



УДК 550.388.2

## ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ВЫСОТЫ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F2

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 академика Е.К. Федорова (ИПГ), Москва, Россия<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Проведен анализ долговременные вариации (трендов) высоты ионосферного слоя  $F2$   $hmF2$  по данным станций Moscow и Juliusruh до 2023 г. Рассматриваются околополуденные часы LT и два зимних (январь и февраль) и два летних (июнь и июль) месяца за период 1996–2023 гг. Получены хорошо выраженные и статистически значимые отрицательные тренды  $hmF2$  как летом, так и зимой. В среднем высота слоя  $F2$  уменьшалась в течение анализируемого периода на 0.5–1 км в год. К тем же данным применен метод «Дельта», разработанный и опубликованный авторами ранее. Результаты подтверждают систематическое уменьшение величины  $hmF2$  в течение последних двух десятилетий. Обнаружено, что в течение недавних нескольких лет высота слоя  $F2$  уменьшается быстрее, чем в предыдущие годы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРНЫЙ СЛОЙ F2, ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ, СЛОЙ F2

EDN XSFZJO

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долговременных трендов параметров ионосферных слоев хорошо известна и активно обсуждается в литературе. Сошлемся на недавний обзор Laštovička [2023].

В течение предыдущего десятилетия появилось много публикаций, посвященных выделению трендов критической частоты слоя  $F2$ ,  $foF2$ . Ссылки можно найти в указанном обзоре Laštovička [2023], обзоре авторов [Данилов и Константинова, 2020], а также в недавней работе авторов [Данилов и др., 2024]. Известны публикации и по поискам трендов критической частоты слоя  $E$ ,  $foE$  [Данилов и Константинова, 2018; Bremer 2006]. А вот работ по поиску трендов высоты слоя  $F2$ ,  $hmF2$ , не публиковалось давно.

Данилов и Константинова [2013] опубликовали результаты анализа данных по  $hmF2$  по наблюдениям на 10 станциях вертикального зондирования (ВЗ) до 2010 г. Было получено, что тренды  $hmF2$  отрицательны и лежат в пределах от 1.2 до 3.1 км в год.

В этой работе мы анализируем данные наблюдений до 2023 г методом ВЗ на станциях Moscow и Juliusruh. Мы применяем метод, неоднократно использованный нами для анализа как  $foF2$ , так и  $hmF2$ . Достаточно подробное описание метода можно найти в работе Данилова и Бербенева [2023]. Здесь мы напомним только, что метод основан на сравнении величин  $foF2$  (или  $hmF2$ ) в течение двух последних десятилетий с величинами  $foF2$  (или  $hmF2$ ) для тех же условий в течение «эталонного»

Электронная почта авторов для переписки:

Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: adanilov99@mail.ru

<https://elibrary.ru/xsfzjo>Адрес редакции журнала  
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»  
129128; Россия, Москва  
ул. Ростокинская, 9.  
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

периода 1957–1980 гг., когда еще не было ионосферных трендов антропогенной природы. Между соответствующими величинами  $foF2$  (или  $hmF2$ ) вычисляется разница  $\Delta foF2$  ( $\Delta hmF2$ ), изменение которой со временем в течение анализируемого периода и дает искомый тренд  $k(foF2)$  ( $k(hmF2)$ ).

Из банков ионосферных данных были взяты величины  $M3000$  для периодов 1957–1980 гг. (эталонный) и 1996–2023 гг. (анализируемый). Величина  $hmF2$  вычислялась из  $M3000$  по известной формуле Shimazaki. Анализировались данные за два зимних (январь и февраль) и два летних (июнь и июль) месяца.

Для устранения эффектов солнечной активности (СА) мы использовали три индекса СА ( $F30$ ,  $Ly-\alpha$  и  $MgII$ ), которые являются наилучшими для выделения трендов ионосферных параметров (см. [Данилов и Бербенева, 2024; Данилов и др., 2023в; Danilov and Berbeneva, 2023]). Этот выбор согласуется с результатами других авторов [Perna and Pezzopane, 2016; Gulyaeva et al., 2018; De Haro Barbás et al., 2021; Laštovička and Buresova, 2023; Laštovička, 2024]

Аналогичным образом, поскольку известно [Данилов и др. 2023б; Yue et al., 2018], что тренды  $foF2$  лучше всего выражены в дневное время суток, мы в данной работе рассматривали околополуденные моменты 10:00–14:00 LT.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ СТ. MOSCOW

Изменение  $\Delta hmF2$  со временем в январе и феврале для ст. Moscow представлено на рисунках 1 и 2. Известно (см., например, [Данилов и др. 2023б]), что тренды критической частоты слоя  $F2$ ,  $foF2$ , наиболее выражены в зимние месяцы. Как видно из приведенных рисунков, для всех использованных индексов СА в течение анализируемого периода наблюдается уменьшение  $\Delta hmF2$  со временем. Линейная аппроксимация этого уменьшения (сплошная линия) дает отрицательный тренд высоты,  $k(hmF2)$ . На всех рисунках и во всех таблицах величины  $k(hmF2)$  приведены в единицах км/год.

При анализе трендов  $foF2$  было обнаружено [Данилов и Бербенева, 2023; Данилов и др. 2024], что в последние несколько лет градиент падения  $\Delta foF2$  увеличивается, т. е. увеличивается амплитуда отрицательного тренда  $foF2$ ,  $k(foF2)$ . Такая же картина наблюдается на рисунках 1 и 2 и для тренда  $hmF2$ . Мы вернемся к этой проблеме ниже.

Результаты для каждой ситуации (станция, месяц, индекс СА) сводились в таблицу. Пример приведен в таблице 1. Она показывает тренды  $hmF2$  для всего анализируемого периода 1996–2023 гг. с соответствующими величинами  $R^2$  (коэффициент определенности согласно F-тесту Фишера) и тренды за недавние годы также с соответствующими величинами  $R^2$ . Величины SD показывают среднеквадратическую ошибку при усреднении по всем моментам LT.

Таблица 1. Величины  $k(hmF2)$  для ситуации Moscow, февраль,  $Ly-\alpha$

LT	1996-2023	$R^2$	недавн.	R2
10:00	-0.6	0.79	-1.29	0.99
11:00	-0.39	0.69	-0.82	0.98
12:00	-0.6	0.94	-0.6	0.94
13:00	-0.65	0.6	-1.37	0.99
14:00	-0.76	0.95	-0.76	0.95
Сред.	-0.6		-0.97	
SD	0.13		0.34	

Сводка полученных трендов  $hmF2$  для всего анализируемого периода 1996–2023 гг. для двух зимних месяцев и всех трех индексов СА приведена в таблице 2. В строках «Сред.» и «SD» приводятся результаты усреднения по всем моментам LT для данного индекса СА и соответствующее среднеквадратическое отклонение для этого усреднения. В столбце «Сред.» приводится результат усреднения для данного месяца по всем трем индексам СА и соответствующее среднеквадратическое отклонение для этого усреднения. Такой формат сохраняется и для всех последующих таблиц.

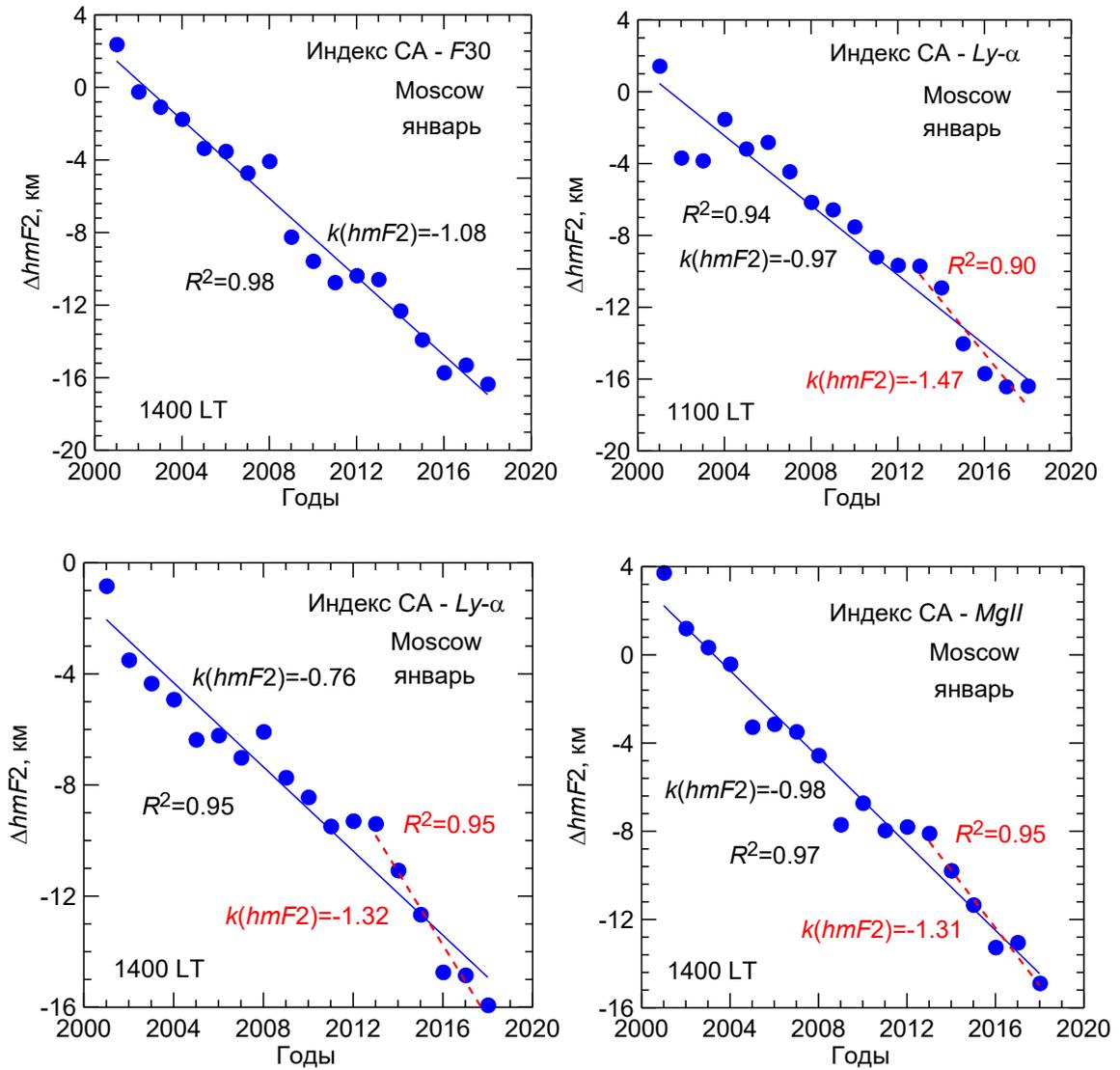
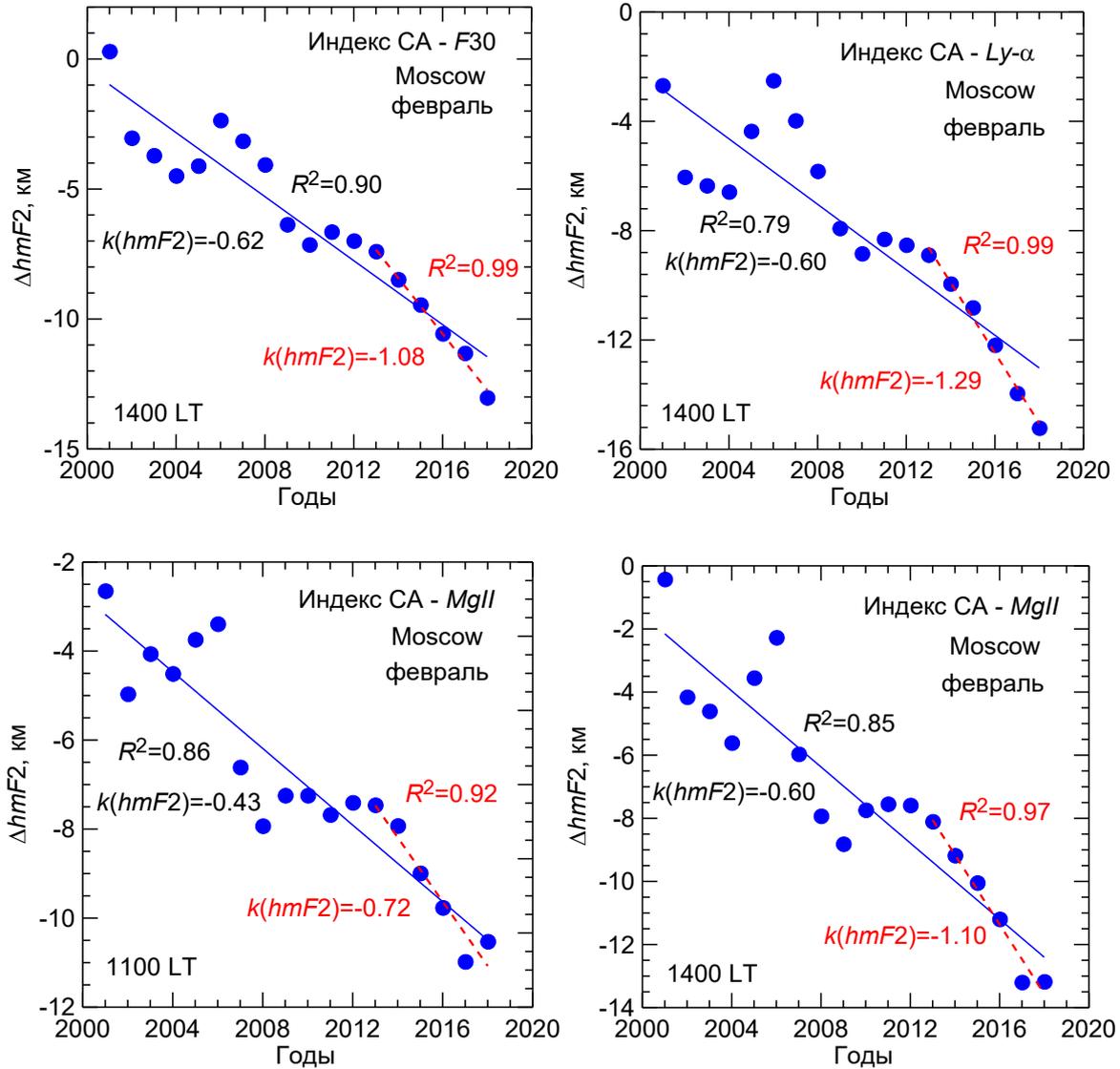


Рис. 1. Изменение  $\Delta hmF2$  со временем в январе для ст. Moscow

Таблица 2. Тренды  $hmF2$  для 1996–2023 для ст. Moscow (январь и февраль)

февраль					январь				
LT	F30	Ly-a	MgII	Сред.	LT	F30	Ly-a	MgII	Сред.
10:00	-0.87	-0.6	-0.65		10:00	-0.94	-0.94	-0.96	
11:00	-0.53	-0.39	-0.43		11:00	-1.02	-0.97	-0.96	
12:00	-0.61	-0.6	-0.58		12:00	-1.08	-0.76	-1	
13:00	-0.78	-0.65	-0.78		13:00	-0.87	-0.71	-0.78	
14:00	-0.62	-0.76	-0.6		14:00	-1.08	-0.76	-0.98	
Сред.	-0.68	-0.6	-0.61	-0.64	Сред.	-1	-0.83	-0.94	-0.92
SD	0.14	0.13	0.13	0.04	SD	0.09	0.12	0.09	0.09

Рис. 2. Изменение  $\Delta hmF2$  со временем в феврале для ст. Moscow

Как видно из этой таблицы, для разных моментов LT, разных индексов СА и обоих месяцев получаются достаточно близкие по абсолютной величине отрицательные тренды  $hmF2$ . Величины среднеквадратической ошибки SD, получаемые при усреднениях, достаточно малы, что делает результаты усреднения статистически значимыми. Тренды для января оказались несколько большими, чем для февраля. Такое различие представляется нам вполне реальным исходя из возможного существования годовых вариаций величин  $k(hmF2)$ .

Среднее значение  $k(hmF2)$  для зимних месяцев получается  $-0.78$  км/год. Уместно сравнить это значение со средним трендом  $hmF2$ ,  $-2.1$  км/год, полученным для зимы ранее [Данилов и Константинова, 2013] путем усреднения результатов наблюдений на десяти станциях до примерно 2000 г. Отметим, что величины SD в указанной работе при этом существенно выше, чем в приведенных выше таблицах. Это может быть связано как с тем, что усреднялись результаты по станциям в различных широтных и долготных зонах, так и с тем, что в данной работе анализировались измерения за более поздние годы.

Аналогичный анализ был проведен для летних месяцев июня и июля. Оказалось, что, в отличие от трендов критической частоты  $foF2$ , для которой тренды в летние месяцы практически отсутствуют, для трендов высоты  $hmF2$  хорошо выраженные тренды наблюдаются и летом. Примеры изменения  $\Delta hmF2$  со временем для июня и июля приведены на рисунках 3 и 4, соответственно.

Легко увидеть, что в целом рисунки 3 и 4 похожи на рисунки 1 и 2. Так же, как и для зимних месяцев января и февраля, для летних месяцев июня и июля по данным ст. Moscow наблюдается хорошо выраженное уменьшение величины  $\Delta hmF2$  со временем, которое указывает на заметный

отрицательный тренд. Иными словами, в летние месяцы получен отрицательный тренд высоты  $hmF2$ , подобный таковому в зимние месяцы. Также, как и в зимние месяцы, в летние месяцы в большинстве ситуаций падение последних точек на рисунках происходит более резко, чем на остальной части рисунка, т. е. наблюдается усиление тренда  $hmF2$  в недавние годы. Мы вернемся к этой проблеме ниже. Сводка результатов для июня и июля приведена в таблице 3.

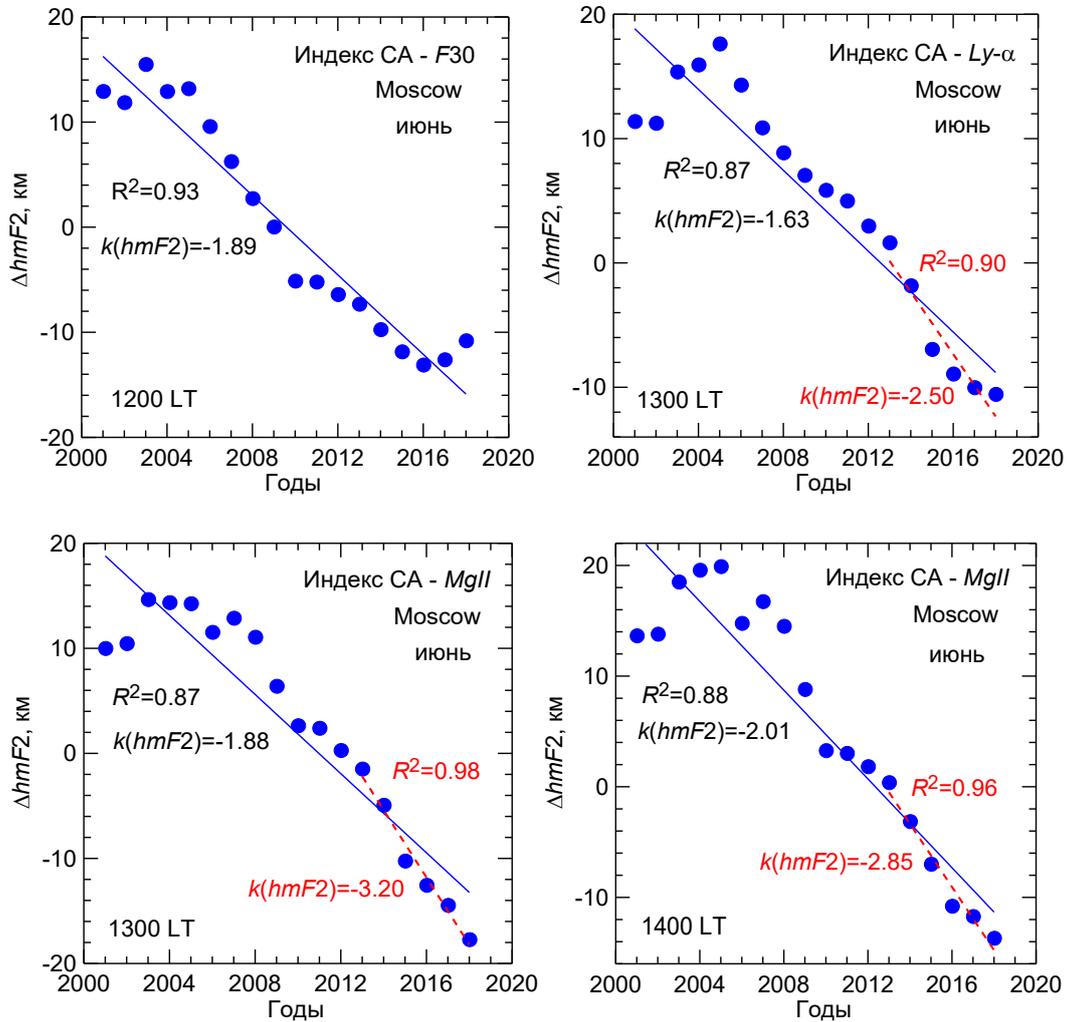


Рис. 3. Изменение  $\Delta hmF2$  со временем в июне для ст. Moscow

Таблица 3. Тренды  $hmF2$  для 1996–2023 для ст. Moscow (июнь и июль)

ИЮЛЬ					ИЮНЬ				
LT	F30	Ly-a	MgII	Сред.	LT	F30	Ly-a	MgII	Сред.
10:00	-1.06	-0.8	-0.81		0:00	-1.47	-1.17	-1.44	
11:00	-1.5	-1.45	-1.43		11:00	-1.64	-1.42	-1.63	
12:00	-1.3	-1.19	-1.15		12:00	-1.89	-1.64	-1.86	
13:00	-1.91	-1.88	-2.11		13:00	-1.91	-1.63	-1.88	
14:00	-1.88	-1.91	-2.11		14:00	-2.02	-1.78	-2.01	
Сред.	-1.53	-1.45	-1.52	-1.5	Сред.	-1.79	-1.53	-1.76	-1.69
SD	0.37	0.47	0.58	0.04	SD	0.22	0.24	0.23	0.14

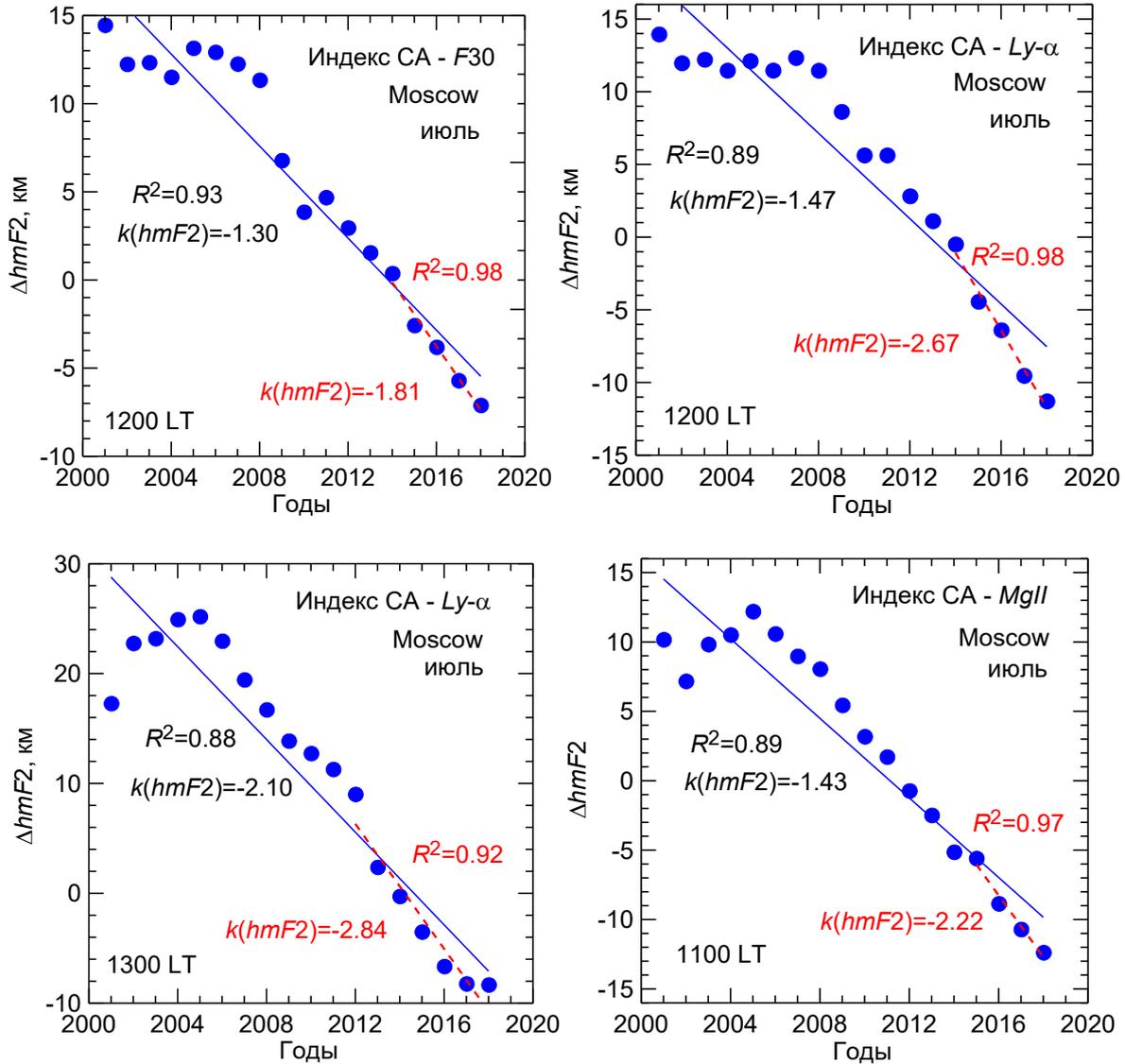


Рис. 4. Изменение  $\Delta hmF2$  со временем в июле для ст. Moscow

Как видно из таблицы 3, величины  $k(hmF2)$ , получаемые при использовании различных индексов СА близки между собой. Между усредненными по всем индексам СА и всем моментам LT величинами  $k(hmF2)$  для июня и июля наблюдается лишь относительно небольшое различие, которое, видимо, отражает наличие внутригодовых вариаций.

Величины тренда  $k(hmF2)$  для летних месяцев заметно выше, чем для зимних. Усредненные по всем индексам СА и всем часам местного времени величины  $k(hmF2)$  составляют  $-0.92$  и  $-0.64$  км/год для января и февраля, соответственно (табл. 2), тогда как для июня и июля эти величины равны, соответственно,  $-1.69$  и  $-1.50$  км/год.

Перейдем теперь к проблеме поведения  $\Delta hmF2$  в течение недавних лет. На большинстве панелей рисунков 1–4 кроме сплошной линии, показывающей тренд  $hmF2$  за период 1996–2023 гг., приводится также штриховая линия, показывающая тенденцию изменения величин  $\Delta hmF2$  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  $\Delta hmF2$  различна – от трех до восьми лет. Конечно, при таком подходе в определении величины  $k(hmF2)$  есть элемент произвола. Однако это касается только амплитуды трендов, тогда как сам факт «убыстрения» падения величин  $\Delta hmF2$  в недавние годы сомнения не вызывает. На большинстве приведенных выше рисунках отрицательные величины  $k(hmF2)$  для недавних лет больше по абсолютной величине, чем для всего анализируемого периода 1996–2023 гг.

В силу описанного выше метода проведения аппроксимирующей линии для недавних лет, величины  $k(hmF2)$  для этих лет для заданной ситуации (станция, месяц) меняются от одного момента LT к другому гораздо сильнее, чем величины  $k(hmF2)$  для всего периода. Чтобы вычислить средние величины  $k(hmF2)$  для разных ситуаций (месяц, индекс CA), мы в тех случаях, когда не было заметного отличия поведения точек в последние годы от аппроксимирующей прямой для всего периода, принимали для недавних лет тот тренд, который дает наклон этой прямой.

В таблице 4 приведены величины  $k(hmF2)$ , усредненные по пяти рассмотренным моментам LT, для трех индексов CA для ст. Moscow.

Таблица 4. Усредненные величины  $k(hmF2)$  в недавние годы

	<b>F30</b>	<b>Ly-a</b>	<b>MgII</b>	<b>Сред.</b>
		<b>январь</b>		
<b><math>k(hmF2)</math></b>	-1.00	-1.35	-1.35	-1.23
<b>SD</b>	0.08	0.11	0.11	0.20
		<b>февраль</b>		
<b><math>k(hmF2)</math></b>	-0.88	-1.15	-0.94	-0.99
<b>SD</b>	0.32	0.46	0.41	0.14
		<b>июнь</b>		
<b><math>k(hmF2)</math></b>	-1.79	-1.59	-2.42	-1.93
<b>SD</b>	0.22	0.51	0.57	0.43
		<b>июль</b>		
<b><math>k(hmF2)</math></b>	-1.66	-1.70	-2.16	-1.84
<b>SD</b>	0.31	0.46	0.58	0.28

Как видно из сравнения этой таблицы с таблицами 2 и 3, для всех ситуаций средние величины тренда  $hmF2$  для недавних лет для ст. Moscow выше, чем для всего анализируемого периода 1996–2023 г. Величины  $k(hmF2)$  для недавних лет в летние месяцы выше, чем в зимние. Превышение трендов для недавних лет над трендами для всего периода меняется в пределах фактора 1.15–1.5 и в среднем составляет 1.3 раза. Иначе говоря, в последние несколько лет скорость уменьшения высоты слоя  $F2$  для ст. Moscow примерно на 30% больше, чем в среднем за период 1996–2023 г.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ СТ. JULIUSRUH

Анализ данных ст. Juliusruh был идентичен анализу данных ст. Moscow, описанному выше. Примеры изменения  $\Delta foF2$  со временем для ст. Juliusruh приведены на рисунках 5 и 6 для января и февраля, соответственно.

Видно, что характер изменения  $\Delta foF2$  со временем на рисунках 6 и 7 аналогичен таковому на рисунках 1–4. Сводка полученных величин  $k(hmF2)$  для января и февраля для анализируемого периода приведена в таблице 5.

Таблица 5. Величины  $k(hmF2)$  в км/год для зимних месяцев (ст. Juliusruh)

LT	февраль				январь			
	<b>F30</b>	<b>Ly-a</b>	<b>MgII</b>	<b>Сред.</b>	<b>F30</b>	<b>Ly-a</b>	<b>MgII</b>	<b>Сред.</b>
<b>10:00</b>	-0.33		-0.37		-0.67	-0.49	-0.8	
<b>11:00</b>			-0.42		-0.63	-0.56	-0.72	
<b>12:00</b>			-0.52		-0.46	-0.38	-0.60	
<b>13:00</b>	-0.38	-0.36	-0.64		-0.55	-0.37	-0.65	
<b>14:00</b>	-0.58	-0.42	-0.83		-0.56	-0.41	-0.57	
<b>Сред.</b>	-0.43	-0.34	-0.56	-0.44	-0.57	-0.44	-0.67	-0.56
<b>SD</b>	0.13	0.14	0.19	0.11	0.08	0.08	0.09	0.12

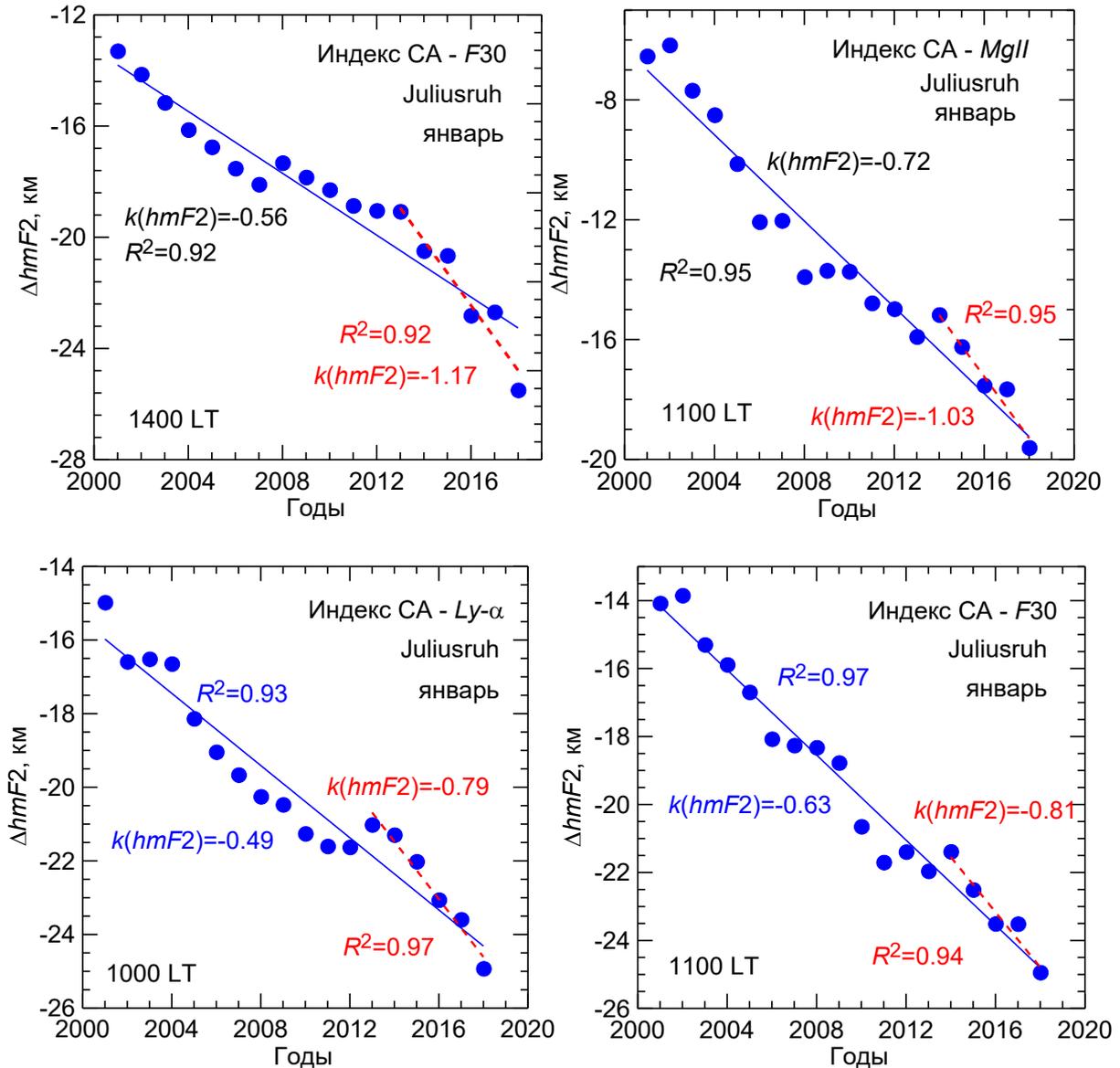


Рис. 5. Примеры изменения  $\Delta hmF2$  со временем в январе для ст. Juliusruh

Как видно из таблицы 5, для нескольких моментов LT для февраля мы не смогли определить надежных величин  $k(hmF2)$  из-за хаотичного характера изменения величин  $\Delta hmF2$  со временем. Однако, для января получены надежные величины тренда для всех моментов LT и всех индексов CA. При этом усредненные по всем моментам LT и всем индексам CA величины  $k(hmF2)$  для обоих зимних месяцев различаются не сильно ( $-0.44$  и  $-0.56$  км/год), что позволяет надеяться, что для февраля тоже получены правильные значения.

В ряде случаев на рисунках 6, 7 наблюдается увеличения наклона точек  $\Delta hmF2$  в недавние годы для ст. Juliusruh, как это описано выше для ст. Moscow. Однако, разброс точек на некоторых рисунках достаточно велик, что затрудняет получение величин  $k(hmF2)$  для всех ситуаций.

Примеры изменения  $\Delta hmF2$  со временем для анализируемого периода для июня приведены на рисунке 7. Сводка результатов для двухлетних месяцев приведена в таблице 6. Видно, что величины  $k(hmF2)$  для 1996–2023 гг., полученные для этих месяцев усреднением по всем моментам LT и всем индексам CA ( $-0.54$  и  $-0.58$  км/год) близки к величинам, полученным для зимних месяцев ( $-0.44$  и  $-0.56$  км/год). Отличительной чертой результатов для июня и июля на ст. Juliusruh является то, что для недавних лет получают более сильные тренды  $hmF2$ , чем для тех же месяцев для ст. Moscow, или для зимних месяцев на ст. Juliusruh.

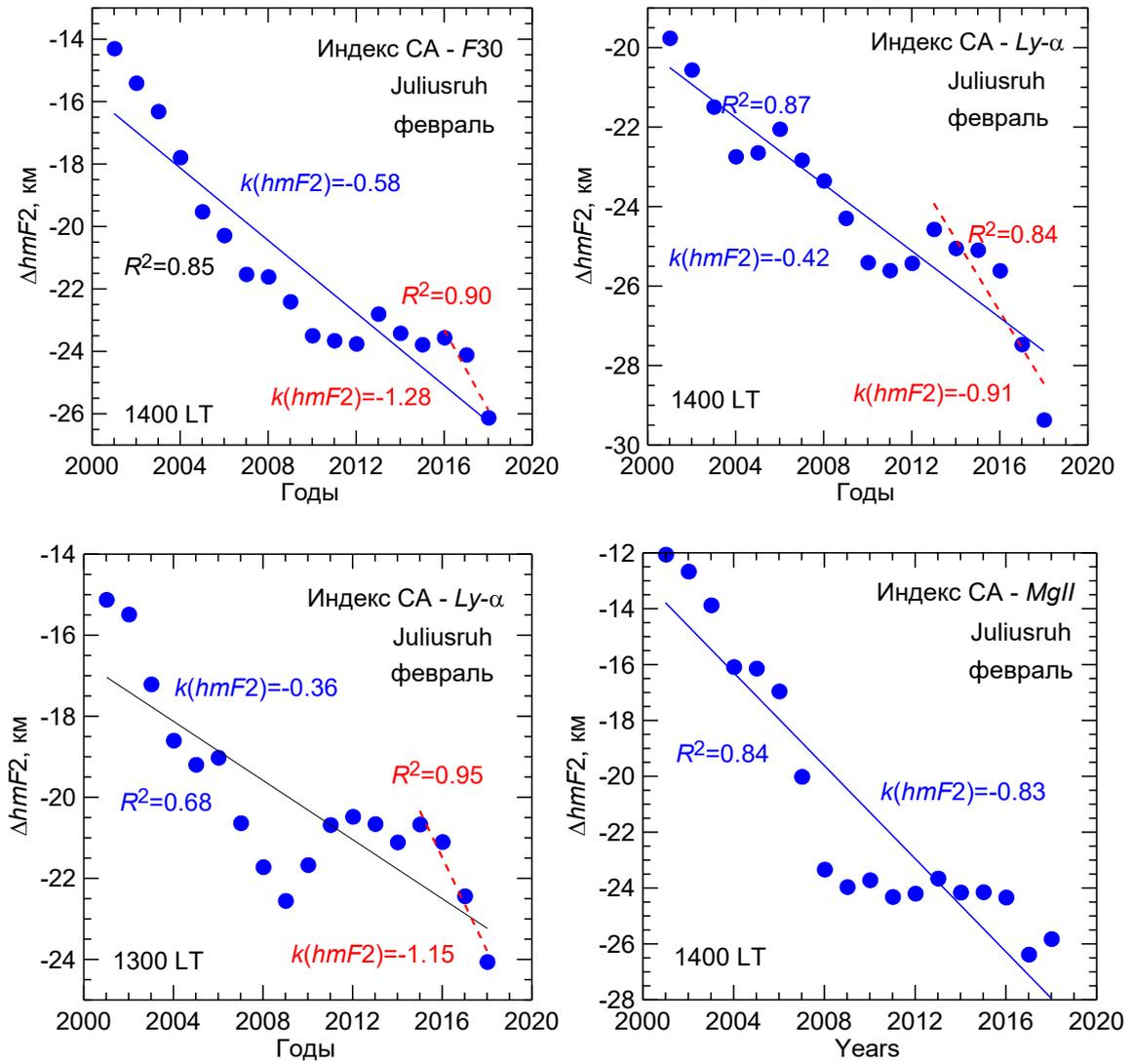
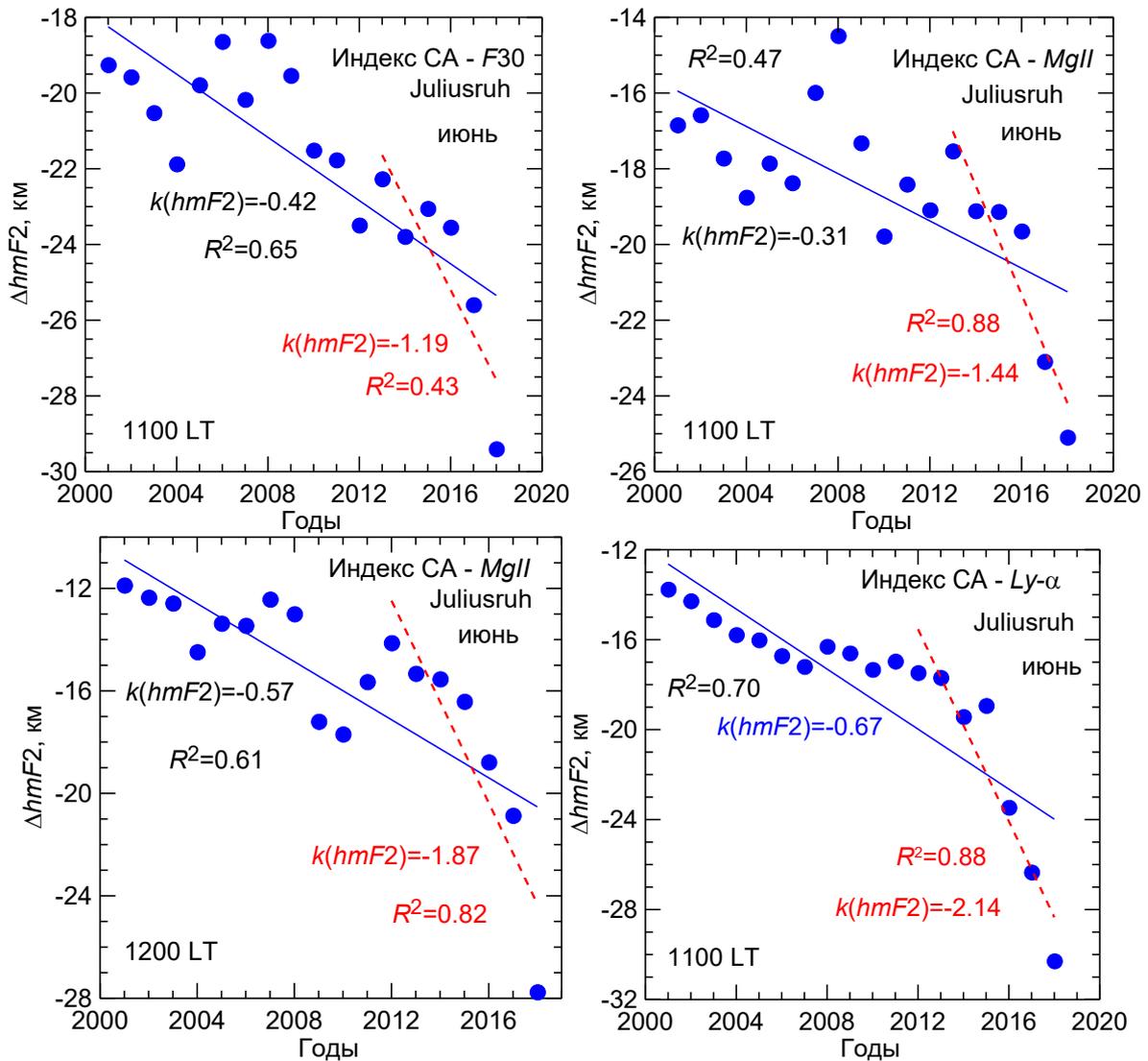


Рис. 6. Примеры изменения  $\Delta hmF2$  со временем в феврале для ст. Juliusruh

Таблица 6. Величины  $k(hmF2)$  в км/год для июня и июля (ст. Juliusruh, 1996–2023 гг.)

LT	ИЮНЬ				ИЮЛЬ			
	F30	Ly-a	MgII	Сред.	F30	Ly-a	MgII	Сред.
10:00	-0.44	-0.16	-0.43		-0.80	-0.63	-0.56	
11:00	-0.61	-0.32	-0.59		-0.68	-0.30		
12:00	-0.61	-0.43	-0.46		-0.74	-0.32	-0.54	
13:00	-0.61	-0.43	-0.82		-0.62	-0.38	-0.39	
14:00	-0.60	-0.30	-0.58		-0.61	-0.43	-0.64	
Сред.	-0.57	-0.33	-0.58	-0.49	-0.69	-0.44	-0.49	-0.54
SD	0.08	0.11	0.15	0.14	0.08	0.13	0.14	0.13

Рис. 7. Примеры изменения  $\Delta hmF2$  со временем в июне для ст. Juliusruh

#### 4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «ДЕЛЬТА»

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 предположительно не было трендов антропогенной природы, и в анализируемый период (1996–2023 гг.), как и основной метод. В тренде нет никаких искусственных процедур (сглаживания, усреднения и т. д.) – сравниваются две кривые (зависимости  $foF2$  (или  $hmF2$ ) от выбранного индекса СА в каждом из периодов), и их различие и дает изменение  $foF2$  или  $hmF2$  (величину дельта, обозначаемую далее как  $D$ ) за время, прошедшее после «эталонного периода». Более подробное описание метода «Дельта» и результатов анализа этим методом данных по  $foF2$  для ст. Juliusruh и Moscow можно найти в работах авторов [Данилов и др., 2023б; 2024].

Мы применили метод Дельта к рассматриваемым в данной работе данным по  $hmF2$  для ст. Moscow. Примеры изменения  $hmF2$  в зависимости от индекса СА для января и февраля для разных моментов LT и разных индексов СА приведены на рисунках 8 и 9, соответственно. Как и при поиске трендов основным методом, мы аппроксимировали зависимости  $hmF2$  от индексов СА полиномом третьей степени.

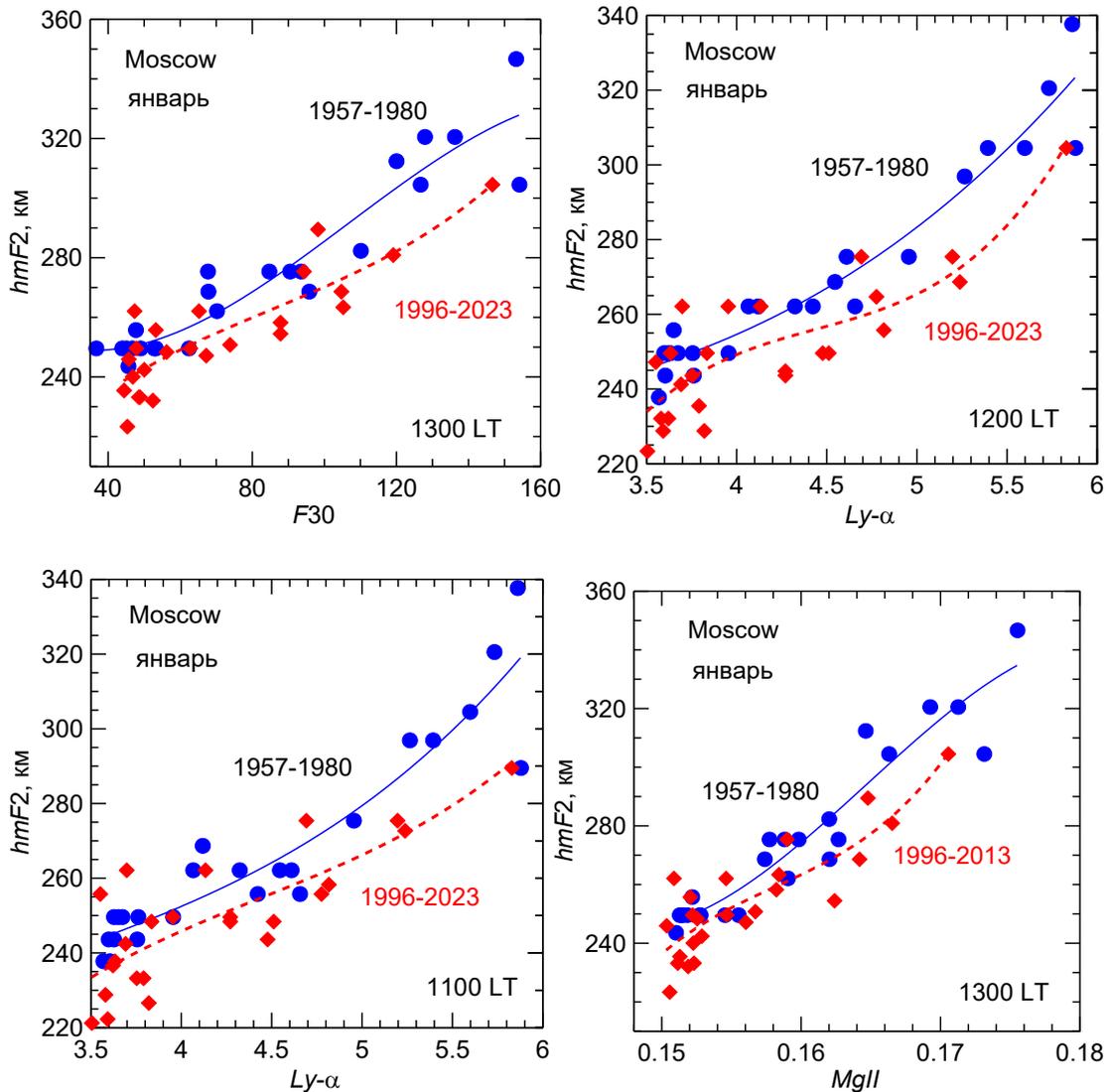


Рис. 8. Примеры зависимости  $hmF2$  от индексов СА для разных временных интервалов в январе (ст. Moscow)

Как видно на этих рисунках, во всех рассмотренных ситуациях (месяц, индекс СА, момент LT) аппроксимирующие кривые идут систематически выше для данных 1957–1980 гг., чем для данных 1996–2023 гг. Иначе говоря, для одного и того же уровня СА (для одного и того же значения индекса СА) величина  $hmF2$  для анализируемого периода меньше, чем для «эталонного» периода. А это значит, что тренд высоты  $hmF2$  отрицателен, т. е. происходит систематическое уменьшение величины  $hmF2$  со временем. Этот вывод полностью согласуется с результатами (отрицательные тренды  $hmF2$ ), полученными с использованием основного метода и описанными в пункте 2.

Суммарная сводка результатов определения величин  $D$  для зимних месяцев приведена в таблицах 7, 8 для ст. Moscow и Juliusruh, соответственно. Как и в предыдущих таблицах, в строке «Сред» приводится результат усреднения величин  $D$  по всем пяти моментам LT (усреднение по столбцу). В столбце «Сред» приводится результат усреднения этих средних величин для различных индексов СА (усреднение по строке).

Как видно из таблицы 7, для ст. Moscow средние величины  $D$  для данного месяца и конкретного индекса СА близки между собой (величина SD мала). Близки и усредненные по всем трем индексам СА величины  $D$  для ст. Moscow для января (10.6 км) и февраля (11 км). Таким образом, с большой надежностью можно утверждать, что среднее уменьшение высоты слоя  $F2$   $hmF2$  над Москвой от эталонного периода 1957–1980 гг. до анализируемого периода 1996–2023 гг. в зимние месяцы составляет около 11 км.

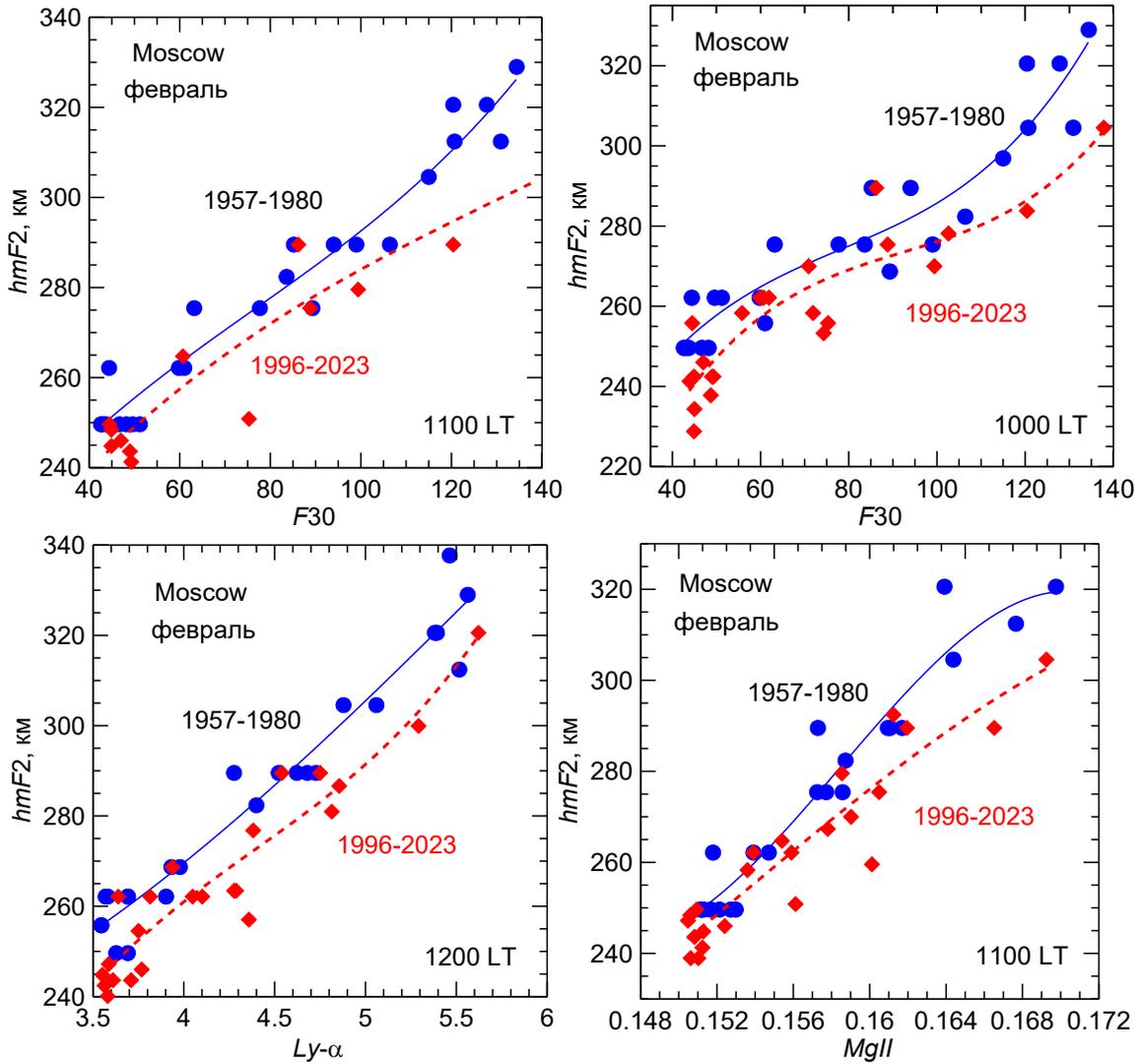


Рис. 9. Примеры зависимости  $hmF2$  от индексов СА для разных временных интервалов в феврале (ст. Moscow)

Таблица 7. Величины  $D$  в км для зимних месяцев (ст. Moscow)

январь					февраль			
LT	$F30$	$Ly-a$	$MgII$	Сред.	$F30$	$Ly-a$	$MgII$	Сред
10:00	6.3	6.8	6.4		10.4	13.5	12.3	
11:00	10.3	11.6	10.7		8.1	11.4	11.4	
12:00	11.7	13.1	11.9		9.3	11.6	9.4	
13:00	12.3	13.3	11.6		7.4	13.6	13.7	
14:00	9.9	12.2	11.0		10.2	12.6	10.6	
Сред	10.1	11.4	10.3	10.6	9.1	12.5	11.5	11.0
SD	2.3	2.7	2.2	0.7	1.3	1	1.6	1.7

Таблица 8 показывает, что для ст. Juliusruh усредненные по всем моментам LT и индексам СА величины  $D$  для двух зимних месяцев несильно различаются между собой. Они лишь несколько выше, чем соответствующие величины для ст. Moscow. В среднем уменьшение  $hmF2$  от эталонного к анализируемому периоду для ст. Juliusruh зимой составляет около 17 км, что несколько больше, чем это уменьшение для ст. Moscow (11 км).

Таблица 8. Величины  $D$  в км для зимних месяцев (ст. Juliusruh)

январь					февраль				
LT	F30	Ly-a	MgII	Сред.	LT	F30	Ly-a	MgII	Сред.
10:00	6.3	19.4	12.9		10:00	13.8	26.5	11.9	
11:00	10.3	19.7	12.1		11:00	15.9	20.2	16.7	
12:00	11.7	24.8	13.7		12:00	18.9	22.9	18.2	
13:00	12.3	19.0	13.7		13:00	15.8	19.8	16.5	
14:00	9.9	18.7	15.3		14:00	19.9	23.9	16.5	
Сред.	10.1	20.3	13.5	14.6	Сред.	16.9	22.7	16.0	18.5
SD	2.3	2.5	1.2	5.2	SD	2.5	2.8	2.4	3.6

Мы провели также расчеты величин  $D$  для обеих станций для летнего месяца июня. Результаты приведены в таблице 9. Таблица показывает, что усредненная по всем моментам LT величина  $D$  в июне для ст. Juliusruh вдвое больше, чем для ст. Moscow. При этом согласие величин  $D$  для всех трех месяцев (январь, февраль и июнь) является очень хорошим для ст. Moscow и вполне приемлемым для ст. Juliusruh (табл. 7-9).

Таблица 9. Величины  $D$  для двух станций для июня

Moscow					Juliusruh			
LT	F30	Ly-a	MgII	Сред.	F30	Ly-a	MgII	Сред.
10:00	7.7	10.2	15.3		18.1	22.0	24.9	
11:00	6.9	5.7	11.7		21.6	17.0	24.0	
12:00	8.2	7.3	16.5		17.8	17.5	20.3	
13:00	4.6	9.9	12.7		20.4	17.6	25.1	
14:00	7.2	9.3	18.2		18.8	21.0	23.2	
Сред.	6.9	8.5	14.9	10.1	18.3	19.0	23.5	20.3
SD	1.4	1.9	2.7	4.2	1.6	2.3	1.9	2.8

Метод Дельта не позволяет определить величины тренда  $k(hmF2)$ , но полученное уменьшение  $hmF2$  между двумя периодами качественно вполне согласуется с величинами тренда  $k(hmF2)$  для станций Moscow и Juliusruh, полученными для всех трех месяцев основным методом в параграфах 2 и 3, соответственно. Метод Дельта подтверждает вывод, полученный основным методом (см. выше), о том, что уменьшение высоты  $hmF2$  от «эталонного» к анализируемому периоду наблюдается не только в зимние, но и в летние месяцы.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Основной целью данной работы был анализ трендов высоты слоя  $F2$   $hmF2$  по данным двух ионосферных станций Moscow и Juliusruh до 2023 г. Тренды  $hmF2$  уже рассматривались авторами ранее [Данилов и Константинова, 2013] на основании анализа данных на нескольких ионосферных станциях до 2010 г. Как уже указывалось, было получено, что усредненный по всем станциям тренд составляет в зимний период  $-2.1$  км/год.

В данной работе мы рассматривали околополуденные часы суток (10:00–14:00 LT) и два типичных зимних месяца январь и февраль, как это часто делается в наших работах по поиску трендов критической частоты слоя  $F2$ . Для устранения эффектов солнечной активности мы использовали три индекса SA ( $F30$ ,  $Ly-a$  и  $MgII$ ), которые были признаны лучшими для описания поведения слоя  $F2$  [Данилов и Бербенева, 2024; Данилов и др., 2023в; Danilov and Berbeneva, 2023].

Получено, что в зимние месяцы тренды высоты слоя  $F2$   $k(hmF2)$  отрицательны и составляют для ст. Moscow около 0.8 км/год. Важным обстоятельством является то, что разброс получаемых величин  $k(hmF2)$  для разных моментов LT и при использовании разных индексов SA относительно невелик, что показывают небольшие величины среднеквадратических ошибок при различных усреднениях (табл. 2).

В отличие от трендов критической частоты  $foF2$ , которые хорошо выражены в зимний период, но отсутствуют летом (см. Данилов и др. [2023а, б]), тренды высоты слоя  $hmF2$  для ст. Moscow хорошо выражены и отрицательны и в зимние, и в летние месяцы. Более того, получено, что в летние месяцы величины  $k(hmF2)$  примерно вдвое выше (около  $-1.6$  км/год), чем в зимние. Это показывает, что тренды  $foF2$  и  $hmF2$  являются результатом протекания различных процессов в термосфере. Подробное рассмотрение этой проблемы может в дальнейшем помочь в выявлении физических механизмов, вызывающих долгосрочные изменения ионосферного слоя  $F2$  и, возможно всей ионосферы в целом, а это является конечной целью всех исследований ионосферных трендов.

Сравнение результатов определения трендов  $hmF2$ , полученных для двух станций (см. параграфы 2 и 3) показывает, что зимой для ст. Juliusruh получают несколько меньшие величины ( $k(hmF2) = -0.44$  и  $-0.56$  км/год), чем для ст. Moscow (0.92 и 0.64 км/год для января и февраля, соответственно). Это различие, однако, вполне может быть связано с различием условий формирования трендов в разных географических пунктах.

Различие результатов для лета представляется более серьезным. Для ст. Moscow, как указывалось выше, получено заметное усиление трендов при переходе от зимних месяцев к летним. Такого увеличения не получено для ст. Juliusruh. У нас пока нет объяснения этому факту. Отметим только, что ситуация с трендами параметров слоя  $F2$  достаточно сложна – как уже указывалось выше, летом тренды критической частоты  $foF2$  практически отсутствуют при заметных трендах в зимние месяцы (см. Данилов и др. [2024]).

Нами ранее уже обращалось внимание на тот факт, что отрицательные тренды  $foF2$  в недавние несколько лет получают более сильными, чем для всего анализируемого периода [Данилов и Бербенева 2023; Данилов и др. 2023б]. Для трендов  $hmF2$  на основании данных обеих станций получена та же картина – для всех месяцев усредненные по моментам LT и индексам SA величины  $k(hmF2)$  в последние годы, как правило, несколько выше, чем для основного анализируемого периода 1996–2023 гг.

Хотя надежность величин  $k(hmF2)$  в недавние годы, получаемых в каждой конкретной ситуации (месяц, момент LT, индекс SA), невелика, поскольку они основываются на нескольких точках последних лет, и число этих точек различно в разных ситуациях, нам представляется, что в целом заключение об увеличении скорости изменения параметров слоя  $F2$  со временем справедливо, по меньшей мере, в качественном отношении. Это увеличение, вероятно, и должно наблюдаться, поскольку анализируемые тренды имеют, скорее всего, антропогенную природу, а антропогенное влияние на земную атмосферу в последние годы усиливается, о чем свидетельствует хорошо известное усиление глобального потепления.

К анализируемым данным двух станций мы применили метод «Дельта», разработанный и использованный нами ранее. Этот метод не дает принципиально новой информации по сравнению с основным методом, но привлекателен своей простотой и наглядностью. Результаты показывают, что получаемые величины  $D$  (изменение  $hmF2$  от эталонного периода 1957–1980 гг. к анализируемому периоду 1996–2023 гг.) в целом согласуются для разных моментов LT, разных индексов SA и разных месяцев. Хотя метод «Дельта» не дает величин самих трендов, величины  $D$  около 11 км для ст. Moscow и около 17 км для ст. Juliusruh, полученные усреднением по всем трем месяцам (январь, февраль, март), являются надежным подтверждением отрицательных величин  $k(hmF2)$ , полученных основным методом.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью работы было исследование трендов высоты слоя  $F2$   $hmF2$  по данным ст. Moscow и Juliusruh в зимние месяцы, когда по нашим представлениям тренды  $foF2$  хорошо выражены (см. Данилов и др. [2024]). Результаты анализа величин этих трендов  $k(hmF2)$  показали, что и в январе, и в феврале для обеих станций наблюдается систематическое уменьшение высоты  $hmF2$  со временем в течение анализируемого периода (1996–2023 гг.). Разброс получаемых величин  $k(hmF2)$  от месяца к

месяцу и от станции к станции лежит в пределах ожидаемой точности метода и вероятного различия трендов между различными пунктами.

Как и в случае трендов критической частоты, для трендов  $hmF2$  получено увеличение амплитуды отрицательной величины  $k(hmF2)$  (усиление трендов) в недавние годы, причем этот эффект достаточно хорошо выражен для ст. Moscow для обоих сезонов, но проявляется также и в данных ст. Juliusruh.

Наличие уменьшения высоты слоя  $F2$  со временем подтверждается применением метода «Дельта», который в силу простоты и наглядности позволяет надежно определить характер изменения величин  $hmF2$  от «эталонного» периода (1957–1980 гг.) к анализируемому периоду (1996–2023 гг.). Для обеих станций получены отрицательные величины этого изменения:  $D \sim 11$  км для ст. Moscow и  $\sim 17$  км для ст. Juliusruh.

Стоит отметить, что основной вывод данной работы о наличии отрицательных трендов  $hmF2$  подтверждает вывод нашей предыдущей публикации (Данилов и Константинова, 2013). Но в работе 2013 г. уменьшение  $hmF2$  было получено только по данным до 2010 г. и с использованием только индекса  $F10.7$  для устранения эффектов СА. Нам представляется очень важным тот факт, что указанный вывод подтверждается в данной работе анализом данных до 2023 г. с использованием трех индексов СА, которые по современным представлениям (см. Данилов и Бербенева [2024]) являются наилучшими для описания поведения параметров слоя  $F2$ .

## БЛАГОДАРНОСТИ

Величины солнечных индексов взяты с сайта LISIRD (<https://lasp.colorado.edu>). Величины  $M3000$  взяты из банка Дамбольдта на сайте (<https://downloads.sws.bom.gov.au/wdc/iondata/medians/>), а также с сайтов Australian Space Weather Forecasting Center ([www.sws.bom.gov.au](http://www.sws.bom.gov.au)) и ИЗМИРАН ([http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere\\_4/MO155\\_Moscow\\_\(IZMIRAN\)](http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_4/MO155_Moscow_(IZMIRAN))).

## ЛИТЕРАТУРА

- 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., 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. 2. Высота слоя. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 4. С. 486–400. 2013. 10.7868/S0016794013040068
- 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. <https://doi.org/10.7868/S0016794017050054>.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Дальнейший анализ трендов  $foE$  на станции Juliusruh. Гелиогеофизические исследования. Вып. 19. С. 41–46. 2018.
- 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. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020040045>.
- 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. [https://doi.org/10.5425/2304-7380\\_2022\\_37\\_42](https://doi.org/10.5425/2304-7380_2022_37_42).
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Бербенева Н. А. Детальный анализ суточных вариаций трендов  $foF2$  // Гелиогеофизические исследования. Вып. 39. С. 8–16. 2023б. [https://doi.org/10.5425/2304-7380\\_2023\\_39\\_8](https://doi.org/10.5425/2304-7380_2023_39_8).
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Бербенева Н. А. Дальнейший детальный анализ зависимости  $foF2$  от солнечной активности // Гелиогеофизические исследования. Вып. 40. С. 68–80. 2023в.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Бербенева Н. А. Тренды критической частоты  $foF2$  по данным станций Северного и Южного полушарий. Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. №3. 2024.

- *Bremer J.* Long-term trends in the ionospheric E and F1 regions // *Ann. Geophysicae*. V. 26. N5. P. 1189–1197. 2008.
- *Danilov A. D., Berbeneva N. A.* Statistical analysis of the critical frequency foF2 dependence on various solar activity indices // *Adv. Space Res.* V. 72. P. 2351–2361. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.05.012>.
- *De Haro Barbás D. F., Elias A. G., Venchiarutti J. V., Fagre M., Zossi B. S., Jun G. T., Medina F. D.* MgII as a solar proxy to filter F2-region ionospheric parameters // *Pure Appl. Geophys.* V. 178. P. 4605–4618. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02884-y>.
- *Gulyaeva T. L., Arikani F., Sezen U., Poustovalova L. V.* Eight proxy indices of solar activity for the International Reference Ionosphere and Plasmasphere model // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 172. P. 122–128. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.025>.
- *Laštovička J.* Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere // *Atmos. Chem. Phys.* V. 23. N 10. P. 5783–5800. 2023. <https://doi.org/10.5194/acp-23-5783-2023>.
- *Laštovička J.* Dependence of long-term trends in foF2 at middle latitudes on different solar activity proxies // *Adv. Space Res.* V. 73. N 1. P. 685–689. 2024. DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.047.
- *Laštovička J., Burešová D.* Relationships between foF2 and various solar activity proxies // *Space Weather* V. 21. N 4. ID e2022SW003359. 2023. <https://doi.org/10.1029/2022SW003359>.
- *Perna L., Pezzopane M.* foF2 vs solar indices for the Rome station: looking for the best general relation which is able to describe the anomalous minimum between cycles 23 and 24 // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 148. P. 13–21. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.08.003>.
- *Yue X., Hu L., Wei Y., Wan W., and 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, <https://doi.org/10.1002/2017JA024675>, 2018.

## LONG-TERM TRENDS IN THE IONOSPHERIC F2-LAYER HEIGHT

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

Analysis of the long-term variations (trends) in the ionospheric F2-layer height  $hmF2$  is performed based on the data of Moscow and Juliusruh stations to 2023. The near-noon LT hours and two winter (January and February) and two summer (June and July) months for a period of 1996–2023 are considered. Well-pronounced and statistically significant negative trends in  $hmF2$  are derived both in winter and summer. Overall, the F2-layer height was decreasing during the analyzed period by 0.5–1 km per year. The “Delta” method developed and published by the authors earlier is applied to the same data. The results confirm a systematic decrease in the  $hmF2$  value during the last two decades. It is found that the F2-layer height is decreasing during the recent years slightly more rapidly than during the previous years.

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