



УДК 550.388.2

ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ТРЕНДОВ $foF2$ А. Д. Данилов¹, А. В. Константинова¹, Н. А. Бербенева²¹Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова, Москва, Россия²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

В работе детально исследуются суточные вариации долговременных трендов критической частоты слоя $F2$, $foF2$, на основании наблюдений до 2022 г. с использованием пяти индексов солнечной активности (СА) для устранения эффектов СА в вариациях $foF2$. Новые результаты, подтверждающие выводы, полученные ранее на основании анализа данных только до 2014 г. В зимние месяцы в течение суток наблюдаются два хорошо выраженных периода – ночной, когда тренды малы по амплитуде и дневной, когда отрицательные тренды максимальны. В марте картина близка к таковой в зимние месяцы, но дневные отрицательные тренды слабее, чем зимой. Нет выраженной суточной вариации трендов $foF2$ в летнем месяце июне. Во все месяцы видна тенденция усиления отрицательных трендов в недавние годы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРНЫЙ СЛОЙ $F2$, ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ.

DOI 10.5425/2304-7380_2023_39_8

<https://elibrary.ru/lhsurf>**1. ВВЕДЕНИЕ**

Проблема трендов ионосферных параметров обсуждается в течение последнего десятилетия очень активно. Чтобы не перегружать статью ссылками, сошлемся на обзорные работы [Lastovicka 2023; Данилов и Константинова 2020a].

Авторами была выполнена серия работ по поиску трендов критической частоты слоя $F2$, $foF2$. Было показано, что наблюдаются долговременные изменения (тренды) $foF2$. Важным результатом указанных исследований было то, что эти тренды $k(foF2)$ отрицательны и зависят от местного времени и сезона. Они максимальны в дневные часы в зимние месяцы и минимальны (близки к нулю, или слегка положительны) в ночные часы и летом.

Наше последнее детальное исследование суточных и сезонных вариаций было опубликовано в 2015 г и базировалось на данных наблюдений до 2014 г. [Danilov 2015, Данилов и Константинова, 2015a]. Поскольку наличие суточных и сезонных вариаций $k(foF2)$ очень важно для всей проблемы поиска трендов (см. [Danilov and Konstantinova, 2023]), возникла необходимость повторить указанное детальное исследование, но используя наблюдения до 2022 г. Именно это и является целью данной работы.

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

<https://elibrary.ru/lhsurf>

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

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

В последние годы активно обсуждается вопрос о том, какие индексы солнечной активности (СА) лучше описывают зависимость критических частот ионосферных слоев E и $F2$ от СА. Подробную дискуссию по этому вопросу можно найти в недавних работах [Danilov and Konstantinova 2023; Данилов и др., 2023; Lastovicka and Buresova, 2023]. Здесь отметим просто, что анализ суточных вариаций $k(foF2)$ мы провели в этой работе для пяти наиболее часто употребляемых индексов СА: интенсивности линии Лайман-альфа ($Ly-\alpha$), отношению интенсивностей в центре и крыльях линии магния ($MgII$), число солнечных пятен (Rz), интенсивность солнечного радиоизлучения на волне 30 см ($F30$) и интенсивность солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см ($F10.7$). Подчеркнем, что в данном случае речь идет о чисто среднемесячном значении индекса $F10.7$.

Мы рассматривали поведение $k(foF2)$ в течение суток, т.е. проводили расчеты для 24-х часов местного времени для каждого из указанных пяти индексов и рассмотренных месяцев. Поскольку анализ полного годового хода $k(foF2)$ (т.е. всех 12-и месяцев) требует отдельного рассмотрения, мы приводим в этой работе анализ суточных вариаций только для двух зимних месяцев (январь и февраль), когда, согласно нашим предыдущим исследованиям, отрицательные тренды максимальны, для периода равноденствия (март) и типичного летнего месяца (июнь).

В наших публикациях мы неоднократно подробно описывали разработанный нами метод выделения трендов $foF2$, поэтому здесь мы дадим только его схематическое описание.

Мы рассматриваем период 1957-1980 гг. как «эталонный», предполагая, что тогда еще не было трендов, поскольку они имеют, скорее всего, антропогенное происхождение. Реальные наблюдения критической частоты сравниваются с «эталонными» значениями для заданных условий (месяц, время суток, LT), давая величину $\Delta foF2$. Изменение этой величины со временем (наклон аппроксимирующей линии) за период 1996-2023 гг. и дает искомый тренд.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1 Январь-Февраль

Результаты расчетов величин $k(foF2)$ представлены на рис. 1 и 2. Для компактности каждого рисунка мы поместили там результаты только для 4-х индексов СА. Для пятого индекса (Rz для рис. 1) и ($F10.7$ для рис. 2) результаты близки к результатам для остальных четырех индексов. Горизонтальные линии на рисунках показывают средние значения $k(foF2)$ для ночного и дневного интервалов LT. Наклонные линии – линейные аппроксимации точек в переходные периоды от дневных значений к ночным и обратно.

Основной вывод, который следует из указанных рисунков – для обоих месяцев для всех индексов СА наблюдается очень близкий характер суточного хода величины $k(foF2)$. Хорошо видно, что эта величина отрицательна и достаточно велика по амплитуде (от -0.025 до -0.045 МГц в год) в дневное время. Ночью она мала по абсолютной величине и может быть, как слегка отрицательной, так и слегка положительной.

Переходим к более детальному анализу результатов. В таблице 1 приведена вся информация: вечерние, ночные и утренние часы, когда наблюдаются ночные тренды, дневные часы и соответствующие величины $k(foF2)$ для каждого индекса СА.

Рассмотрим интервалы местного времени, в которые наблюдаются ночные и дневные величины $k(foF2)$. Как следует из табл. 1, в январе утренний интервал ночных значений $k(foF2)$ почти одинаков для всех пяти индексов: 0100-0400 LT для $Ly-\alpha$ и Rz и 0100-0300 LT для трех остальных индексов СА. А вечерний интервал ночных значений просто одинаков для всех пяти индексов: 2300-2400 LT.

Для февраля картина сложнее. Для двух индексов ($MgII$ и Rz) утренний интервал равен 0100–0800 LT, тогда как для трех других индексов ($Ly-\alpha$, $F30$, и $F10.7$) он равен 0100–0500 LT. Есть разброс и в величинах вечернего интервала. Он равен 2200-2400 LT для $F30$ и $F10.7$, 2000-2400 LT для $Ly-\alpha$ и $MgII$ и 2100-2400 LT для Rz .

Для периода стабильных отрицательных трендов днем наблюдается иная картина. В феврале дневное плато по данным всех индексов СА начинается в 1100 LT и заканчивается в 1800 LT. В январе же время начала дневного плато колеблется в зависимости от индекса СА от 1000 LT до 1300 LT, а заканчивается плато в 1700-1800 LT.

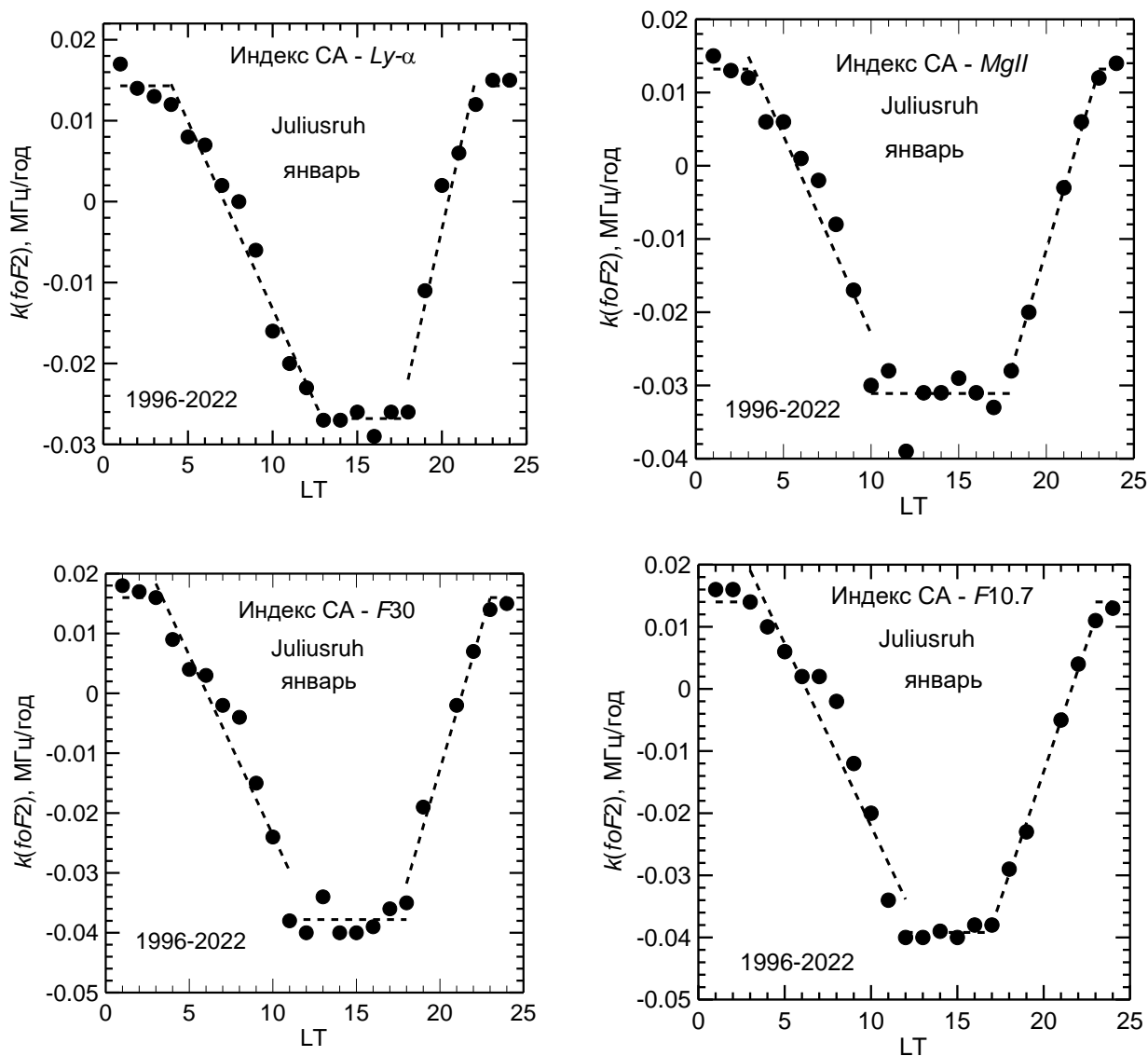


Рис. 1. Изменение тренда $foF2$ с местным временем для января

Таблица 1. Величины трендов (в МГц/год) и интервалы LT, в которые они получены.

$Ly-\alpha$		MgII		Rz		F30mon		F10.7mon	
LT	$k(foF2)$	LT	$k(foF2)$	LT	$k(foF2)$	LT	$k(foF2)$	LT	$k(foF2)$
январь									
1-4, 23-24	0.014	1-3, 23-24	0.010	1-4, 23-24	0.011	1-3, 23-24	0.016	1-3, 23-24	0.014
13-18	-0.027	10-18	-0.031	12-18	-0.043	11-18	-0.038	12-17	-0.039
февраль									
1-5, 20-24	-0.004	1-8, 20-24	-0.006	1-8, 21-24	-0.004	1-5, 22-24	-0.005	1-5, 22-24	0.00
11-18	-0.034	11-18	-0.048	11-18	-0.044	11-18	-0.041	11-18	-0.036

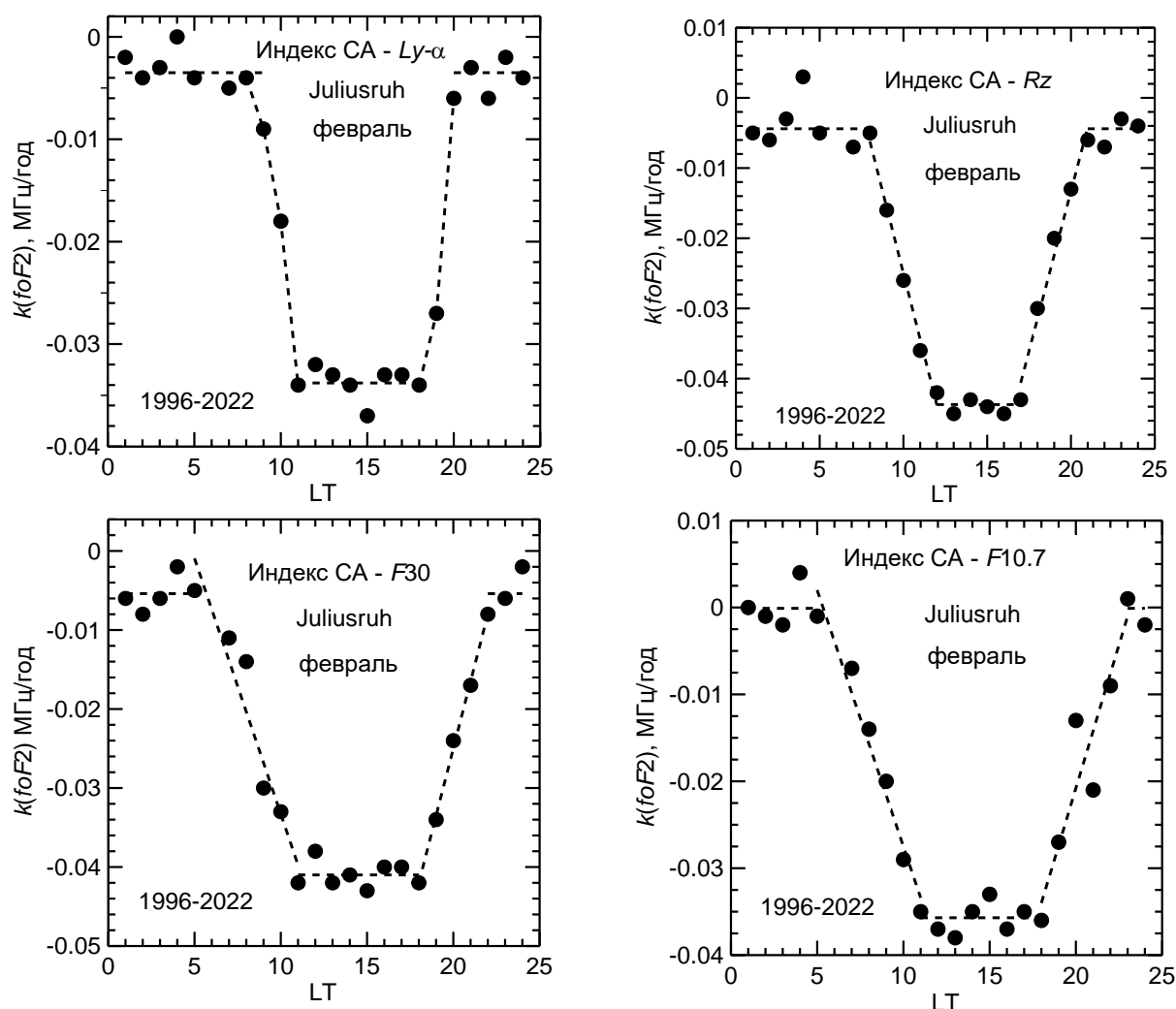


Рис. 2. Изменение тренда $foF2$ с местным временем для февраля

Важным моментом сравнения двух месяцев по этому параметру является то, что переход от стабильной ночной ситуации к стабильной дневной происходит в феврале гораздо быстрее (за 3 часа с 0800 LT до 1100 LT), чем в январе (в среднем примерно за 7 часов).

То, что наблюдается указанная разница в длине переходного периода, вероятно, связан с зенитным углом Солнца. Ведь восход Солнца в феврале происходит значительно позже, чем в январе – это, фактически, единственная разница между месяцами. Указанный факт может оказаться важным при анализе механизмов реализации отрицательных трендов $foF2$.

Рассмотрим теперь величины полученных трендов. В январе в ночные часы все полученные значения $k(foF2)$ слегка положительны (от +0.011 до +0.016 МГц в год). В феврале эти значения для четырех СА индексов слегка отрицательны и лежат в достаточно узком интервале от -0.004 до -0.006 МГц в год. Лишь для $F10.7$ получен строго нулевой тренд.

Таким образом, для зимних месяцев получается главный результат – в ночные часы величины $k(foF2)$ либо слегка положительны, либо слегка отрицательны. Можно считать, что они лежат в пределах от -0.006 до +0.016 МГц в год.

В дневные часы в январе величины $k(foF2)$ лежат в пределах от -0.027 до -0.043 МГц в год. В феврале этот интервал составляет от -0.034 до -0.046 МГц в год. Видно, что разброс значений при использовании всех пяти индексов в январе несколько больше, чем в феврале.

Важным является вопрос о том, какие индексы солнечной активности наиболее надежно описывают изменение критической частоты $foF2$. Иначе говоря, величинам $k(foF2)$, полученным с помощью каких индексов, мы можем доверять больше.

Этот вопрос рассматривался в последнее время многими авторами. Краткий обзор публикаций на эту тему можно найти в нашей работе (Данилов и Константинова, 2023). Вопрос о качестве описания различными индексами СА поведения критической частоты слоя $F2$ с изменением солнечной активности был подробно рассмотрен также в недавней работе (Danilov and Berbeneva, 2023) и было

получено, что наиболее надежным является описание индексами $F30$ и $MgII$. Если мы ограничим наше рассмотрение суточных вариаций трендов $foF2$ только этими индексами CA , то мы получим в дневные часы для января $k(foF2) = -(0.031-0.038)$ МГц в год и для февраля $k(foF2) = -(0.041-0.048)$ МГц в год. Видно, что разброс для каждого месяца совсем невелик, и есть систематическое различие – в феврале отрицательные тренды днем на 0.01 МГц в год сильнее в феврале, чем в январе.

2.2. Март

Март является не зимним, а равноденственным месяцем, поэтому ожидать значительного согласия с результатами для зимних месяцев не приходится. Полная картина изменения $foF2$ для марта должна будет анализироваться детально при подробном рассмотрении сезонных вариаций величин $k(foF2)$.

Тем не менее, мы приводим на рис. 3 картину суточных вариаций $k(foF2)$ в марте для двух индексов CA , $MgII$ и $F30$, которые мы считаем наилучшими для описания изменения $foF2$ со временем (см. выше).

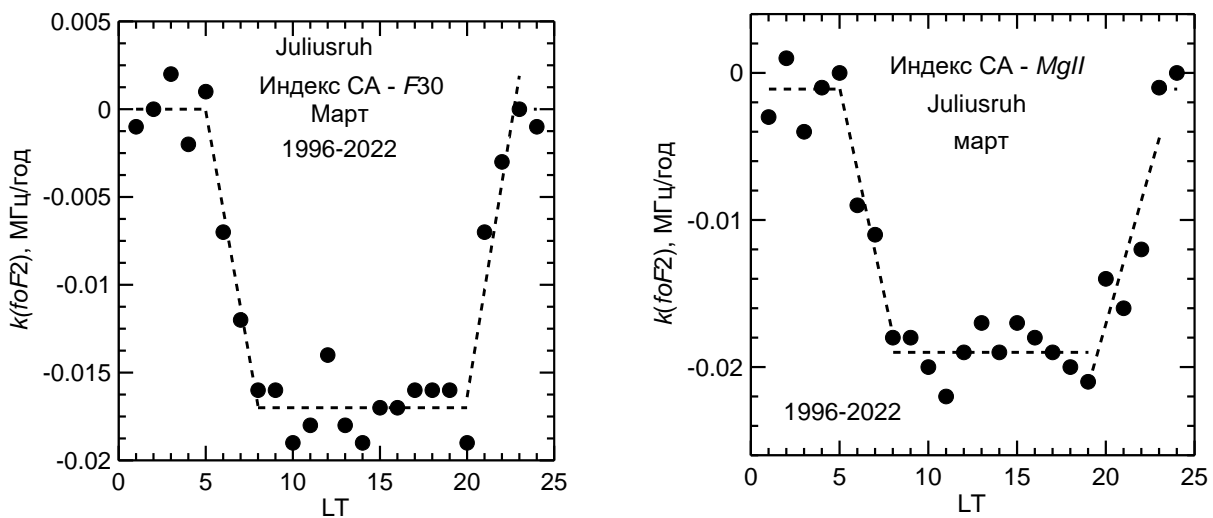


Рис. 3. Изменение тренда $foF2$ с местным временем для марта

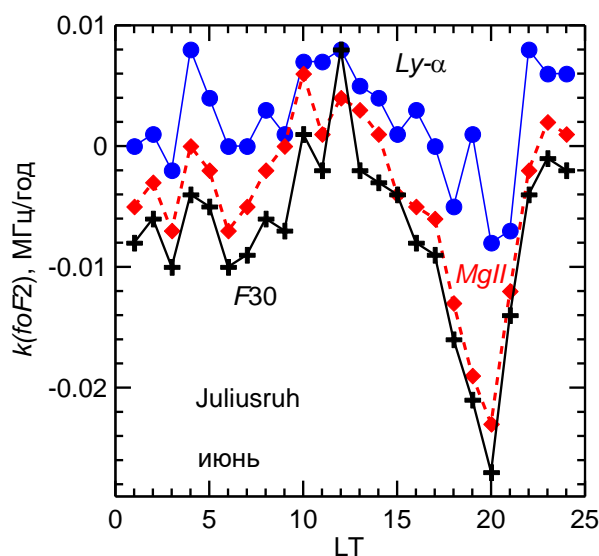
Как видно из этого рисунка, в целом картина суточных вариаций $k(foF2)$ в марте остается такой же, как и в рассмотренные выше зимние месяцы. Но есть и существенные отличия.

Прежде всего, бросается в глаза гораздо больший, чем в зимние месяцы, разброс точек как в ночные, так и в дневные часы. Абсолютные величины трендов ночью практически не отличаются от величин $k(foF2)$ на рис. 1-3 – тренды очень малы. Днем, однако, отрицательные тренды в марте заметно меньше по абсолютной величине, чем зимой. В марте их амплитуда не превосходит 0.02 , тогда как в январе она превышала 0.03 , а в феврале 0.04 .

Длительность ночного плато в марте такая же, как и в январе ($2300-0500$ LT). А вот дневное плато начинается в марте раньше (0800 LT) и кончается позже, чем в зимние месяцы. Здесь связь с зенитным углом Солнца напрашивается сама собой – в марте Солнце и восходит раньше, и заходит позже, чем в зимние месяцы.

Совершенно иная картина наблюдается в типичном летнем месяце июне. Изменение $k(foF2)$ при использовании трех основных индексов приведено на рис. 4. Этот рисунок показывает, что суточные вариации тренда $foF2$ в июне разительно отличаются от таковых в зимние и весенние месяцы.

Летом в течение большей части суток величины $k(foF2)$ малы по амплитуде и лежат в пределах ± 0.01 МГц в год. Лишь в интервале $1800-2100$ LT эти величины для $MgII$ и $F30$ опускаются ниже -0.025 МГц в год. Для $Lu-a$ в этом интервале местного времени также заметна тенденция к усилению отрицательного тренда, но амплитуда этого усиления много меньше, чем для $MgII$ и $F30$. Хорошее согласие между изменением $k(foF2)$ с LT для $MgII$ и $F30$ (коэффициент корреляции равен 0.82) лишь усиливает наше выводы, о которых говорилось выше, что эти индексы CA являются лучшими для описания поведения $foF2$.

Рис. 4. Изменение $k(foF2)$ с местным временем для июня

Следует иметь в виду, что тренды с магнитудой меньше 0.01 МГц в год имеют очень низкий коэффициент определенности R^2 , поэтому их статистическая значимость S очень мала. Правильнее говорить, скорее, о том, что в течение большей части суток в июне значимые тренды отсутствуют. Исключение составляет лишь указанный выше интервал LT, в котором величины S для $k(foF2)$ составляют 98-99%.

В целом результаты приведенного краткого сравнения подтверждает общее представление о том, что в зимний период наблюдаются наиболее сильные отрицательные тренды. Они максимальны по магнитуде в дневное время и минимальны ночью. Амплитуда выраженных суточных вариаций $k(foF2)$ максимальна зимой и уменьшается к равноденствию. Эти вариации исчезают в летние месяцы. В июне отмечается лишь достаточно узкий интервал LT, в котором величины $k(foF2)$ падает до $-(0.02-0.03)$ МГц в год.

Этот эффект обнаружен нами впервые. Требуется подтверждение его реальности в данных для других летних месяцев в рамках детального исследования сезонных вариаций трендов.

2.3 Недавние годы

В процессе анализа данных для получения результатов, описанных выше, мы обнаружили странный факт. На большинстве рисунков, которые строятся для определения тренда за весь рассматриваемый период (1996-2022 гг.) точки для последних нескольких лет дают гораздо более высокий тренд, чем получается при анализе всех точек.

Примеры для тех ситуаций (дневной период), когда тренды за весь период (сплошные линии) хорошо выражены и статистически значимы, приведены на рис. 5. Видно, что наклон штриховых линий (тренд в недавние годы) заметно выше, чем наклон сплошных линий.

Еще более разительная картина наблюдается для ситуаций (ночные часы, а также июнь), когда тренд за весь период 1996-2022 мал. Хотя для всего периода тренд практически отсутствует, для нескольких недавних лет наблюдается хорошо выраженное падение $\Delta foF2$ с высокими величинами R^2 . Именно такая картина наблюдается на рис. 6, где это падение в недавние годы очень хорошо выражено. В большинстве случаев при положительном тренде для всего периода переход к падению $\Delta foF2$ в недавние годы также происходит, но дает меньшие величины $k(foF2)$.

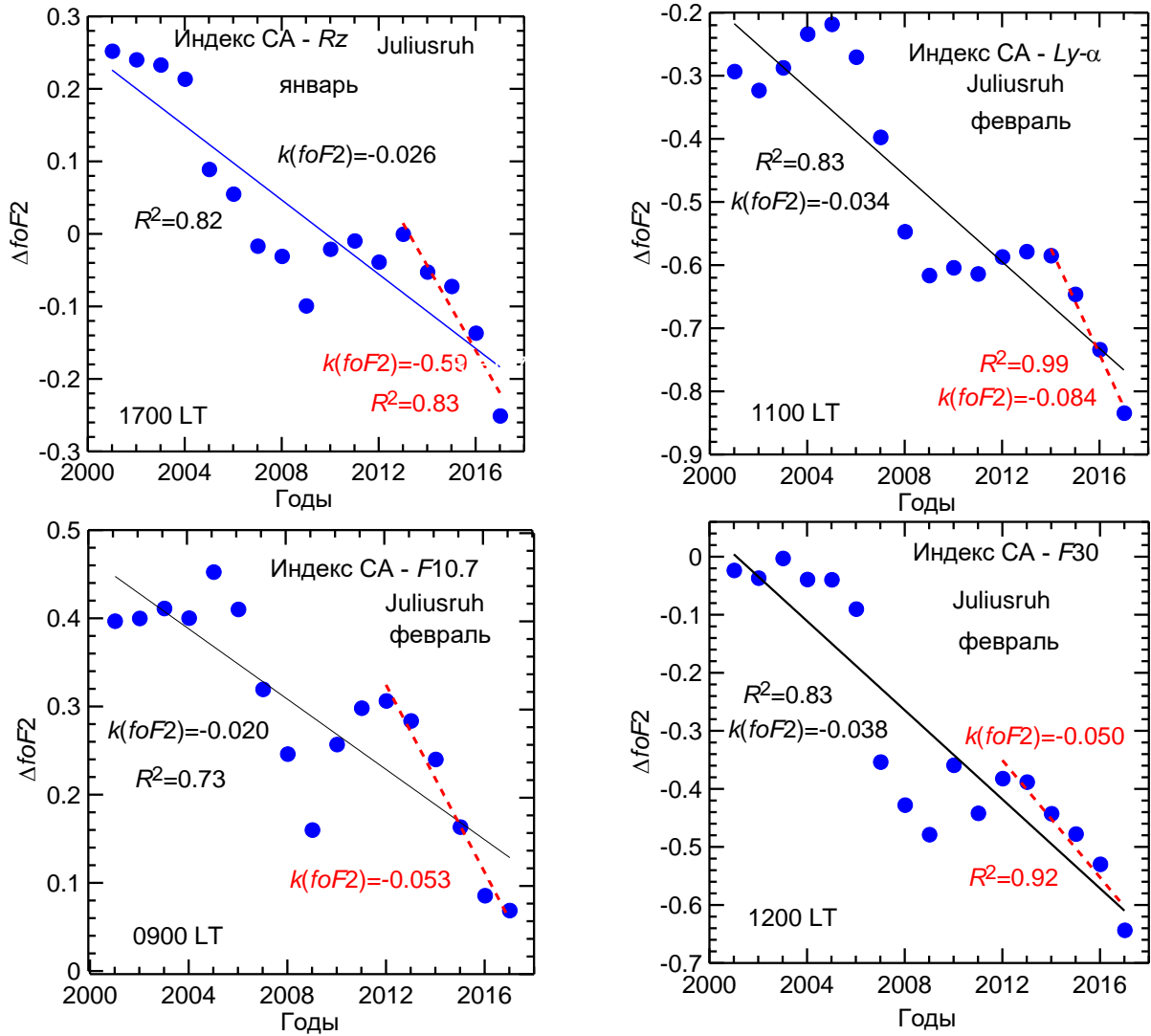


Рис. 5. Примеры зависимостей $\Delta foF2$ от времени для дневных ситуаций.

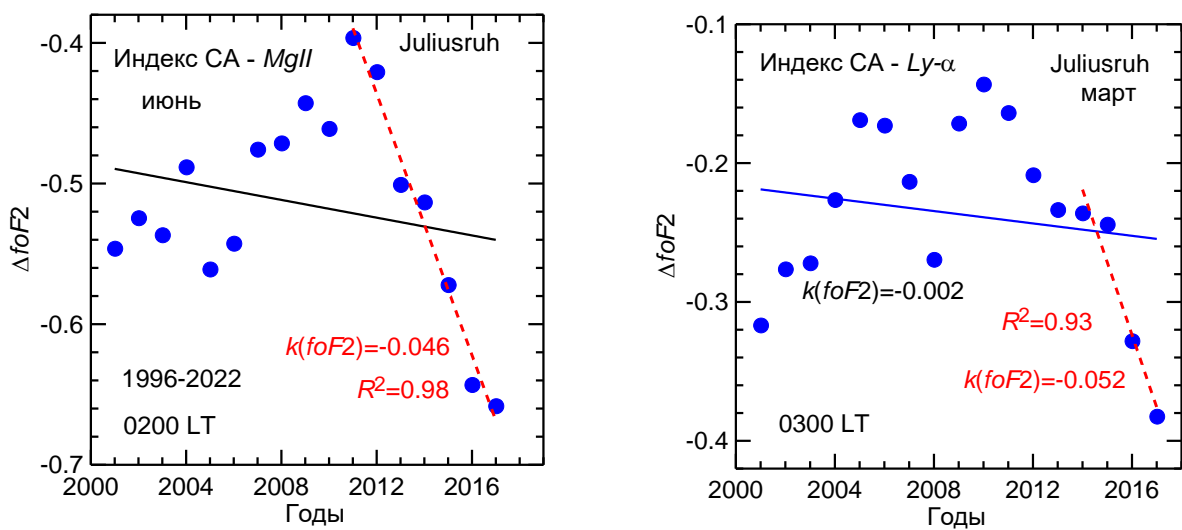


Рис. 6. Примеры зависимостей $\Delta foF2$ от времени для ночных ситуаций

В таблице 2 приведено количество N моментов LT, для которых величины $k(foF2)$ были «более отрицательными» для последних лет, чем для всего рассмотренного периода. Видно, что для $Ly-a$ это справедливо для всех 24-х часов суток в оба месяца. В остальных случаях это справедливо для большей части моментов LT. В целом величина N составляет 83% ото всех ситуаций, рассмотренных в таблице 2.

Таблица 2. Величины N (см. текст).

Индекс СА	$Ly-a$	$MgII$	$F30$	$F10.7$	Rz
январь	24	19	13	16	18
февраль	24	23	19	23	19

Все сказанное в данном подразделе указывает на то, что в течение последних лет наблюдается усиление отрицательного тренда $foF2$. Но надо, конечно, иметь в виду, что высокие тренды за последние годы получены на основании всего нескольких (от 3-х до 8-ми) точек. Высокая статистическая значимость получается при этом лишь за счет очень высоких величин R^2 . Тем не менее, поскольку эффект, как видно из таблицы 2, наблюдается в подавляющем большинстве случаев, это может быть указанием на какой-то реальный процесс.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во введении уже подчеркивалось, что вопрос о суточных вариациях трендов $foF2$ является очень важным для всей проблемы трендов. Во многих исследованиях этих трендов анализировался весь массив экспериментальных данных по $foF2$ без разделения данных по моментам LT и месяцам. Мы указывали в свое время [Данилов и Константинова 2015б], что это может быть одной из причин ошибок в работах, где получались близкие к нулевым величины трендов $foF2$. Анализ, выполненный нами по данным до 2014 г. [Danilov 2015; Данилов и Константинова, 2015а], позволил выявить существенные вариации величин $k(foF2)$ с местным временем и сезоном.

В работе Yue et al. [2017] на основании анализа данных станции Uhan было получено, что наблюдаются такие же сточные вариации трендов $foF2$ как и в наших результатах 2015 г.: в околополуденные часы отрицательные тренды максимальны. Недавняя работа аргентинских авторов [Duran et al., 2023] была специально посвящена проблеме суточных и сезонных вариаций трендов $foF2$. В частности, был получен суточный ход $k(foF2)$, близкий к тому, что было получено в наших публикациях 2015 г: 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.

Целью данной работы было повторить анализ 2015 г. с двумя существенными добавлениями. Во-первых, использовать данные наблюдений уже до 2022 г. Во-вторых, с учетом сегодняшних тенденций в поисках трендов, проанализировать разные индексы солнечной активности для удаления эффектов СА в долговременных изменениях $foF2$.

Основной результат работы хорошо виден на рис. 1 и 2. Для всех индексов СА в зимние месяцы получается одна и та же картина – есть периоды слабых ночных трендов и периоды сильных отрицательных дневных трендов. При этом абсолютные величины трендов как днем, так и ночью близки при использовании всех рассмотренных индексов СА.

Хотя детального исследования сезонных вариаций трендов $foF2$ в этой работе не проводилось, выполненные расчеты для марта, как типичного равноденственного месяца, показывают, что принципиальная картина суточных вариаций сохраняется такой же, как и в зимние месяцы, но магнитуа дневных отрицательных трендов заметно меньше. В июне же заметного перехода ото дня к ночи нет вообще, а есть лишь странный вечерний период, когда величина $k(foF2)$ опускается ниже -0.02 МГц в год.

Неожиданным явился результат об усилении отрицательных трендов $foF2$ в течение нескольких недавних лет. Уместно отметить, что усиление отрицательных трендов $foF2$ в недавние годы отмечалось и в наших недавних работах [Danilov and Konstantinova, 2023; Данилов и др. 2023]. В данной работе этот эффект был проанализирован детально на основании всех рассмотренных данных с использованием всех пяти индексов СА и был получен тот же результат.

Результат этот базируется на поведении всего нескольких (от 3 до 8) точек на графиках и потому к нему надо относиться с осторожностью. Мы сочли нужным, там не менее, его описать (см.

подраздел 2.3) прежде всего потому, что такой эффект, если он действительно существует, может быть очень важен как в плане возможных последствий для проблем распространения радиоволн, так и для понимания протекания процессов охлаждения и оседания верхней атмосферы из-за увеличения количества CO₂. Очевидно, что реальность этого эффекта должна проясниться в ближайшие годы по мере появления новых точек на анализируемых графиках типа рис. 4 и 5.

ЛИТЕРАТУРА

- Данилов А. Д., Константинова А. В. Вариации трендов *foF2* с сезоном и местным временем. Т. 55. №1. С. 56-65. 2015а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Сравнение трендов параметров слоя *F2*, полученных разными авторами. Геомагнетизм и аэрономия. Т.55. №4. С.473-482. 2015б.
- 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.
- Данилов А. Д., Константинова А. В., Бербенева Н. А. Анализ трендов *foF2* до 2022 г. с использованием разных индексов солнечной активности. Гелиогеофизические исследования. Вып. С. 2023.
- Bilitza, D., International Reference Ionosphere 1990, National Space Science Data Center, NSSDC 90-92, Greenbelt, Maryland. 1990.
- Chen Y., Liu L., Le H., Zhang H., Zhang R. Responding trends of ionospheric F2-layer to weaker geomagnetic activities, J. Space Weather Space Clim. 12, 6 <https://doi.org/10.1051/swsc/2022005> 2022
- Danilov, A.D., 2015. Seasonal and diurnal variations in *foF2* trends. J. Geophys. Res. Space Phys. 120, doi:10.1002/2014JA020971
- Danilov A. D., Konstantinova A. V. Trends in *foF2* to 2022 and various solar activity indices. Adv. Space Res. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.028>. 2023.
- 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.
- Laštovička, J. Progress in investigating long-term trends in the mesosphere thermosphere and ionosphere. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-302>. 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. doi: 10.1002/2017JA024675. 2017.

DETAILED ANALYSIS OF THE DIURNAL VARIATIONS IN THE *foF2* TRENDS

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

Diurnal variations in the *F2*-layer critical frequency, *foF2*, are studied in detail based on the observations to 2022 and using five solar activity (SA) indices to remove the SA effects in the *foF2* variations. The new results confirm the results obtained earlier based on the analysis of data only to 2014. In the winter months during the day, two well pronounced periods are seen: the nighttime when the trends are small by their magnitude and the daytime, when the negative trends are maximal. In March, the picture is close to that in the winter months, but the daytime negative trends are weaker than in winter. There are no pronounced diurnal variations in the *foF2* trends in the summer month June. In all months, a tendency of intensification of the negative trends during the recent years is seen.

KEYWORDS: IONOSPHERIC LAYER F2, LONG-TERM TRENDS