отрицательные

тренды  $foF2$  максимальны зимой и практически отсутствуют летом, а также максимальны днем

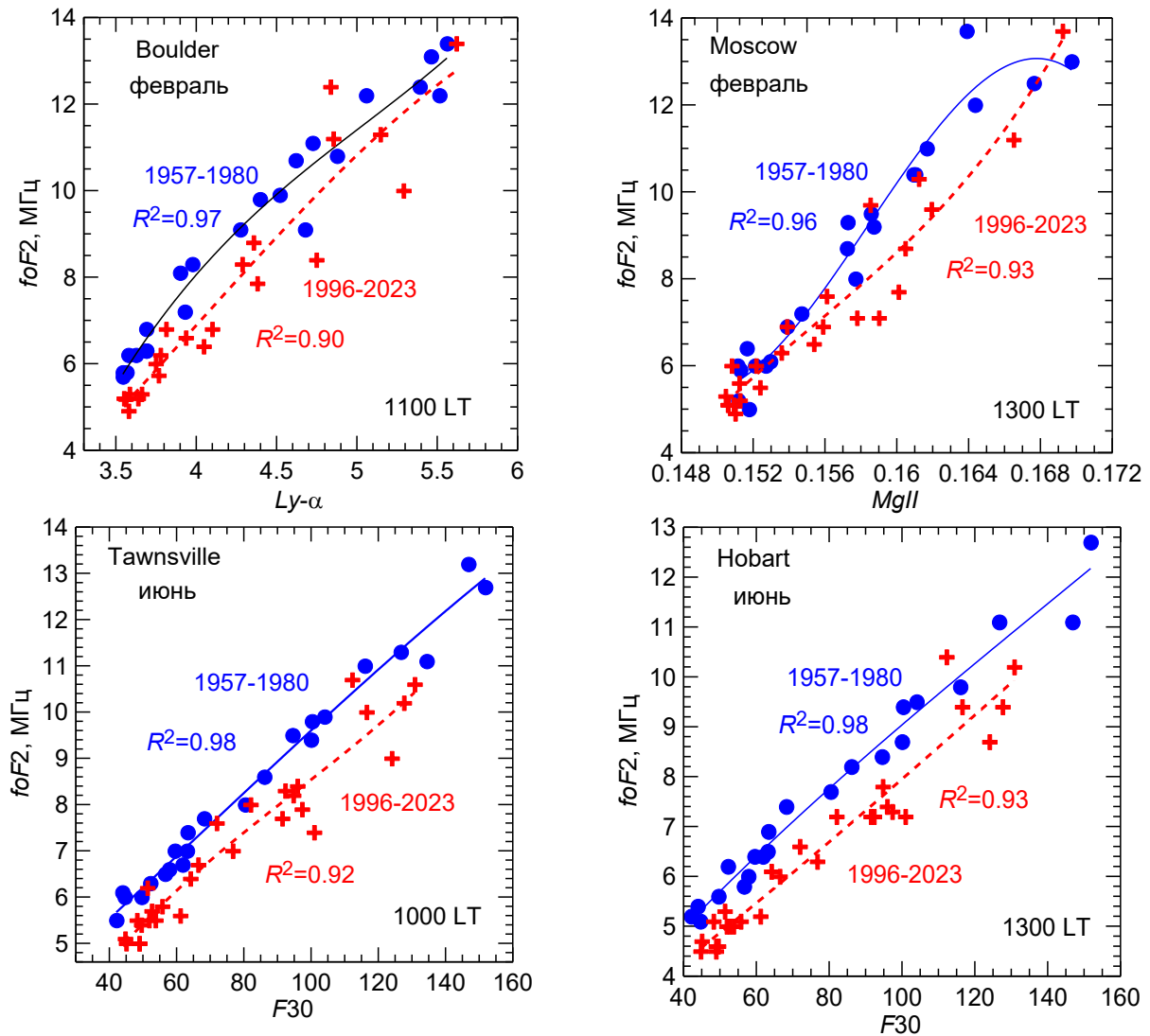


Рис. 11. Примеры зависимости  $foF2$  от индексов СА для двух временных интервалов

и минимальны ночью, мы выбрали для анализа два зимних месяца и околополуденный период 1000–1400 LT. При этом для увеличения надежности получаемых выводов мы выбрали в Северном и Южном полушариях по три станции, для которых смогли найти месячные медианы  $foF2$  для двух необходимых для анализа периодов: 1957–1980 и 1996–2023 гг.

На первый взгляд сравнивать результаты для станций двух полушарий трудно, поскольку результаты относятся к разным месяцам. Но поскольку в обоих параграфах мы анализируем таком образом типичные летние величины  $k(foF2)$ , такое сравнение вполне правомерно.

Если усреднить условно величины  $k(foF2)$  по всем трем станциям Северного Полушария, мы получим  $(-0.025-0.028-0.032)/3 = -0.028$  МГц/год для января и  $(-0.041-0.036-0.033)/3 = -0.038$  МГц/год для февраля. А соответствующее усреднение по трем станциям Южного полушария дает  $(-0.030-0.024-0.026)/3 = -0.027$  МГц/год для июня и  $(-0.024-0.023-0.026)/3 = -0.024$  МГц/год для июля.

На наш взгляд близость найденных зимних величин  $k(foF2)$  для разных станций в разных полушариях является подтверждением надежности полученных выводов о знаке и амплитуде трендов  $foF2$ . Следует подчеркнуть, что в каждой ситуации для устранения эффектов солнечной активности мы использовали три индекса СА ( $F30$ ,  $Ly-\alpha$  и  $MgII$ ), которые согласно недавнему исследованию [Данилов и Бербенева, 2023б] являются наилучшими для описания изменения  $foF2$  со временем.

Приведенные результаты подтверждают наши предыдущие выводы о том, что в течение последних десятилетий происходит систематическое уменьшение критической частоты слоя  $F2$ , т. е. тренды  $foF2$  отрицательны. Этот вывод согласуется со многими исследованиями последних лет (см.

недавний обзор Lastovicka [2023]). В частности, вывод о том, что амплитуда отрицательных трендов  $foF2$  имеет выраженный суточный ход (днем больше, чем ночью) получен также в работе [Yue et al. [2017].

Работа [Duran et al., 2023] была специально посвящена проблеме суточных и сезонных вариаций трендов  $foF2$ . В частности, был получен суточный ход  $k(foF2)$ : наиболее сильный отрицательный тренд наблюдается в дневные часы, тогда как ночью он слаб. При этом было получено, что максимальные отрицательные тренды днем могут достигать  $-(0.03-0.04)$  МГц в год, что близко к величинам  $k(foF2)$ , полученным в данной работе.

То, что для пяти окологолуденных моментов LT в каждой ситуации получились достаточно близкие результаты, подтверждает вывод [Данилов и Бербенева, 2023а; Данилов и др., 2023б] о том, что в суточном ходе трендов  $foF2$  существует «плато» в дневные часы, когда величины  $k(foF2)$  практически неизменны. Этот вывод важен для выбора данных для анализа трендов критической частоты. Например, в работе Laštovička [2023а] как раз анализируются тренды  $foF2$  для 1100–1300 LT, что исключает мешающее влияние суточных вариаций на получаемые величины трендов.

Нам представляется, что подтверждение вывода об усилении отрицательных трендов  $foF2$  в последние годы, который был получен ранее [Данилов и др. 2023а, б; Данилов и Бербенева 2023а] также является важным результатом данной работы. Если это усиление действительно происходит, то уже скоро можно ожидать заметных эффектов в распространении КВ радиоволн, вызванных отрицательными трендами  $foF2$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы надеемся, что полученные в данной работе результаты являются еще одним подтверждением нашей концепции заметных отрицательных трендов критической частоты  $foF2$  в течение последних десятилетий. На наш взгляд важен факт, что получены близкие по амплитуде отрицательные тренды для разных месяцев (январь/февраль с одной стороны и июнь/июль с другой), которые являются, однако, зимними месяцами для Северного и Южного полушарий.

Подавляющее большинство полученных для различных ситуаций (станция, месяц, индекс SA, момент LT) величин  $k(foF2)$  лежит в интервале от  $-0.020$  до  $-0.045$  МГц/год. Усреднение всех данных по каждому полушарию дает два значения, близких к  $-0.025$  МГц/год. Эту цифру можно считать основным результатом работы.

Отличие наших результатов от результатов некоторых других исследований связано на наш взгляд с более точным учетом в наших исследованиях влияния эффектов солнечной активности. При анализе всего ряда данных за много десятилетий, как это делается во многих работах по поиску трендов, есть опасность того, что для исключения эффектов SA используются данные, которые уже «загрязнены» трендами.

Наконец, подтверждение полученного ранее вывода об усилении отрицательных трендов в последние годы может оказаться важным для всей концепции возникновения и развития долговременных изменений в ионосфере и термосфере.

## ЛИТЕРАТУРА

- Данилов А. Д., Бербенева Н. А. Тренды критической частоты слоя F2 в последнее десятилетие. Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63 №2 С. 139–146. 2023а.
- Данилов А. Д., Бербенева Н. А. Статистический анализ зависимости критической частоты  $foF2$  от различных индексов солнечной активности. Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. №5. С. 619–629. 2023б.
- Данилов А. Д., Бербенева Н. А. Дальнейший детальный анализ зависимости  $fof2$  от солнечной активности. Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. №2. 2024.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Поведение параметров слоя F2 на грани веков. 1. Критическая частота. Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53, № 3, с. 361–372. 2013.
- 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.

- Данилов А. Д., Константинова А. В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор). Геомagnetизм и аэрoномия. Т. 60. №4. С. 411–435. 2020.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Бербенева Н. А. Анализ трендов  $fof2$  до 2022 г. с использованием разных индексов солнечной активности. Гелиогеофизические исследования. Вып. 37. С. 42–54. 2023а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Бербенева Н. А. Детальный анализ суточных вариаций трендов  $foF2$ . Гелиогеофизические исследования. Вып. 39. С. 8–16. 2023б.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Бербенева Н. А. Дальнейший детальный анализ зависимости  $foF2$  от солнечной активности. Гелиогеофизические исследования. Вып. 40 С. 68-80. 2023.
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Trends in foF2 to 2022 and various solar activity indices. Adv. Space Res.V. 71. N 11. P.4594–4603. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.028>
- 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. 177, 1071–1078. 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 Appl. Geophys. 178, 4605–4618. 2021.
- Laštovička J.: A review of recent progress in trends in the upper atmosphere. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 163. P. 2–13. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.009>, 2017.
- Laštovička J. Long-Term Changes in Ionospheric Climate in Terms of foF2. Atmosphere. V. 13 P. 110. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13010110>
- Laštovička J. Dependence of long-term trends in foF2 at middle latitudes on different solar activity proxies. Adv. Space Res. 2023a. DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.047
- Laštovička J. Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere. Atmos. Chem. Phys. V. 23. P. 5783–5800. 2023b. <https://doi.org/10.5194/acp-23-5783-2023>
- Laštovička J., Burešová D., Relationships Between foF2 and Various Solar Activity Proxies. Space Weather V. 21, No. e2022SW003359. <https://doi.org/10.1029/2022SW003359> 2023.
- Yue X., Hu L., Wei Y., Wan W., Ning B. Ionospheric trend over Wuhan during 1947–2017: Comparison between simulation and observation // J. Geophys. Res.– Space. V. 123. N 2. P. 1396–1409. 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JA024675>.
- Duran T, Melendi Y., Zossi B. S., de Haro Barbas B. F., Buezas F. S., Juan A., Elias A.G. Contribution to ionospheric F2 region long-term trend studies through seasonal and diurnal pattern analysis. GLOPLACHA-D-23-00189. 2023.

## TRENDS IN THE CRITICAL FREQUENCY $foF2$ ACCORDING TO THE DATA OF THE NORTHERN AND SOUTHERN HEMISPHERE STATIONS

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

A search of long-term trends in the F2-layer critical frequency,  $foF2$ , is performed based on the vertical sounding observations at three stations of the Northern Hemisphere (Juliusruh, Boulder, and Moscow) and three stations of the Southern Hemisphere (Townsville, Hobart, and Canberra). Method developed and numerously used by the authors before was implemented. The data for two winter months in each hemisphere and five near-noon LT moments were analyzed. To get rid of the solar activity effects, three SA proxies (F30, Ly- $\alpha$ , и MgII) were used. Negative trends are obtained for all considered situations (station, month, LT moment, SA proxy). They agree well both at a comparison with each other and at a comparison of the stations of the Northern and Southern Hemispheres separately as well as of the values averaged over each hemisphere.

**KEYWORDS:** IONOSPHERIC LAYER F2, LONG-TERM TRENDS