

УДК 550.388.2

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ВЫСОТЫ МАКСИМУМА ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F_2

© 2024 г. А. Д. Данилов^{1, *}, А. В. Константинова¹, Н. А. Бербенева²¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПГ Росгидромета), Москва, Россия²Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ),
Москва, Россия

*e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2024 г.

После доработки 12.03.2024 г.

Принята к публикации 04.04.2024 г.

Анализируются долговременные вариации (тренды) высоты ионосферного слоя F_2 hmF_2 по данным станций Moscow и Juliusruh. 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 hmF_2 как летом, так и зимой. В среднем высота слоя F_2 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 hmF_2 в течение последних двух десятилетий. Обнаружено, что в течение недавних нескольких лет высота слоя F_2 уменьшается быстрее, чем в предыдущие годы.

DOI: 10.31857/S0016794024040048, EDN: RTSQPY

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 F_2 , foF_2 . 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 F_2 , hmF_2 , не публиковалось давно.

Данилов и Константинова [2013] опубликовали результаты анализа данных по hmF_2 по наблюдениям на 10 станциях вертикального зондирования (ВЗ) до 2010 г. Было получено, что тренды hmF_2 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 (55.5 N; 37.3 E) и Juliusruh (54.6 N; 13.4 E). Мы применяем метод, неоднократно использованный нами для анализа как foF_2 , так и hmF_2 . Достаточно подробное описание метода можно найти в работе Данилова и Бербеновой [2023]. Здесь мы напомним только, что метод основан на сравнении величин foF_2 (или hmF_2) в течение двух последних десятилетий с величинами foF_2 (или hmF_2) для тех же условий в течение “эталонного” периода 1957–1980 гг., когда еще не было ионосферных трендов антропогенной природы. Между соответствующими величинами foF_2 (или hmF_2) вычисляется разница ΔfoF_2 (ΔhmF_2), изменение которой со временем в течение анализируемого периода и дает искомый тренд $k(foF_2)$ ($k(hmF_2)$).

Из банков ионосферных данных были взяты месячные медианы $M3000$ для периодов 1957–1980 гг. (эталонный) и 1996–2023 гг. (анализируемый). Величина hmF_2 вычислялась из $M3000$ по известной формуле Shimazaki [1955]. 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 (F_{30} ,

Ly- α 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 рис. 1 и рис. 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.

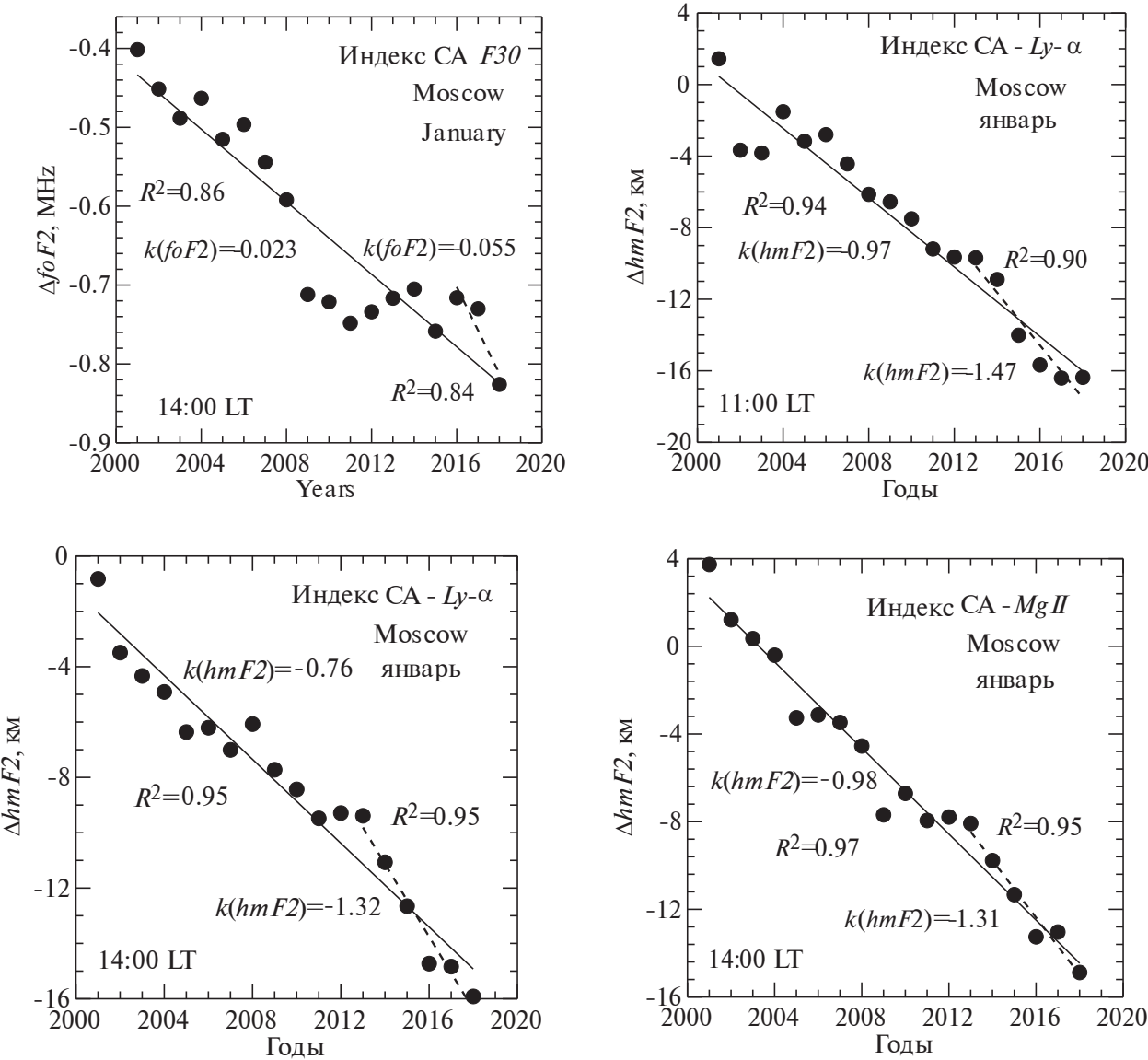


Рис. 1. Изменение $\Delta hmF2$ со временем в январе для ст. Moscow.

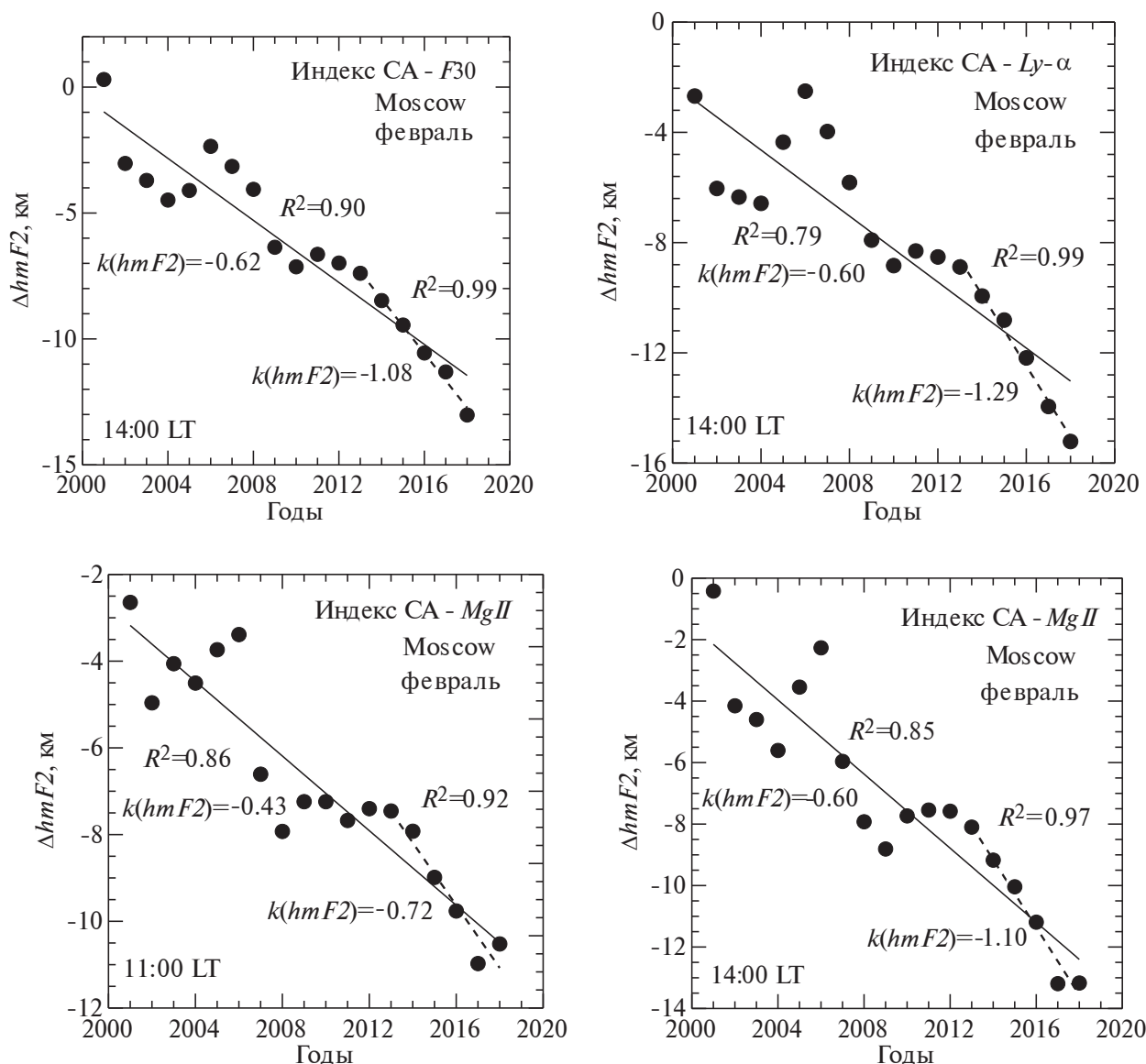


Рис. 2. Изменение ΔhmF_2 со временем в феврале для ст. Moscow.

При анализе трендов foF_2 было обнаружено [Данилов и Бербенева, 2023; Данилов и др., 2024], что в последние несколько лет градиент падения ΔfoF_2 увеличивается, т.е. увеличивается magnitude отрицательного тренда foF_2 , $k(foF_2)$. Такая же картина наблюдается на рис. 1 и рис. 2 и для тренда hmF_2 . Мы вернемся к этой проблеме ниже.

Результаты для каждой ситуации (станция, месяц, индекс СА) сводились в таблицу. Пример приведен в табл. 1. Она показывает тренды hmF_2 для всего анализируемого периода 1996–2013 гг. с соответствующей 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 моментам LT.

Сводка полученных трендов hmF_2 для всего анализируемого периода 1996–2013 гг. для двух зимних месяцев и всех трех индексов СА приведена в табл. 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.

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

LT	1996–2023	R^2	недавн.	R^2
10:00	–0.60	0.79	–1.29	0.99
11:00	–0.39	0.69	–0.82	0.98
12:00	–0.60	0.94	–0.60	0.94
13:00	–0.65	0.60	–1.37	0.99
14:00	–0.76	0.95	–0.76	0.95
Сред.	–0.60		–0.97	
SD	0.13		0.34	

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 приве-

денных 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 рис. 3 и рис. 4 соответственно.

Легко видеть, 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. Так же, 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 табл. 3. Как видно из этой таблицы, 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.

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

февраль					январь			
LT	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	Сред.	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	Сред.
10:00	–0.87	–0.60	–0.65		–0.94	–0.94	–0.96	
11:00	–0.53	–0.39	–0.43		–1.02	–0.97	–0.96	
12:00	–0.61	–0.60	–0.58		–1.08	–0.76	–1.00	
13:00	–0.78	–0.65	–0.78		–0.87	–0.71	–0.78	
14:00	–0.62	–0.76	–0.60		–1.08	–0.76	–0.98	
Сред.	–0.68	–0.60	–0.61	–0.64	–1.00	–0.83	–0.94	–0.92
SD	0.14	0.13	0.13	0.04	0.09	0.12	0.09	0.09

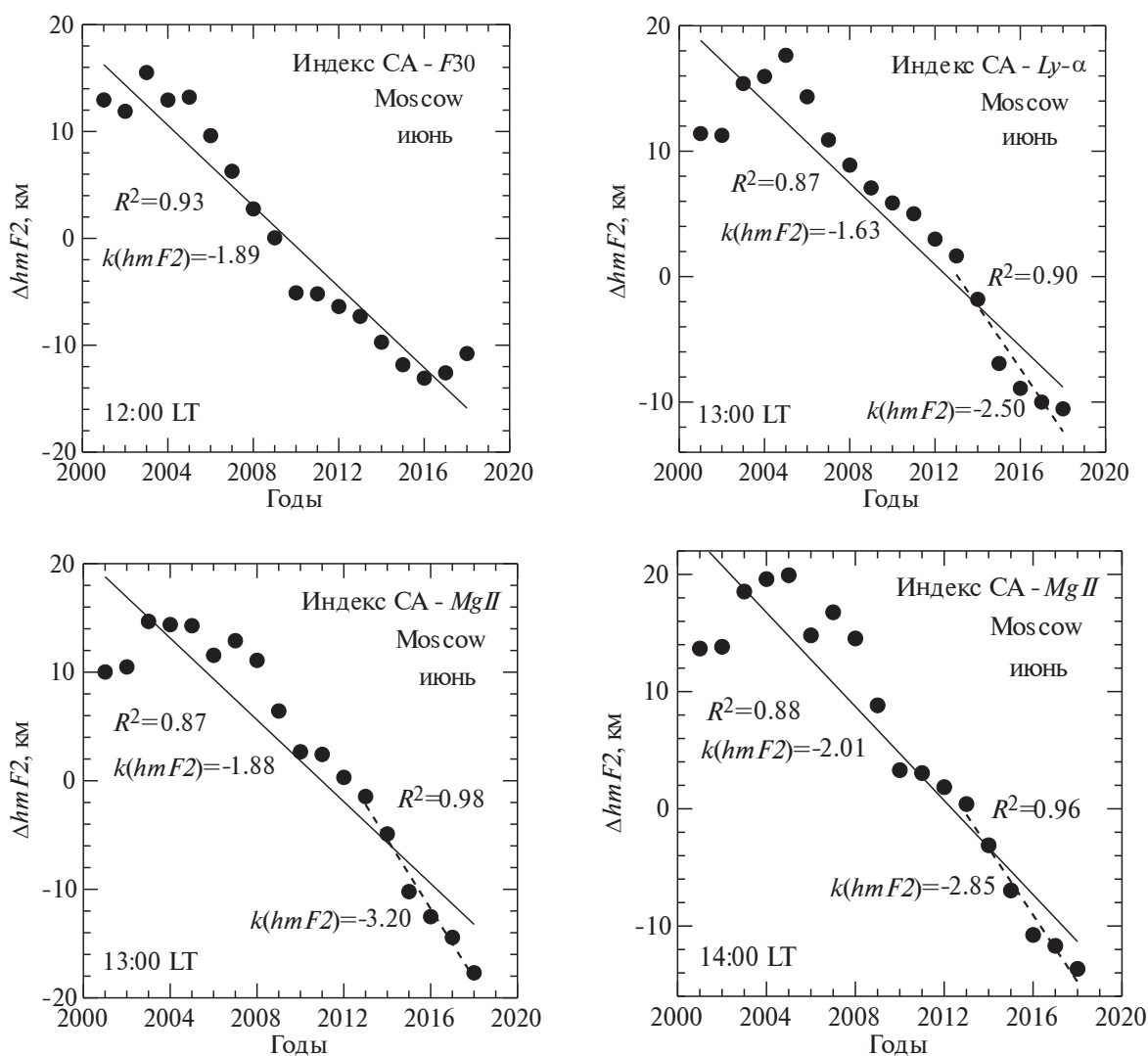


Рис. 3. Изменение $\Delta hmF2$ со временем в июне для ст. Moscow.

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 (см. выше 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 магнитуды трендов, тогда как сам факт “убыстрения” падения величин $\Delta hmF2$ в недавние годы сомнения не вызывает. На большинстве приведенных выше рисунков отрицательные величины $k(hmF2)$ для недавних лет больше по абсолютной величине, чем для всего периода 1996–2023 гг.

В силу описанного выше метода проведения аппроксимирующей линии для недавних лет, величины $k(hmF2)$ для этого периода для заданной

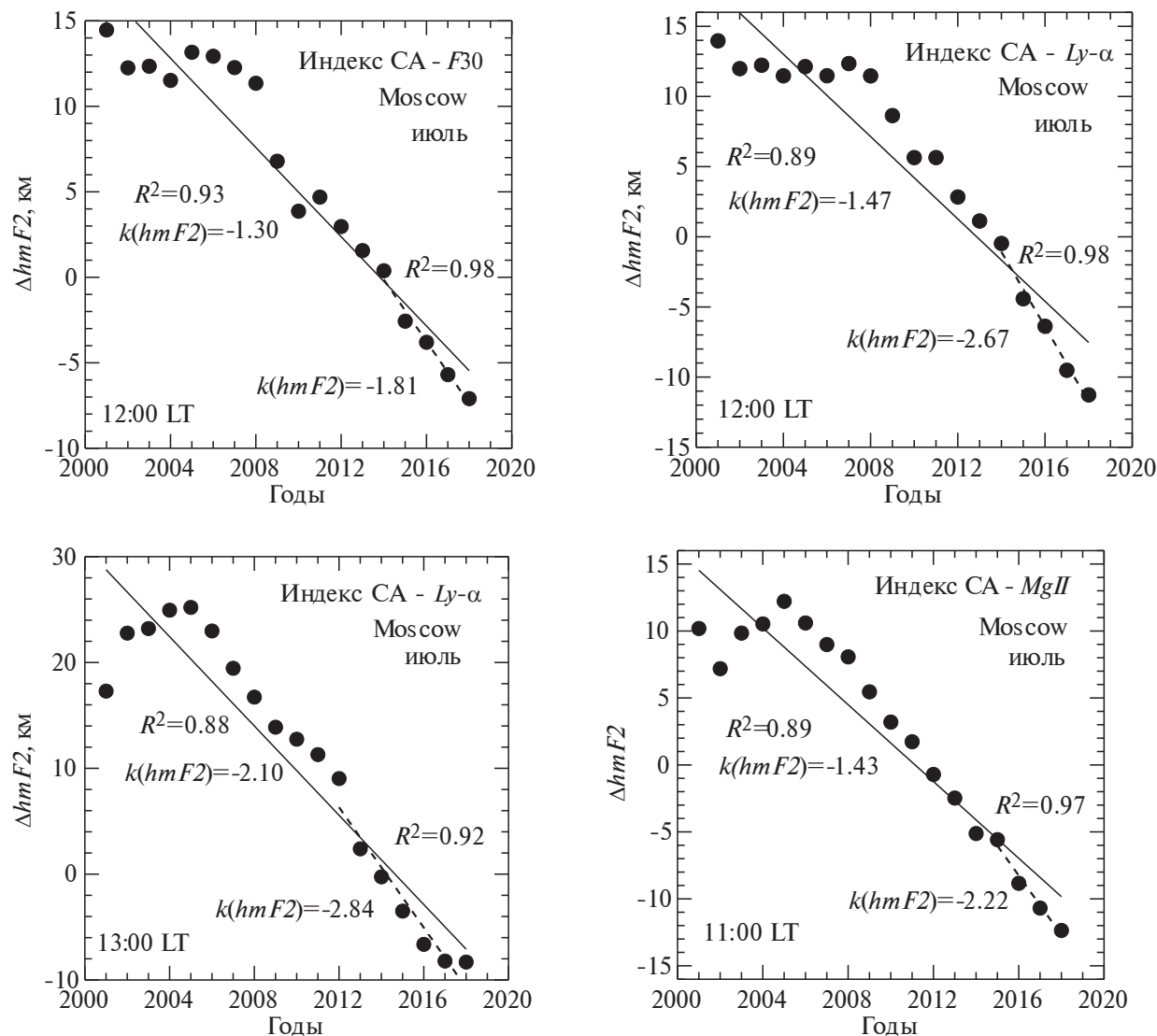


Рис. 4. Изменение $\Delta hmF2$ со временем в июле для ст. Moscow.

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

июль					июнь			
LT	F30	Ly-α	MgII	Сред.	F30	Ly-α	MgII	Сред.
10:00	−1.06	−0.80	−0.81		−1.47	−1.17	−1.44	
11:00	−1.50	−1.45	−1.43		−1.64	−1.42	−1.63	
12:00	−1.30	−1.19	−1.15		−1.89	−1.64	−1.86	
13:00	−1.91	−1.88	−2.11		−1.91	−1.63	−1.88	
14:00	−1.88	−1.91	−2.11		−2.02	−1.78	−2.01	
Сред.	−1.53	−1.45	−1.52	−1.50	−1.79	−1.53	−1.76	−1.69
SD	0.37	0.47	0.58	0.04	0.22	0.24	0.23	0.14

Таблица 4. Усредненные величины $k(hmF_2)$ в недавние годы

	F_{30}	$Ly-\alpha$	$MgII$	Сред.
январь				
$k(hmF_2)$	-1.00	-1.35	-1.35	-1.23
SD	0.08	0.11	0.11	0.20
февраль				
$k(hmF_2)$	-0.88	-1.15	-0.94	-0.99
SD	0.32	0.46	0.41	0.14
июнь				
$k(hmF_2)$	-1.79	-1.59	-2.42	-1.93
SD	0.22	0.51	0.57	0.43
июль				
$k(hmF_2)$	-1.66	-1.70	-2.16	-1.84
SD	0.31	0.46	0.58	0.28

ситуации (станция, месяц) меняются от одного момента LT к другому гораздо сильнее, чем величины $k(hmF_2)$ для всего периода. Чтобы вычислить средние величины $k(hmF_2)$ для разных ситуаций (месяц, индекс СА), 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 табл. 4 приведены величины $k(hmF_2)$, усредненные по пяти рассмотренным моментам LT, для трех индексов СА для ст. Moscow.

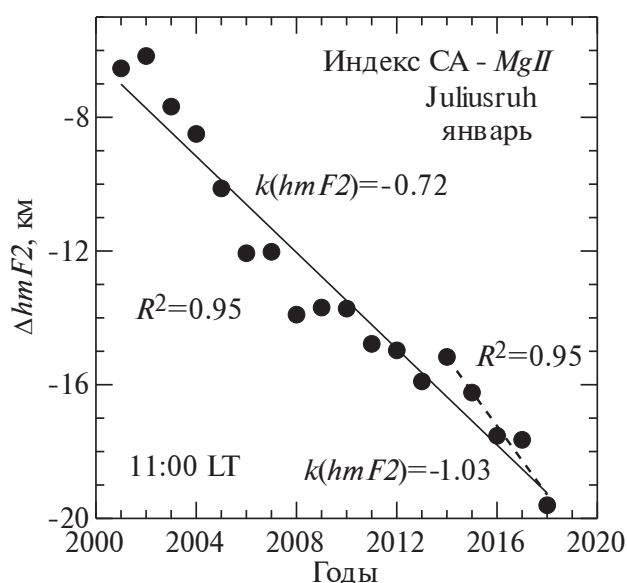
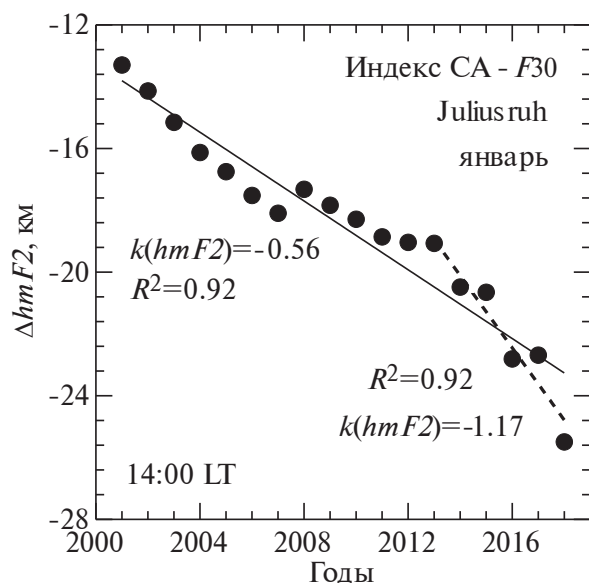
Как видно из сравнения этой таблицы с таблицами 2 и 3, для всех ситуаций средние величины тренда hmF_2 для недавних лет для ст. Moscow выше, чем для всего анализируемого периода 1996–2023 гг. Величины $k(hmF_2)$ для недавних лет в летние месяцы выше, чем в зимние. Превышение трендов для недавних лет 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 F_2 для ст. Moscow примерно на 30% больше, чем в среднем за период 1996–2013 гг.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ ст. JULIUSRUH

Анализ данных ст. Juliusruh был идентичен анализу данных ст. Moscow, описанному выше. Примеры изменения ΔfoF_2 со временем для ст. Juliusruh приведены на рис. 5 и рис. 6 для зимы и лета соответственно.

Видно, что характер изменения ΔfoF_2 со временем на рис. 5 и рис. 6 аналогичен таковому на рис. 1–4. Сводка полученных величин $k(hmF_2)$ для января и февраля для анализируемого периода приведена в табл. 5.

Как видно из этой таблицы, для нескольких моментов LT для февраля мы не смогли определить надежных величин $k(hmF_2)$ из-за хаотично-

**Рис. 5.** Примеры изменения ΔhmF_2 со временем в январе для ст. Juliusruh.

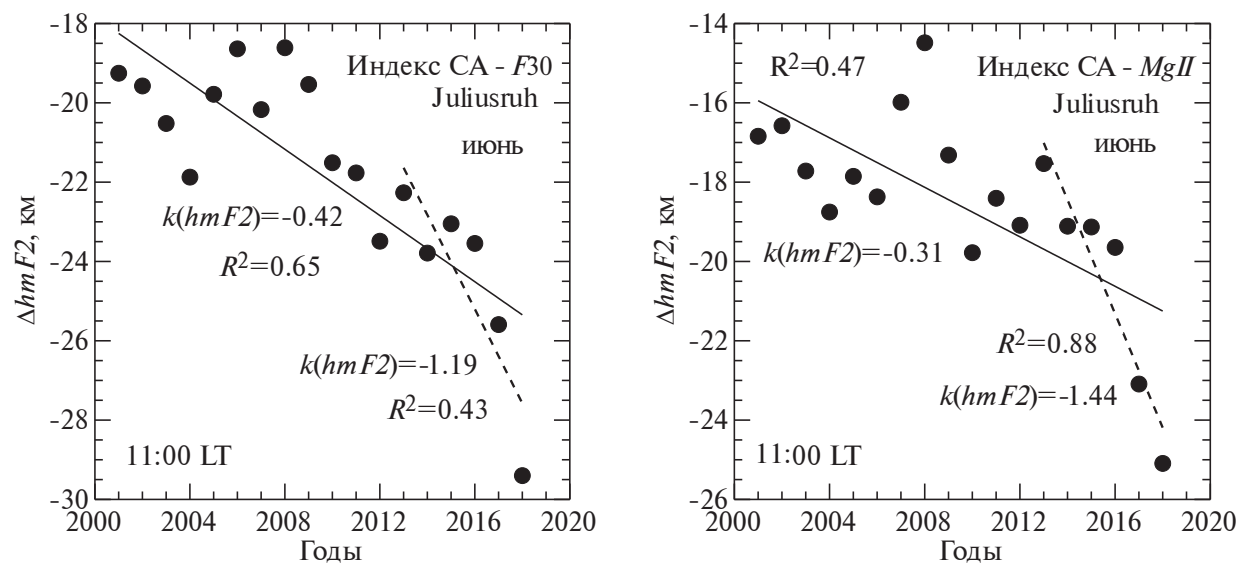


Рис. 6. Примеры изменения $\Delta hmF2$ со временем в июне для ст. Juliusruh.

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

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

го характера изменения величин $\Delta hmF2$ со временем. Однако, для января получены надежные величины тренда для всех моментов LT и всех индексов СА. При этом усредненные по всем моментам LT и всем индексам СА величины $k(hmF2)$ для обоих зимних месяцев различаются не сильно (−0.44 и −0.56 км/год), что позволяет надеяться, что даже для февраля получены правильные значения.

В ряде случаев на соответствующих рисунках (см. рис. 5 и рис. 6) наблюдаются увеличения наклона точек $\Delta hmF2$ в недавние годы для ст. Juliusruh, как это описано выше для ст. Moscow. Однако, разброс точек на некоторых ри-

сунках достаточно велик, что затрудняет получение величин $k(hmF2)$ для всех ситуаций.

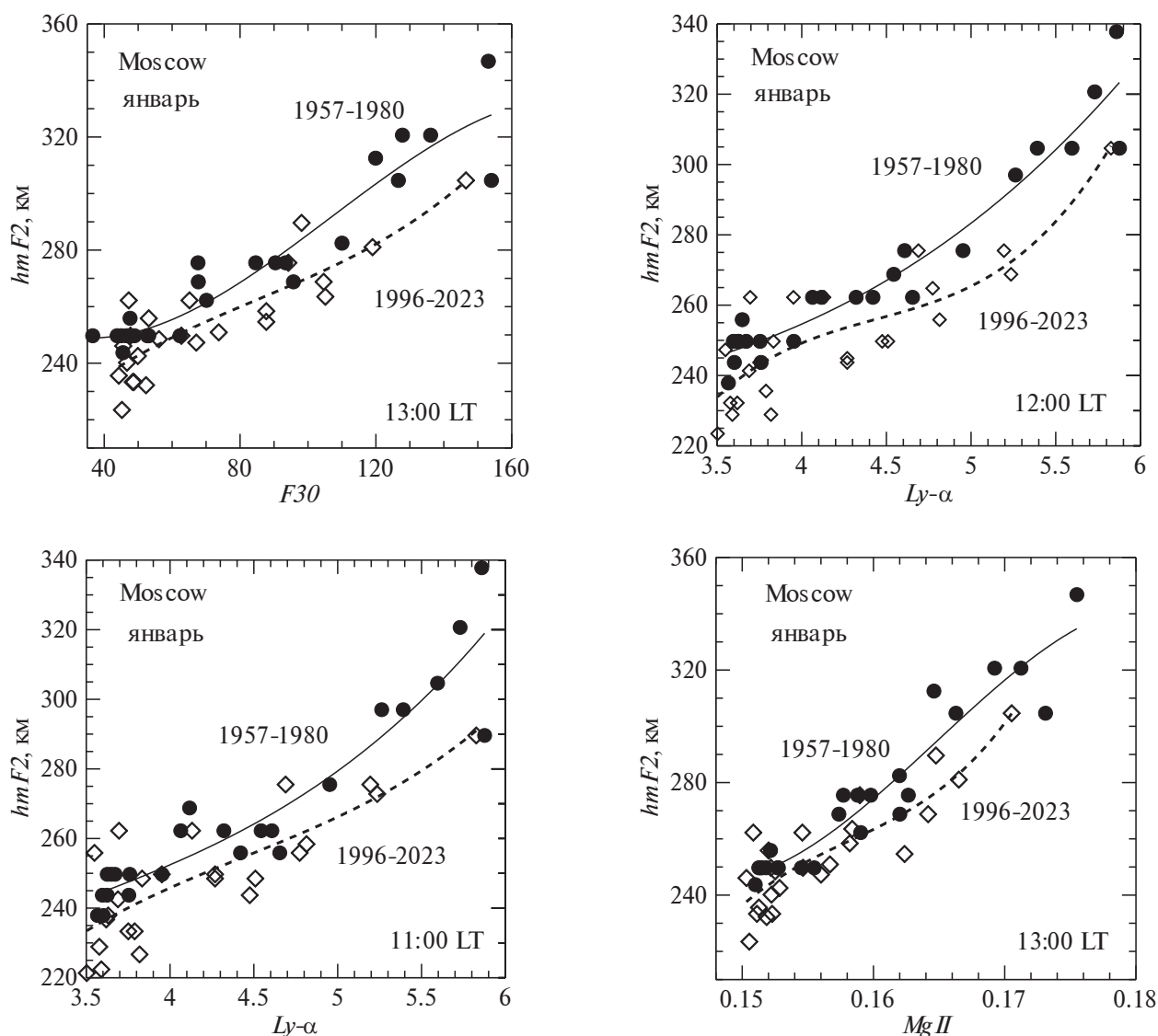
Мы провели также анализ трендов $hmF2$ для типичного летнего месяца июня. Результаты приведены в табл. 6. Видно, что величины $k(hmF2)$, полученные для июня усреднением по всем моментам LT и всем индексам СА (−0.48 км/год), близки к величинам, полученным для зимних месяцев (−0.44 и −0.56 км/год). Отличительной чертой рисунков для июня на ст. Juliusruh является то, что для недавних лет получаются гораздо более сильные тренды $hmF2$, чем для того же месяца для ст. Moscow, или для зимних месяцев на ст. Juliusruh.

Таблица 6. Величины $k(hmF_2)$ в км/год для июня (ст. Juliusruh)

LT	F_{30}	$Ly-\alpha$	$MgII$	Сред.
10:00	−0.44		−0.49	
11:00	−0.42	−0.67	−0.31	
12:00	−0.55	−0.42	−0.57	
13:00	−0.41	−0.47	−0.58	
14:00	−0.43	−0.45	−0.53	
Сред.	−0.45	−0.50	−0.50	−0.48
SD	0.06	0.11	0.11	0.03

4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА “ДЕЛЬТА”

Метод “Дельта”, предложенный ранее [Данилов и Константинова, 2017], является наиболее наглядным методом определения характера и примерной магнитуды трендов foF_2 . Он основан на том же сравнении величин foF_2 для заданного индекса солнечной активности в “эталонный” период (1957–1980 гг.), когда 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 foF_2 (или hmF_2) от выбранного индекса СА в каждом из периодов), и их различие и дает изменение foF_2 или hmF_2 (вели-

**Рис. 7.** Примеры зависимости hmF_2 от индексов СА для разных временных интервалов в январе (ст. Moscow).

чину 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 рис. 7 и рис. 8 соответственно. Как и при поиске трендов основным методом, мы аппроксимировали зависимости $hmF2$ от индексов СА полиномом третьей степени.

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 параграфе 2.

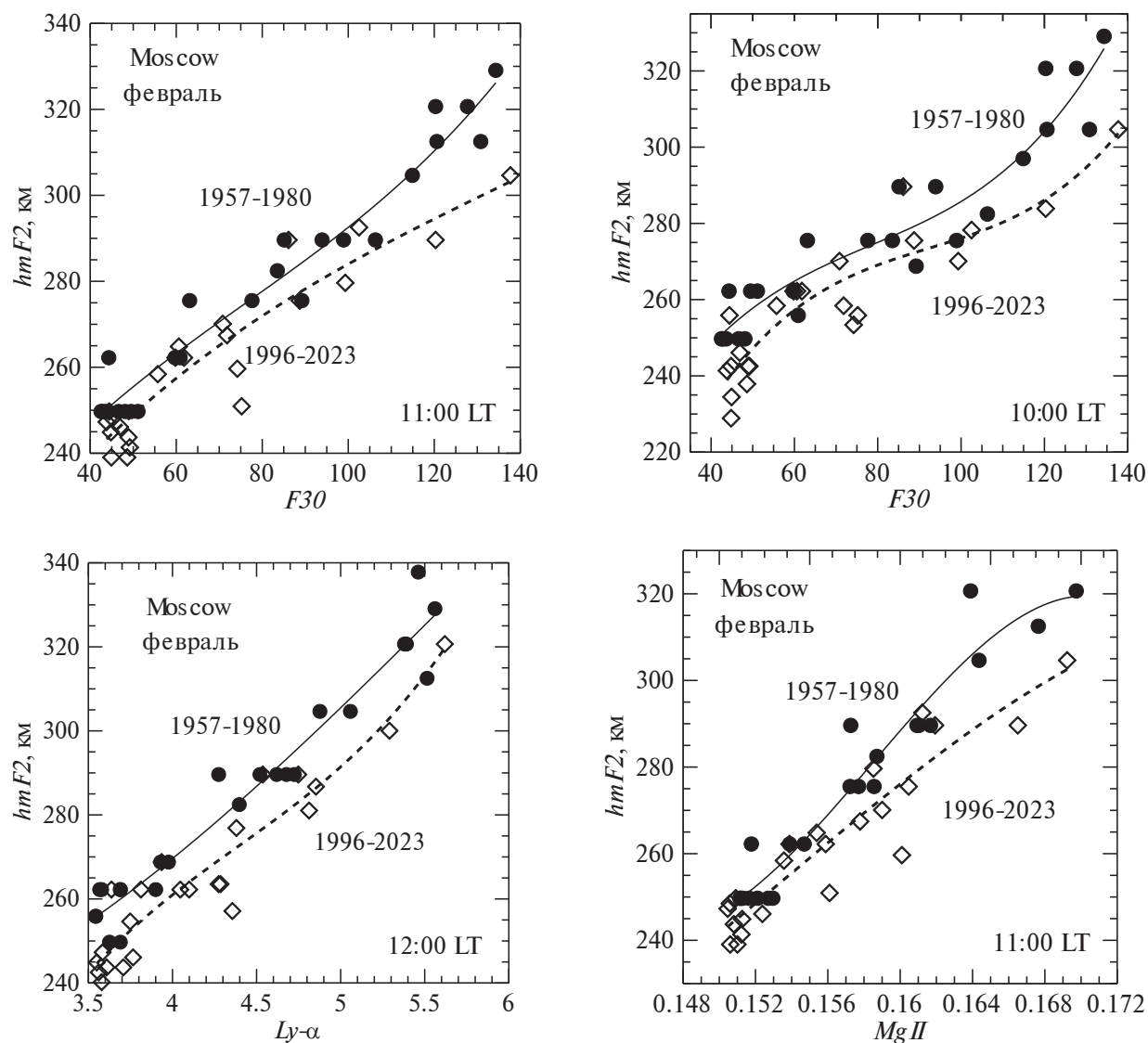


Рис. 8. Примеры зависимости $hmF2$ от индексов СА для разных временных интервалов в феврале (ст. Moscow).

Суммарная сводка результатов определения величин D приведена в табл. 7 и табл. 8 для ст. Moscow и Juliusruh соответственно. 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 табл. 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 F_2 hmF_2 над Москвой от эталонного периода 1957–1980 гг. до

анализируемого периода 1996–2013 гг. в зимние месяцы составляет около 10 км.

Таблица 8 показывает, что для ст. Juliusruh усредненные по всем моментам LT и индексам СА величины D для двух месяцев не сильно различаются между собой. Они лишь несколько выше, чем соответствующие величины для ст. Moscow. В среднем уменьшение hmF_2 от эталонного к анализируемому периоду для ст. Juliusruh зимой составляет около 16 км, что не сильно отличается от этого уменьшения для ст. Moscow.

Метод “Дельта” не позволяет определить величины тренда $k(hmF_2)$, но полученное уменьшение hmF_2 между двумя периодами качественно вполне согласуется с величинами тренда $k(hmF_2)$ для ст. Moscow и Juliusruh, полученными для зимних месяцев основным методом в параграф 2 и 3, соответственно. Результаты, полученные мето-

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

LT	январь				февраль			
	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	Сред.	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	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	1.0	1.6	1.7

Таблица 8. Величины D в км для ст. Juliusruh

LT	январь				февраль			
	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	Сред.	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	Сред.
10:00	6.3	19.4	12.9		13.8	26.5	11.9	
11:00	10.3	19.7	12.1		15.9	20.2	16.7	
12:00	11.7	24.8	13.7		18.9	22.9	18.2	
13:00	12.3	19	13.7		15.8	19.8	16.5	
14:00	9.9	18.7	15.3		19.9	23.9	16.5	
Сред.	10.1	20.3	13.5	14.6	16.9	22.7	16	18.5
SD	2.3	2.5	1.2	5.2	2.5	2.8	2.4	3.6

дом “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.

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 СА ($F30$, $Ly-\alpha$ 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 (анализировались январь и февраль) 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 СА относительно невелик, что показывают небольшие величины среднеквадратических ошибок при различных усреднениях (см. 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 получаются несколько меньшие абсолютные 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 — 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 получаются более сильными, чем для всего анализируемого периода [Данилов и Бербенева, 2023; Данилов и др., 2023б]. Для трендов $hmF2$ на основании данных ст. Moscow получена та же картина — для всех месяцев усредненные по моментам LT и индексам СА величины $k(hmF2)$ в последние годы 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 СА), 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 для зимних месяцев 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 CA и разных месяцев. Хотя метод “Дельта” не дает величин самих трендов, полученные для зимних месяцев величины D около 10 км для ст. Moscow и около 15 км для ст. Juliusruh являются надежным подтверждением отрицательных величин $k(hmF_2)$, полученных основным методом.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью работы было исследование трендов высоты слоя F_2 hmF_2 по данным ст. Moscow и Juliusruh в зимние месяцы, когда по нашим представлениям тренды foF_2 хорошо выражены (см. Данилов и др. [2024]). Результаты анализа величин этих трендов $k(hmF_2)$ показали, что и в январе, и в феврале для обеих станций наблюдается систематическое уменьшение высоты hmF_2 со временем в течение анализируемого периода (1996–2023 гг.). В этот период наблюдаются и отрицательные тренды критической частоты. Разброс получаемых величин $k(hmF_2)$ 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 hmF_2 получено увеличение магнитуды отрицательной величины $k(hmF_2)$ (усиление трендов), причем этот эффект достаточно хорошо выражен для ст. Moscow для обоих сезонов, но проявляется также и в данных ст. Juliusruh.

Наличие уменьшения высоты слоя F_2 со временем подтверждается применением метода “Дельта”, который в силу простоты и наглядности позволяет надежно определить характер изменения величин hmF_2 от “эталонного” периода (1957–1980 гг.) к анализируемому периоду (1996–2023 гг.). Для обеих станций получены отрицательные величины этого изменения D : ~11 км для ст. Moscow и ~17 км для Juliusruh.

Стоит отметить, что основной вывод данной работы о наличии отрицательных трендов hmF_2 подтверждает вывод нашей предыдущей публикации (Данилов и Константинова, 2013). Но в работе 2013 г. уменьшение hmF_2 было получено только по данным до 2010 г. и с использованием только индекса $F_{10.7}$ для устранения эффектов CA. Нам представляется очень важным тот факт, что указанный вывод подтверждается в данной работе анализом данных до 2023 г. с использованием трех индексов CA, которые по современным представлениям (см. Данилов и Бербенева [2024]) являются наилучшими для описания поведения параметров слоя F_2 .

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) и ИЗМИРАН ([http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_4/MO155_Moscow_\(IZMIRAN\)](http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_4/MO155_Moscow_(IZMIRAN))).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Тренды критической частоты слоя F_2 в последнее десятилетие // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 2. С. 139–146. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794022600697>
- Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Зависимость foF_2 от солнечной активности по данным ионосферных станций северного и южного полушарий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 2. С. 253–264. 2024.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Поведение параметров ионосферного слоя F_2 на грани веков. 2. Высота слоя // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 4. С. 486–499. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0016794013040068>
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные изменения параметра “дельта foF_2 ” 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 foF_2 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
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Детальный анализ суточных вариаций трендов foF_2 // Гелиогеофизические исследования. Вып. 39. С. 8–16. 2023б. https://doi.org/10.5425/2304-7380_2023_39_8
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Дальнейший детальный анализ зависимости foF_2 от солнечной активности // Гелиогеофизические исследования. Вып. 40. С. 68–80. 2023в. https://doi.org/10.5425/2304-7380_2023_40_68
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Тренды критической частоты foF_2 по данным стан-

ций Северного и Южного полушарий. Геомagnetизм и аэрономия. Т. 64. № 3. С. 387–400. 2024.

— *Bremer J.* Long-term trends in the ionospheric *E* and *F1* regions // *Ann. Geophysicae*. V. 26. № 5. P. 1189–1197. 2008. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-1189-2008>

— *Danilov A.D., Berbeneva N.A.* Statistical analysis of the critical frequency *foF2* dependence on various solar activity indices // *Adv. Space Res.* V. 72. № 6. 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. № 11. P. 4605–4618. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02884-y>

— *Gulyaeva T.L., Arian 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. № 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. № 1. P. 685–689. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.047>

— *Laštovička J., Burešová D.* Relationships between *foF2* and various solar activity proxies // *Space Weather* V. 21. № 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>

— *Shimazaki T.* World-wide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric *F2* layer // *J. Radio Res. Lab.* V. 2. № 7. P. 85–97. 1955.

— *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. № 2. P. 1396–1409. 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JA024675>

Long-Term Trends in the Height of the Maximum of the Ionospheric *F2* Layer

A. D. Danilov^{1,*}, A. V. Konstantinova¹, N. A. Berbeneva²

¹*Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia*

²*Physical Department of the Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*e-mail: adanilov99@mail.ru

Long-term variations (trends) in the height of the ionospheric *F2*-layer *hmF2* are analyzed based on the data of Moscow and Juliusruh stations. The near-noon LT hours and two winter (January and February) and two summer (June and July) months are considered over a period of 1996–2023. Well pronounced and statistically significant negative trends in *hmF2* are obtained both in summer and winter. Overall, the *F2*-layer height was decreasing during the considered 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 two recent decades. It is found that the *F2*-layer height is decreasing more rapidly during several recent years than in the previous years.