



УДК 550.388.2

ДАЛЬНЕЙШИЙ ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ $foF2$ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А. Д. Данилов^{1*}, А. В. Константинова¹, Н. А. Бербенева²¹ Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПГ), Москва, Россия² Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Продолжен анализ зависимости критической частоты слоя $F2$ от различных индексов солнечной активности, начатый в ряде предыдущих статей авторов на основании данных станции Juliusruh. В этой статье анализируются данные шести станций в северном и пяти станций в южном полушариях. За меру качества описания зависимости $foF2$ от SA принимается коэффициент определенности R^2 для указанной зависимости в каждой конкретной ситуации (станция, месяц, местное время). Подтвержден вывод о том, что для четырех индексов SA в зимние месяцы наблюдается хорошо выпаженный суточный ход величины R^2 : в дневные часы эта величина максимальна и меняется слабо, существенно уменьшаясь к ночным часам. Получено, что наилучшим индексом SA для описания поведения $foF2$ в солнечном цикле является индекс $F30$, тогда как число солнечных пятен Rz является наихудшим. На основании сравнения изменения R^2 с LT в одни и те же месяцы на станциях северного и южного полушарий показано, что указанный хорошо выраженный суточный ход R^2 наблюдается только зимой и отсутствует летом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, ИОНОСФЕРНЫЙ СЛОЙ $F2$, ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ

DOI 10.5425/2304-7380_2023_40_68

<https://elibrary.ru/nxzrig>

1. ВВЕДЕНИЕ

Критическая частота ионосферного слоя $F2$, $foF2$, является очень важным параметром, знание которого необходимо для решения многих проблем ионосферного распространения радиоволн. Очевидно, что очень важно знать зависимость $foF2$ от различных внешних параметров. В первую очередь это относится к зависимости от солнечной активности (SA), поскольку избавление от эффектов SA является первым шагом при анализе зависимости критической частоты от сезона и метеорологической обстановки (так называемое «coupling from below»), а также при поиске долговременных изменений (трендов) $foF2$.

В последнее десятилетие изучению трендов параметров термосферы и ионосферы уделяется большое внимание. Чтобы не перегружать статью обсуждением этой проблемы и подробной библиографией, мы отсылаем читателей к недавней статье Данилова и Бербенева [2023], где

Электронная почта авторов для переписки:

Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: adanilov99@mail.ru<https://elibrary.ru/nxzrig>Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

приводится краткий обзор проблемы и аргументы в пользу необходимости анализа зависимости $foF2$ от СА с использованием различных индексов СА.

В указанной работе приведены результаты детального анализа зависимости $foF2$ от СА для периода 1957–1980 гг., когда предполагается, что не было трендов критической частоты антропогенного происхождения, с использованием пяти наиболее известных индексов СА ($Ly-\alpha$, $MgII$, Rz , $F30$ и $F10.7mon$). В работе анализировались результаты наблюдений только на ст. Juliusruh.

Для лучшего понимания результатов данной работы сформулируем краткие результаты предыдущей статьи. Использовались месячные медианы $foF2$ за указанный период, и строилась зависимость $foF2$ от каждого из указанных пяти индексов СА. Подробно анализировались два зимних месяца (январь и февраль) и сравнивались с результатами для двух равноденственных месяцев (март и октябрь) и типичного летнего месяца (июнь). В качестве критерия качества описания зависимости $foF2$ от СА каждым из индексов использовалась величина коэффициента определенности R^2 для каждой из указанных зависимостей.

Было получено, что при использовании всех пяти индексов СА в зимние месяцы наблюдается четко выраженный суточный ход R^2 – в дневной период величины максимальны, а ночью – минимальны. Кривые для индексов $Ly-\alpha$, $MgII$ и $F30$ как правило близки между собой, но все-же наблюдается некоторое систематическое различие, которое позволило нам сделать вывод о том, что наилучшим для описания зависимости $foF2$ от СА является индекс $F30$, за которым следуют $MgII$ и затем $Ly-\alpha$.

Было обнаружено, что в случае использования числа солнечных пятен Rz в ряде случаев величина R^2 существенно уменьшается по сравнению с «нормальным» суточным ходом для четырех других индексов, сильно искажая свой суточный ход. Это позволило нам сделать вывод, что индекс Rz является худшим для анализа зависимости критической частоты от солнечной активности.

Для равноденственных месяцев также получено, что четыре индекса $Ly-\alpha$, $MgII$, $F30$ и $F10.7mon$ дают в среднем близкие результаты, хотя сохраняется некоторое превосходство индекса $F30$. Для индекса Rz также получен тот же результат, что и для зимних месяцев – величины R^2 при использовании этого индекса значительно меньше, чем при использовании других индексов, и резко нарушается «нормальный» суточный ход R^2 .

Обнаружено, что в июне суточный ход величины R^2 вообще отсутствует – наблюдаются нерегулярные скачки этой величины от часа к часу для всех индексов.

Мы еще вернемся ниже к некоторым результатам предыдущей работы Данилова и Бербенева [2023] при сравнении с ними результатов данного исследования. Целью этого исследования является проверка выводов, полученных путем анализа данных ст. Juliusruh, на основании данных других ионосферных станций в разных долготных и широтных зонах.

Мы провели анализ, аналогичный анализу в предыдущей работе, для одиннадцати станций. Четыре из них (Slough, Moscow, Alma-Ata и Akita) находятся в Евразии, две (Hobart и Townsville) в Австралии, одна (Johannesburg) в Африке и четыре (Boulder, Ottawa, Port Stanley и Concepcion) в западном полушарии. Вместе со ст. Juliusruh семь станций представляют северное полушарие и пять – южное.

В данной работе, анализируя станции евразийского региона, мы ограничились детальным анализом только двух зимних месяцев, подробно рассмотренных в наших предыдущих работах. Одной из причин этого является то, что поиски лучшего индекса для описания зависимости $foF2$ от СА важны в первую очередь для проблемы поиска долговременных трендов критической частоты, а эти тренды максимальны именно зимой [Данилов и Константинова, 2020]. Вторая причина состоит в том, что согласно предыдущей работе (Данилов и Бербенева [2023]), эффекты, позволяющие определить лучший из индексов СА, хорошо всего видны именно в зимние месяцы. Эти эффекты прослеживаются также и в равноденственные месяцы, а летом суточный ход R^2 носит беспорядочный характер.

Поскольку метод анализа полностью идентичен методу, использованному в предыдущей статье, где он подробно описан, мы отметим лишь основные моменты.

Для каждого из анализируемых месяцев (январь, февраль) мы строили для каждого часа местного времени зависимость $foF2$ от выбранного индекса СА. Эта зависимость аппроксимировалась полиномом третьей степени. Как меру качества описания экспериментальных величин $foF2$ указанной аппроксимацией мы рассматривали коэффициент определенности R^2 согласно F-тесту Фишера.

2. R^2 КАК МЕРА КАЧЕСТВА ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ $foF2$ ИНДЕКСАМИ СА

Весь анализ в данной статье строится на том положении, что коэффициент определенности R^2 зависимости $foF2$ от СА для данного индекса СА является индикатором качества описания этим индексом зависимости критической частоты от солнечной активности. Этот коэффициент легко определяется при построении соответствующего графика и является достаточно наглядным. Он прямо связан со среднеквадратической ошибкой σ описания поведения $foF2$ данным индексом СА в заданной ситуации (станция, месяц, момент LT). Вот ряд конкретных примеров. Для ст. Juliusruh в 1700 LT в феврале величина $R^2 = 0.99$ при использовании индекса $F30$, и соответствующая величина $\sigma = 0.30$ МГц. В той же ситуации, но для индекса Rz $R^2 = 0.92$ и $\sigma = 0.69$ МГц. Для ситуации Boulder, февраль, 2400 LT соответствующие величины равны 0.97 и 0.15 МГц для $F30$ и 0.79 и 0.38 МГц для Rz . Для ситуации Slough, февраль, 1700 LT соответствующие величины равны 0.96 и 0.49 МГц для $F30$ и 0.87 и 0.90 МГц для Rz . Из этих примеров видно, что при уменьшении R^2 значительно увеличивается ошибка σ .

Все результаты, приведенные в следующих параграфах, основаны на анализе для каждой конкретной ситуации (станция, месяц, LT, индекс СА) зависимостей типа приведенных на рис. 1. Мы для наглядности выбрали как примеры контрастные случаи с высокими и низкими величинами R^2 и, соответственно, разным разбросом точек относительно аппроксимирующей кривой (полином третьей степени).

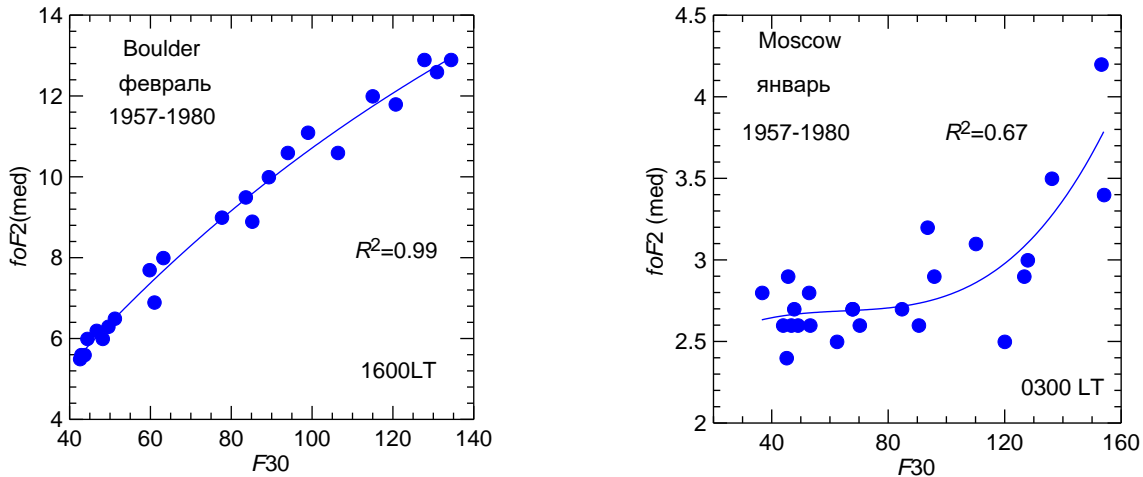


Рис. 1. Примеры зависимости $foF2$ от $F30$ с разными величинами R^2 .

Рисунок 1 представляет собой наглядную иллюстрацию того, что параметр R^2 характеризует качество зависимости $foF2$ от СА. Для формального подтверждения этого важного обстоятельства мы проделали следующее.

Обычно качество аппроксимации экспериментальных данных соответствующей кривой характеризуют величиной среднеквадратической ошибки σ . Очевидно, что желательно показать, что используемая нами величина R^2 связана с величиной σ . Сделать это не просто, поскольку разные величины R^2 приходится на разные моменты LT, а значит на разные величины $foF2$. А последнее приводит к разным ошибкам. Мы сравнили величины σ для ситуации ст. Akita, февраль, индексы $F30$ и Rz , для четырех моментов LT, для которых величины $foF2$, усредненные за все годы, близки (~4.0 МГц). Результаты приведены на рис. 2а. Хорошо видно, что величины σ действительно уменьшаются с ростом R^2 .

Кроме того, мы поступили следующим образом. Для конкретной ситуации (ст. Alma-Ata, февраль) мы выбрали моменты LT с разным соотношением величин R^2 для индексов $F30$ и Rz (разные отношения $R^2(F30)/R^2(Rz)$ и сравнили отношения величин ошибки σ ($\sigma(Rz)/\sigma(F30)$) для этих моментов. Результаты приведены на рис. 2б. Видно, что чем сильнее превышение R^2 для $F30$ над R^2 для Rz , тем ошибка для Rz больше, чем для $F30$ (растет отношение $\sigma(Rz) / \sigma(F30)$).

Таким образом, оба приведенных примера подтверждают основное положение, что величина R^2 действительно характеризует ошибку σ описания зависимости $foF2$ от СА данным индексом – σ увеличивается с уменьшением R^2 .

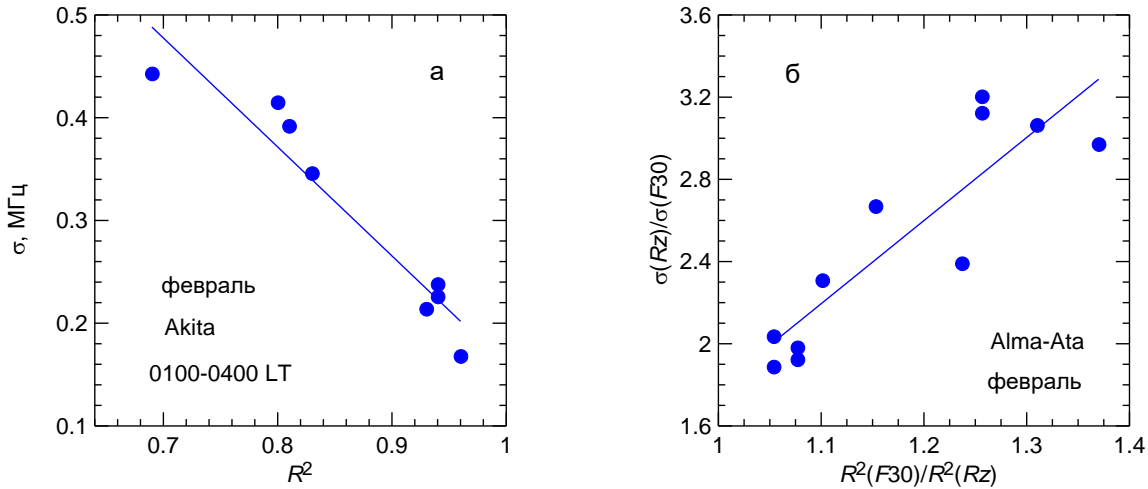


Рис. 2. Примеры изменения ошибки σ в зависимости от величин R^2 (см. текст).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

3.1 Станции евразийского региона

Мы рассмотрели четыре станции Евразийского региона (Slough, Moscow, Alma-Ata и Akita), которые перекрывают широкий диапазон долгот. Для этих станций получились результаты, аналогичные результатам для ст. Juliusruh, описанным Даниловым и Бербеновой [2023]. Для четырех индексов СА (кроме R_z) для обоих зимних месяцев получился хорошо выраженный суточный ход – высокие величины R^2 в дневное время и уменьшение этих величин к ночным часам.

Как и в предыдущей работе, в целях наглядности мы аппроксимировали суточное изменение R^2 полиномом третьей степени. Если дневное «плато» с мало меняющимися величинами R^2 было достаточно длинным по времени, мы аппроксимировали его прямой линией и также прямыми линиями аппроксимировали ветви падения и спада R^2 . Подчеркнем, что все аппроксимации на рисунках в данной статье не несут смысловой нагрузки, и направлены лишь на увеличение наглядности. Чтобы суточный ход был виден яснее, так же, как и в предыдущей работе, мы перенесли точки 0100 LT и 0200 LT на 2500 LT и 2600 LT и сдублировали точку 0300 LT на 2700 LT.

Типичные примеры суточных вариаций величины R^2 в январе и феврале по данным станции Slough при использовании индексов $MgII$, $Ly-\alpha$, $F30$ и $F10.7$ приведены на рис. 3.

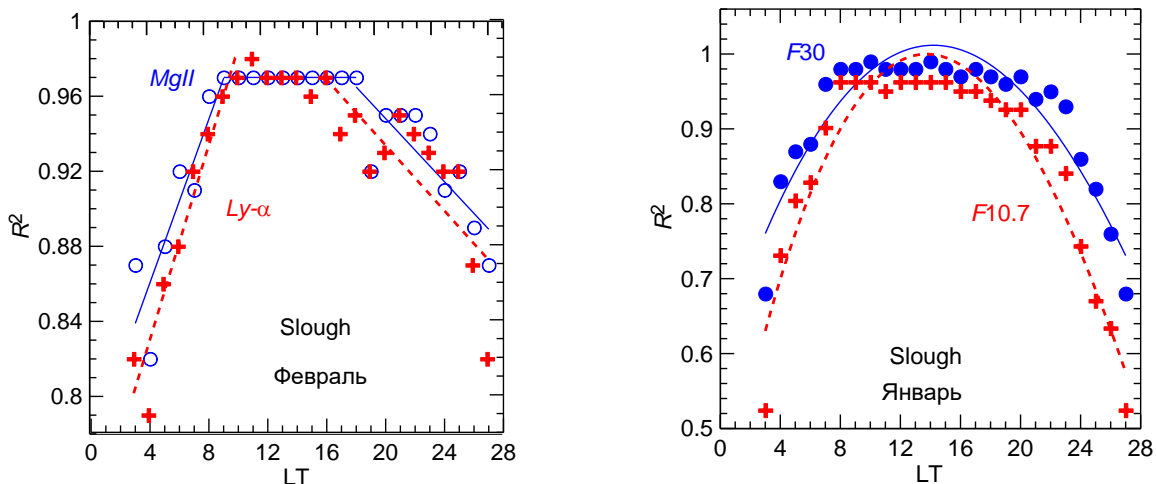


Рис. 3. Примеры суточных вариаций величины R^2 для ст. Slough

Близкие результаты получены и для ст. Moscow и Alma-Ata. Примеры приведены на рисунках 4 и 5. Как видно из этих рисунков, для указанных двух станций также наблюдается выраженный суточный ход R^2 с достаточно высокими (0.97–0.98) величинами в дневное время. Некоторое исключение представляет собой ситуация для $F30$ в феврале на ст. Alma-Ata – дневное плато там является особенно длинным, а падение к утренним, вечерним и ночным часам выражено хуже, чем для приведенных на том же рисунке данных по $Ly-\alpha$.

Результаты, аналогичные результатам для трех указанных евразийских станций, получены и для ст. Akita (суточный ход R^2 для этой станции см. ниже на рис. 7).

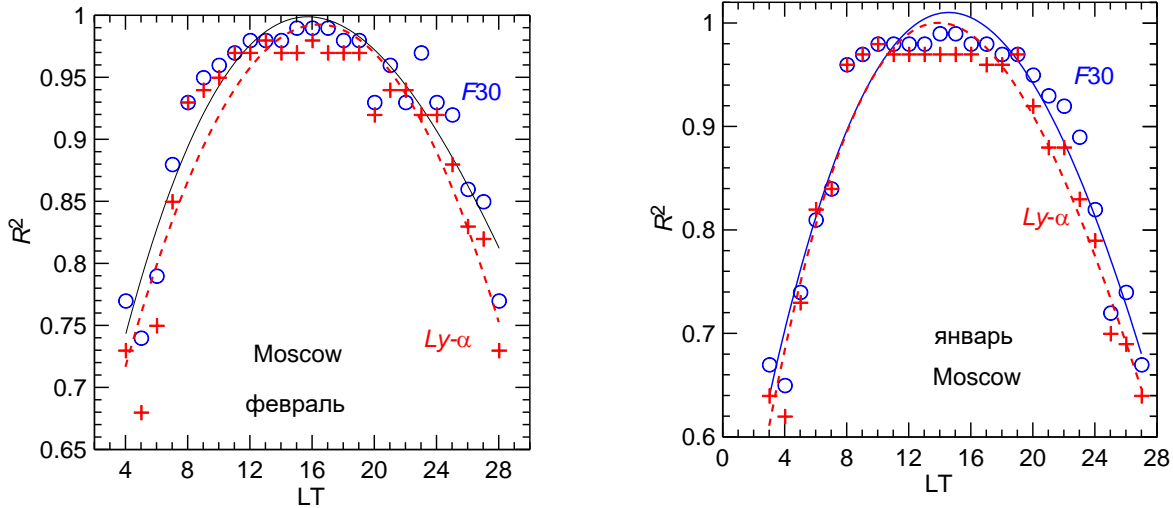


Рис. 4. Примеры суточных вариаций величины R^2 для ст. Moscow

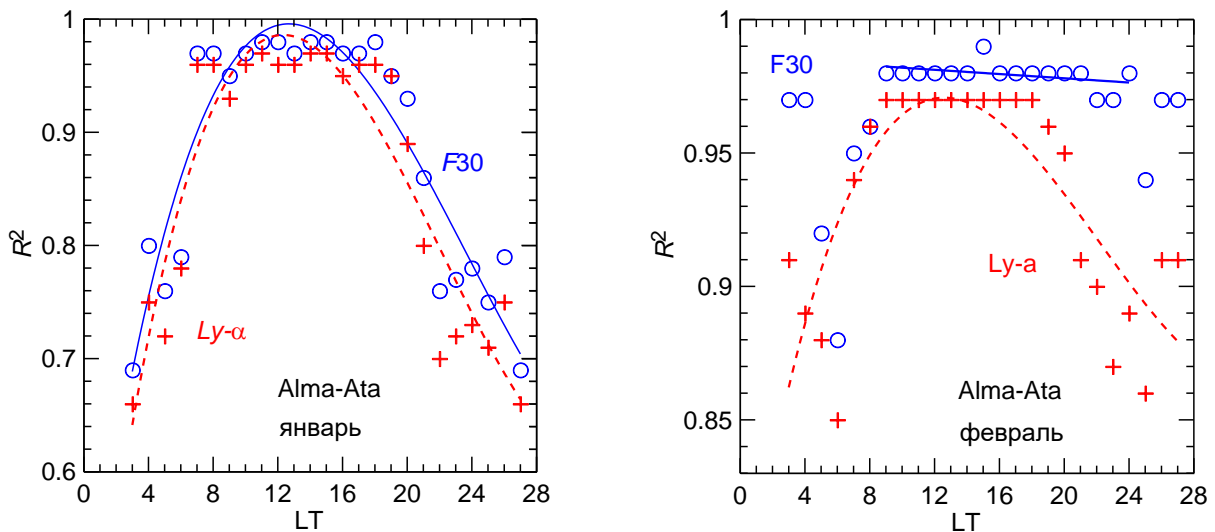


Рис. 5. Примеры суточных вариаций величины R^2 для ст. Alma-Ata

Основные выводы из анализа данных четырех евразийских станций состоят в следующем. Подтверждается наличие суточного хода величины R^2 с более высокими значениями в течение дневного периода и падением к ночи. Как правило, в дневные часы наблюдается своего рода «плато» - в течение 10–12 часов величина R^2 не меняется совсем, или меняется очень слабо (не более, чем на 0.01). Суточный ход R^2 для всех четырех индексов ($F30$, $MgII$, $Ly-\alpha$ и $F10.7$) примерно одинаков, однако сами величины R^2 систематически больше для индекса $F30$, чем для трех других индексов. Это подтверждает вывод, сделанный в предыдущей работе на основании данных ст. Juliusruh, о том, что индекс $F30$ является наилучшим для описания зависимости $foF2$ от CA.

Иная картина наблюдается для индекса R_z . Величины R^2 для R_z систематически ниже, чем для других индексов SA (чтобы не перегружать рисунки, мы будем далее всюду сравнивать величины R^2 для индекса R_z с соответствующими величинами для индекса $F30$). При этом суточный ход R^2 сильно искажается. Примеры суточного хода для двух указанных индексов приведены на рис. 6 и 7. Хорошо видно, что индекс R_z демонстрирует другой суточный ход чем $F30$ с гораздо более низкими величинами R^2 , особенно во второй половине дня и ночью.

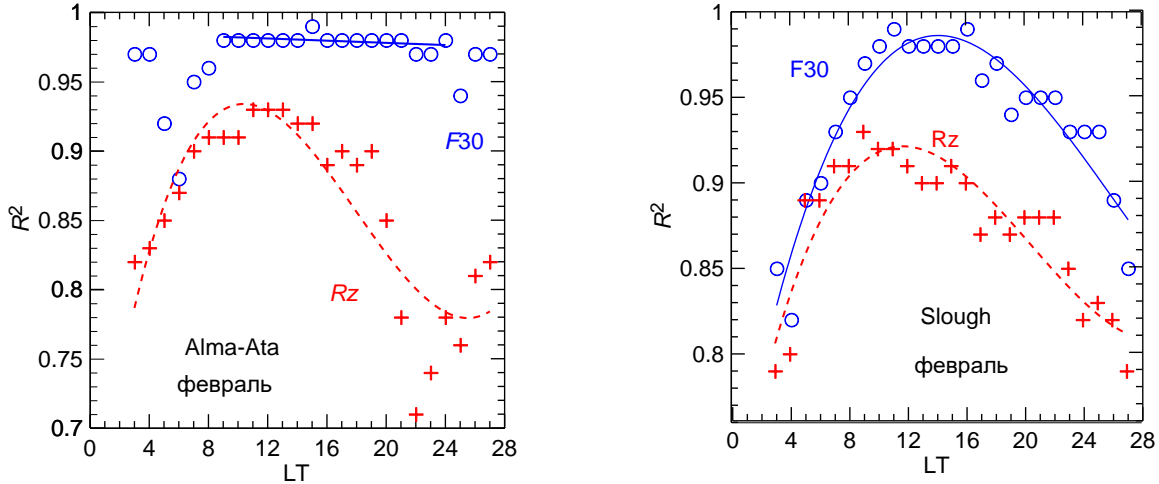


Рис. 6. Примеры суточного хода R^2 для индексов R_z и $F30$ (ст. Slough и Alma-Ata)

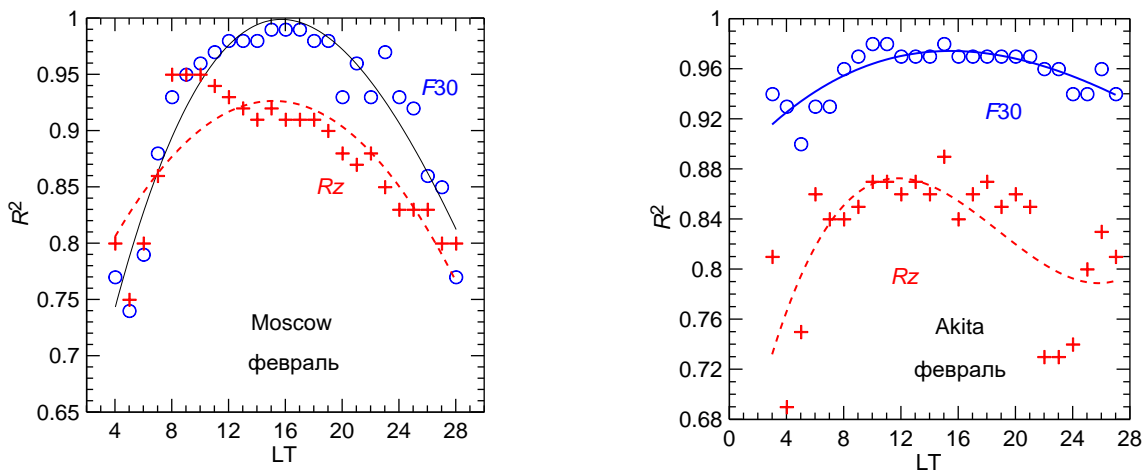


Рис. 7. Примеры суточного хода R^2 для индексов R_z и $F30$ (ст. Moscow и Akita)

Таблица 1. Величины $\Delta(F30-R_z)_c$ и $\Delta(F30-R_z)_n$ для разных ситуаций.

Станция	Juliusruh	Slough	Moscow	Alma-Ata	Akita
$\Delta(F30-R_z)_c$					
Январь	0.017	0.059	0.053	0.029	0.018
Февраль	0.033	0.064	0.047	0.108	0.132
$\Delta(F30-R_z)_n$					
Январь	0.036	0.087	0.074	0.044	0.020
Февраль	0.056	0.081	0.074	0.153	0.181

Поскольку невозможно показать все рисунки для разных станций, мы выполнили следующий анализ. Для каждой станции и каждого месяца мы вычислили среднее за сутки значение разности между величиной R^2 для $F30$ и R_z и обозначили его как $\Delta(F30-R_z)_c$. Это значение характеризует среднесуточный эффект превышения величин R^2 для $F30$ над соответствующими величинами для R_z в каждой ситуации (станция, месяц). Поскольку наиболее сильное различие этих величин наблюдается в

вечерне-ночной период, мы рассчитали ту же разность для этого периода и обозначили ее как $\Delta(F30-Rz)$. Результаты приведены в табл. 1.

Как видно из этой таблицы, среднесуточное превышение величины R^2 для индекса $F30$ над величиной для индекса Rz наблюдается для всех ситуаций. Особенно сильно этот эффект проявляется для ст. Alma-Ata и Akita. Величина $\Delta(F30-Rz)$ заметно возрастает, если рассматривается только вечерне-ночной период.

3.2 Станции североамериканского региона

В североамериканском регионе мы проанализировали две станции. Результаты анализа для ст. Boulder приведены на рис. 8. Как видно из этого рисунка, для этой станции характерна та же картина суточного изменения R^2 , что и для станций евразийского региона. Днем наблюдается «плато» с почти неизменными величинами R^2 в течение 12–14 часов, и происходит падение этих величин к ночи.

Также, как и для евразийских станций, для ст. Boulder наблюдается превышение величин R^2 для $F30$ над соответствующими величинами для Rz , причем это превышение лучше выражено для февраля, чем для января.

Соответствующая картина для ст. Ottawa (рис. 9) показывает, что суточный ход R^2 для этой станции также наблюдается. Он лучше выражен в январе. В феврале амплитуда суточного хода R^2 мала, но, тем не менее соответствующие величины в околополуденные часы выше, чем утром и ночью. В некоторые моменты LT днем величины R^2 достигают максимально возможной величины 0.99.

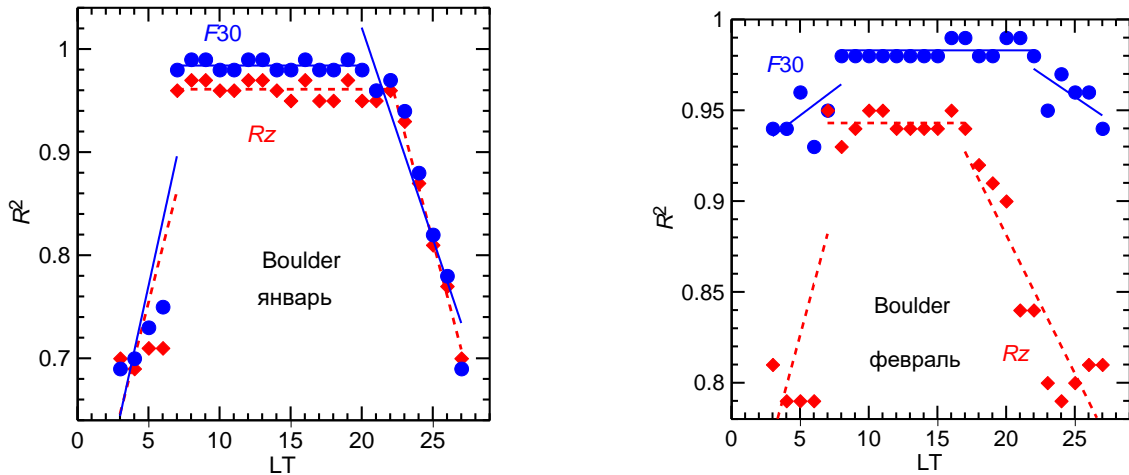


Рис. 8. Изменения величины R^2 с LT в январе и феврале на ст. Boulder

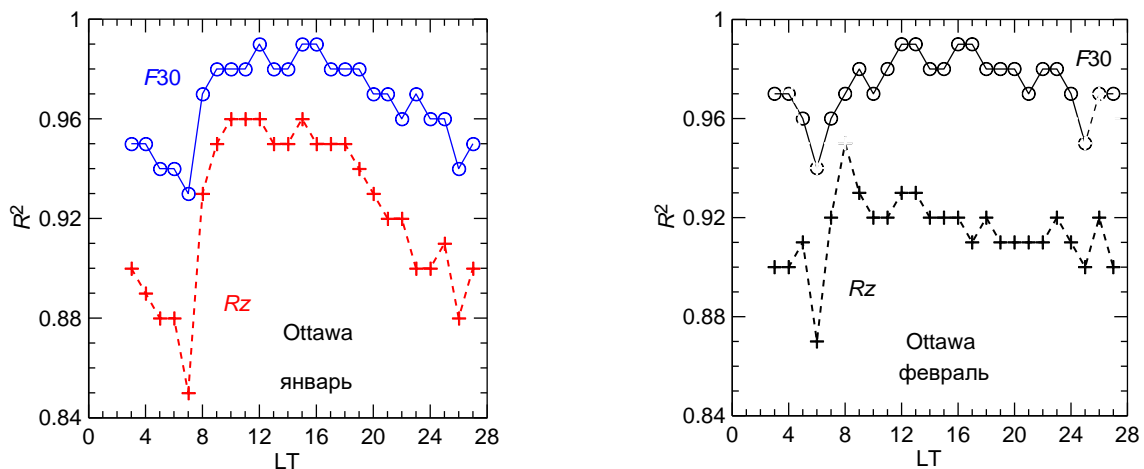


Рис. 9. Изменения величины R^2 с LT в январе и феврале на ст. Ottawa

Обращает на себя внимание тот факт, что превышение величин R^2 для $F30$ над соответствующими величинами для Rz в случае ст. Ottawa хорошо выражено как в феврале, так и в январе.

Таблица 2. Величины $\Delta(F30-Rz)_c$ и $\Delta(F30-Rz)_n$ для разных ситуаций.

Станция	Boulder	Ottawa	Boulder	Ottawa
	$\Delta(F30-Rz)_c$		$\Delta(F30-Rz)_n$	
Январь	0.018	0.044	0.018	0.057
Февраль	0.057	0.059	0.133	0.064

Таблица 2 аналогична табл. 1 и показывает среднее превышение величин R^2 при использовании индекса $F30$ над соответствующими величинами при использовании индекса Rz . Видно, что для обеих североамериканских станций подтверждаются выводы, полученные выше для евразийских станций. Указанное превышение наблюдается и существенно растет при переходе от среднесуточного значения к значению для ночного периода.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ

Одним из важных результатов предыдущей работы был вывод о том, что в летние месяцы (в качестве такового рассматривался июнь) отсутствует выраженный суточный ход величины R^2 – эта величина меняется с LT скачками без регулярного изменения.

Чтобы проверить вывод об отсутствии суточного хода R^2 летом, мы применили необычный подход. Вместо того, чтобы анализировать те же станции северного полушария в июне (как это было сделано в отношении данных ст. Juliusruh в предыдущей работе), мы анализировали станции южного полушария в те же месяцы (январь и февраль), что и станции северного полушария. Но для этих станций это – типично зимние месяцы. Преимущество такого подхода в том, что теперь при анализе станций южного полушария мы используем абсолютно те же величины индексов SA, что и при анализе станций северного, а, следовательно все отличия могут быть связаны только с разной зависимостью $foF2$ от SA летом и зимой.

Мы проанализировали в южном полушарии пять станций, покрывающие широкий диапазон долгот. В южноамериканском регионе это ст. Port Stanley и Concepcion, в Австралии – Hobart и Townsville и в Африке – Johannesburg.

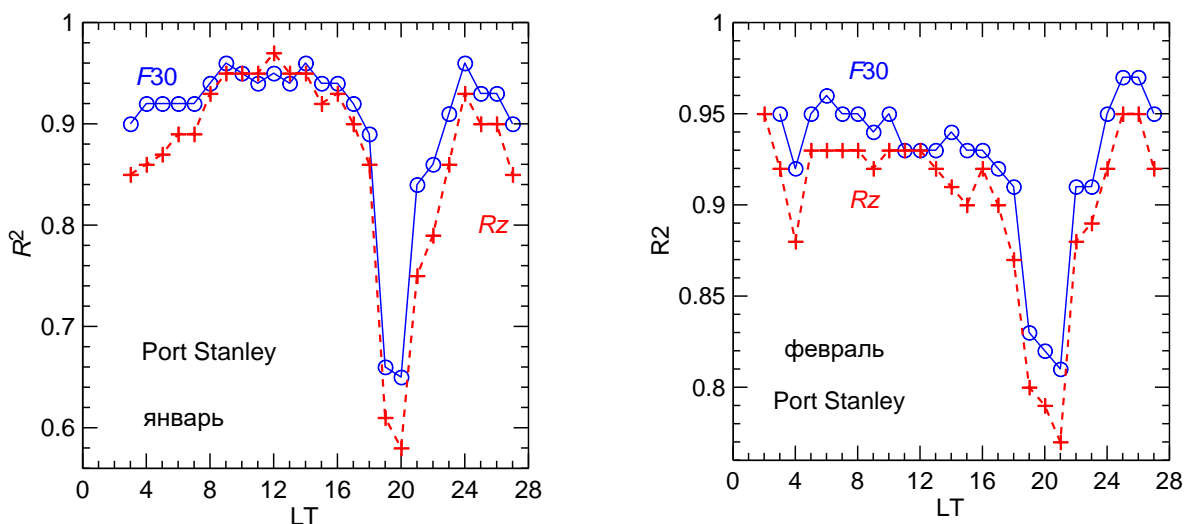
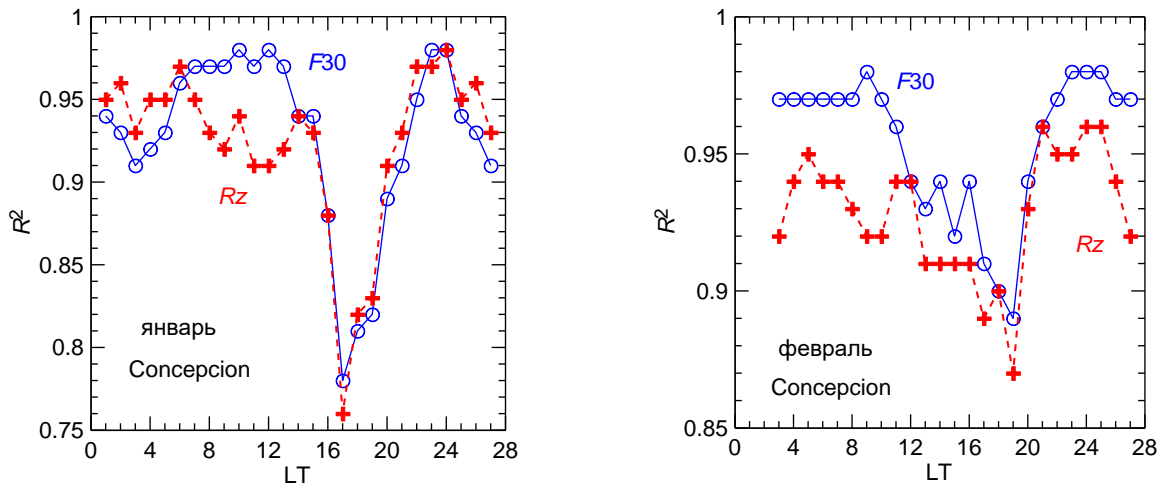
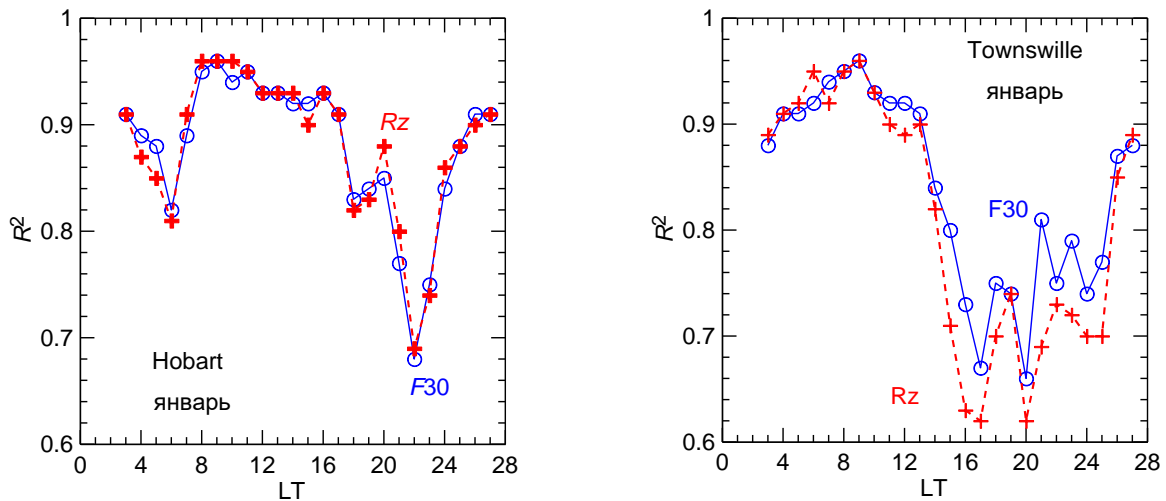


Рис. 10. Изменение величины R^2 с LT в январе и феврале для ст. Port Stanley

Рис. 11. Изменение величины R^2 с LT в январе и феврале для ст. ConcepcionРис. 12. Изменение величины R^2 с LT для австралийских станций

Суточные вариации величины R^2 для ст. Port Stanley и Concepcion приведены на рисунках 10 и 11, соответственно. Видно, что такой хорошо выраженный суточный ход с большими величинами R^2 днем и значительным их уменьшением ночью, как наблюдается для станций северного (зимнего) полушария, отсутствует. Наблюдаются периоды LT с малыми изменениями R^2 и «провалы» этой величины с минимумами в разные моменты LT для разных ситуаций. При этом после «провалов» наблюдается рост величин R^2 в те периоды (2000–2400 LT), когда зимой в эти месяцы происходит падение R^2 от высоких дневных к низким ночным значениям.

То же отсутствие выраженного суточного хода R^2 наблюдается и для австралийских станций. Мы приводим на рис. 12 соответствующие примеры.

Чтобы «перекрыть» весь интервал долгот станций, рассмотренных в северном полушарии, мы рассмотрели еще одну станцию в южном полушарии – Johannesburg, расположенный в той же долготной зоне, что и ст. Slough и Moscow. Результаты приведены на рис. 13.

Как видно из этого рисунка, для ст. Johannesburg в летние месяцы характерно то же отсутствие выраженного суточного хода величины R^2 , что и для четырех других станций южного полушария. Контраст с зимней ситуацией на этом рисунке виден особенно ярко – в полдень (когда в зимние месяцы величина R^2 максимальна) эта величина меньше, чем в ранние утренние и ночные часы.

Хотя зимняя ситуация подробно рассмотрена в параграфе 2, мы для контроля рассмотрели зависимость R^2 от LT на двух станциях южного полушария в зимний месяц июнь. Результаты приведены на рис. 14.

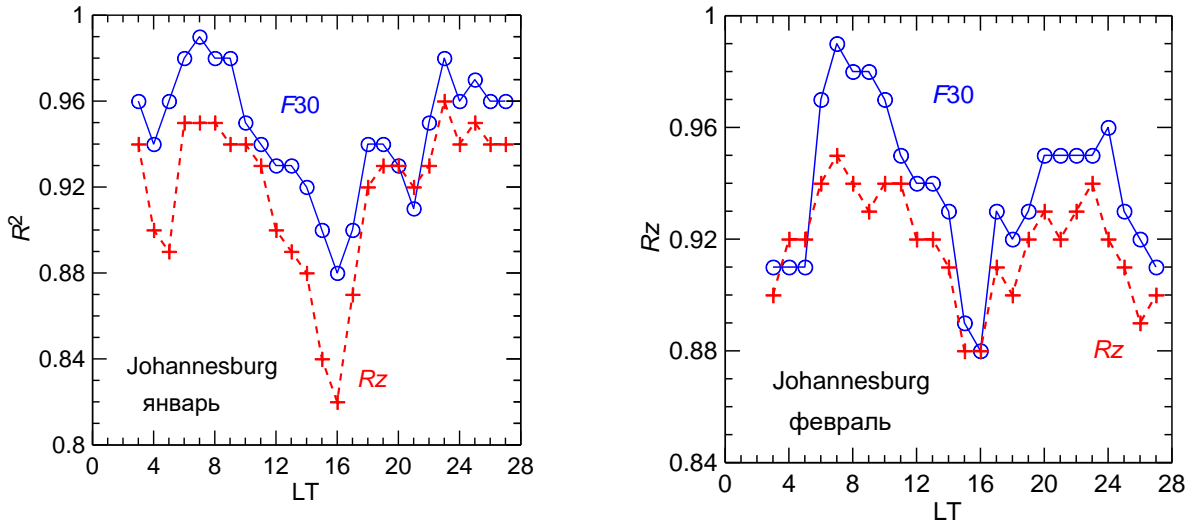


Рис. 13. Изменение величины R^2 с LT для ст. Johannesburg

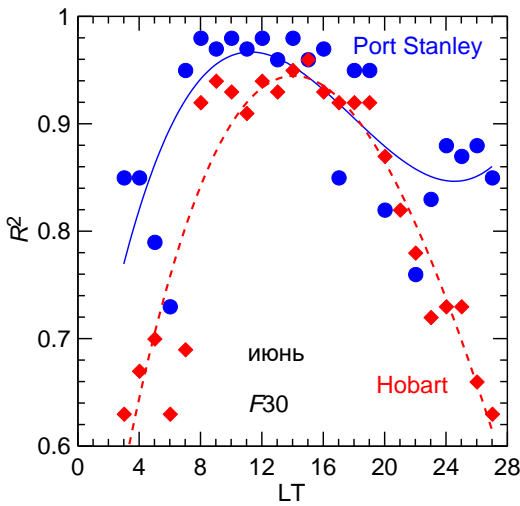


Рис. 14. Изменение величины R^2 с LT для ст. Port Stanley и Hobart в июне

Как видно из этого рисунка, в зимнем месяце июне для обеих станций наблюдается суточный ход R^2 подобный тому, что был получен в параграфе 2 для станций северного полушария в январе и феврале. В данных для обеих станций хорошо видно дневное «плато» с высокими и мало меняющимися величинами R^2 и падение этих величин к ночным часам.

Таким образом, анализируя данные станций южного полушария для тех же месяцев, что и северного, мы подтвердили наличие выраженной сезонной разницы суточных вариаций величины R^2 : зимой видны хорошо выраженные суточные вариации R^2 с высокими величинами в дневное время и падение этих величин к ночи, тогда как летом такие вариации отсутствуют и ход R^2 с LT хаотичен. Иначе говоря, в летние месяцы трудно сказать в какое время суток зависимость $foF2$ от CA лучше выражена.

Что касается описания поведения $foF2$ разными индексами, то для всех рассмотренных ситуаций в обоих полушариях и в оба сезона суточный ход R^2 для $F30$, $Ly-\alpha$, $MgII$, и $F10.7$ примерно одинаков, но величины R^2 для $F30$ систематически выше, чем для других индексов, что позволяет нам подтвердить наши предыдущие выводы о том, что индекс $F30$ является наилучшим для описания зависимости $foF2$ от CA. А вот число солнечных пятен явно плохо описывает поведение $foF2$. Суточный ход R^2 для Rz заметно нарушается, а сама величина в подавляющем большинстве случаев заметно меньше, чем для четырех других индексов. Соответствующая статистика приведена в таблицах 1–3. Они показывают, что эта разница особенно заметна в ночные часы.

Таблица 3. Величины $\Delta(F30-Rz)_c$ и $\Delta(F30-Rz)_n$ для разных ситуаций

Станция	Port St	Concepcion	Hobart	Townsville	Johannesburg
$\Delta(F30-Rz)_c$					
Январь	0.030	0.007	0	0.030	0.028
Февраль	0.023	0.025	0.006	0.020	0.020
$\Delta(F30-Rz)_n$					
Январь	0.050	—	0	0.054	0.030
Февраль	0.029	0.033	—	0.028	0.025

5. ОБСУЖДЕНИЕ

При поисках долговременных трендов $foF2$ проблеме правильного учета солнечной активности уделяется особенно большое внимание.

Lean et al. [2011] рекомендовали использовать $MgII$ вместо $F10.7$ для анализа ТЕС в период глубокого минимума СА 2008–2009 гг., а Perna and Pezzopane [2016] рекомендовали использовать $MgII$, а не $F10.7$, при поиске трендов $foF2$ по данным ст. Rome. Gulyaeva et al. [2018] рекомендовали $Mg II$ как наилучший индекс для построения эмпирических ионосферных моделей.

Отметим еще работы аргентинской группы [De Haro Barbás and Elias, 2020; De Haro Barbás et al., 2020; 2021; Zossi et al., 2023]. De Haro Barbás et al. [2023] пришли к выводу, что для описания поведения $foF2$ с помощью модели IRI наилучшим индексом является $Mg II$.

В серии публикаций [Laštovička, 2021a, b; 2022; 2023; Laštovička and Buresova, 2023; Sivakandan et al., 2022] подробно обсуждается вопрос о том, какие индексы СА дают наилучшие результаты при поиске трендов $foF2$ и foE . Наиболее часто лучшими признаются индексы $MgII$ и $F30$. В недавней работе Laštovička [2023] получено, что наиболее значимые отрицательные тренды $foF2$ выделяются при использовании для удаления эффектов СА именно индекс $F30$.

Все сказанное выше призвано показать, что вопрос о зависимости $foF2$ от СА очень важен для злободневной проблемы долговременных трендов критической частоты слоя $F2$, и его изучение на основании сегодняшних данных об основных индексах СА представляется актуальным. В частности, важно понять, как качество описания вариаций $foF2$ с уровнем солнечной активности зависит от выбора конкретного индекса СА и изменяется со временем суток и сезоном.

В предыдущей работе [Данилов и Бербенева, 2023] вопрос о лучшем индексе для описания зависимости $foF2$ от СА был рассмотрен на основании анализа данных ст. Juliusruh. В данной работе мы поставили целью подробно проанализировать качество описания изменения $foF2$ со временем теми же пятью индексами СА ($Ly-\alpha$, $MgII$, Rz , $F30$ и $F10.7mon$), анализируя данные станций, расположенных в различных регионах.

Основными результатами этого анализа следующие. Для станций северного полушария в зимние месяцы январь и февраль для четырех индексов СА получается хорошо выраженный суточный ход величины R^2 , которая рассматривается как мера качества описания зависимости $foF2$ от СА для данного индекса (см. выше параграф 2). Для станций южного полушария в те же месяцы получается картина, характерная для лета – выраженный суточный ход отсутствует и зависимость R^2 от LT носит хаотичный характер.

Подтвержден вывод предыдущей работы о том, что индекс $F30$ является лучшим для описания зависимости $foF2$ от СА, а индекс Rz – худшим.

Ряд полученных новых результатов вызывают интерес и требуют специального анализа с точки зрения физики ионосферных процессов. Почему описание зависимости $foF2$ от СА для всех индексов лучше днем, чем ночью? Наиболее простое объяснение состоит в том, что малые значения $foF2$ ночью просто менее надежно измеряются ионозондом, что и приводит к более сильному разбросу точек. Однако, не исключено, что причина сложнее. Возможно, в ночных условиях ослабляется зависимость $foF2$ от солнечного ультрафиолета (который и описывается индексами СА) за счет того, что на равновесную концентрацию электронов начинают действовать другие процессы, например потоки энергичных корпускул, или потоки плазмы из плазмосферы.

Почему один индекс СА (например, $F30$) в одной и той же ситуации (станция, месяц, LT) хуже описывает изменение $foF2$ с СА, чем другой индекс (например, Rz) даже в некоторые моменты LT, когда ионосфера освещена Солнцем и в ней должна «правильно» фото-ионизация?

Совершенно неясно, почему в летние месяцы отсутствует суточный ход R^2 , хорошо выраженный в зимние месяцы. Почеркнем, что в данной работе этот вывод получен с использованием двух подходов – одни и те же станции, но разные месяцы, и одни и те же месяцы (январь и февраль), но станции в разных полушариях.

Данная статья направлена на выявление указанных особенностей, их детальное объяснение в рамках физики ионосферы выходит за рамки этой статьи.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель данной работы – проанализировать качество описания поведения критической частоты слоя $F2$, $foF2$, различными индексами СА чтобы подтвердить выводы предыдущей работы авторов, основанные на анализе только данных ст. Juliusru. В данной работе анализировались измерения $foF2$ на шести станциях северного полушария и пяти станциях южного.

Все три основных вывода Данилова и Бербенева [2023] получили хорошо обоснованное подтверждение. В зимние месяцы зависимость $foF2$ от СА гораздо лучше описывается в дневной период, чем в ночной. Индекс $F30$ является наилучшим из четырех индексов СА, в целом хорошо описывающих эту зависимость. Индекс Rz описывает эту зависимость много хуже, как в летние, так и в зимние месяцы. Хорошо выраженная зависимость R^2 от местного времени наблюдается для четырех основных индексов в зимние месяцы, но отсутствует в летние.

Отмечен еще ряд особенностей поведения R^2 в течение суток и года, которые могут представлять интерес для анализа в рамках физики ионосферных процессов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Величины солнечных индексов взяты с сайта LISIRD (<https://lasp.colorado.edu>). Медианы $foF2$ взяты из банка Дамбольдта на сайте <https://downloads.sws.bom.gov.au/wdc/iondata/medians/>

ЛИТЕРАТУРА

- Данилов А. Д., Бербенева Н. А. Статистический анализ зависимости критической частоты $foF2$ от различных индексов солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 5. С. 610–629. 2023. DOI: 10.31857/S0016794023600588
- 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. DOI: 10.31857/S0016794020040045
- De Haro Barbás B. F., Elias A. G. Effect of the inclusion of solar cycle 24 in the calculation of $foF2$ long-term trend for two Japanese ionospheric stations // Pure Appl. Geophys. V. 177. P. 1071–1078. 2020.
- De Haro Barbás D. F., Elias A. G., Fagre M., Zossi B. F. Incidence of solar cycle 24 in nighttime $foF2$ long-term trends for two Japanese ionospheric stations // Stud. Geophys. Geod. V. 64. P. 407–418. 2020. doi: 10.1007/s11200-021-05489
- De Haro Barbás D. F., Elias A. G., Venchiarutti J. V., Fagre M.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.
- de Haro Barbás B.F., Zossi B.S., Jun G.T. et al. Performance of the IRI-2016 and IRI-Plas 2020 considering Mg II as EUV solar proxy // Adv. Space Res. V. 72. No. 6. P. 2406–2417. 2023. DOI 10.1016/j.asr.2023.06.007
- 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. What is the optimum solar proxy for long-term ionospheric investigations? // Adv. Space Res. V. 67. N 1. P. 2–8. 2021a. doi: 10.1016/j.asr.2020.07.025
- Laštovička J. The best solar activity proxy for long-term ionospheric investigations // Adv. Space Res. V. 68. P. 2354–2360. 2021b. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.06.032>.
- Laštovička J. Long-term changes in ionospheric climate in terms of $foF2$ // Atmosphere. 13(1). 110. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13010110>
- Laštovička J. Dependence of long-term trends in $foF2$ at middle latitudes on different solar activity proxies // Adv. Space Res. 2023. DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.047
- Laštovička J., Burešová D. Relationships between $foF2$ and various solar activity proxies // Space Weather. V. 21. e2022SW003359. 2023. <https://doi.org/10.1029/2022SW003359>
- Lean J., Emmert J.T., Picone J.M., Meier P.R. Global and regional trends in ionospheric electron content // J. Geophys. Res. –Space .V. 116. A00H04. 2011. doi:10.1029/2010JA016378

- *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>
- *Sivakandan M., Mielich J., Renkwitz T., Chau J. L., Jaen J., Laštovička J.* Long-term variations and trends in the E, F and sporadic E (Es) layer over Juliusruh, Europe // *J. Geophys. Res.– Space.* V.128. e2022JA031097. 2022. <https://doi.org/10.1029/2022JA031097>
- *Zossi B. S., Medina F. D., Jun G. T. et al.* Extending the analysis on the best solar activity proxy for long-term ionospheric investigations // *Proc. Royal Society A* 479(2276). 2023. DOI: 10.1098/rspa.2023.0225.

FURTHER DETAILED ANALYSIS OF THE *foF2* DEPENDENCE ON SOLAR ACTIVITY

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

The analysis of the *F2*-layer critical frequency dependence on various solar activity proxies started in a series of previous publications of the authors for the Juliusruh station data is continued. In this paper, the data of six station in the Northern Hemisphere and of five stations in the Southern hemispheres are analyzed. The determination coefficient R^2 of the forementioned dependence in each particular situation (station, month, local time) is taken as a measure of the quality of the description of the *foF2* dependence on SA. The conclusion is confirmed that for four SA proxies in winter month, a well pronounced diurnal variation of the R^2 value is observed: that value is maximal in the daytime hours and decreasing substantially to nighttime hours. It is found that the *F30* index is the best proxy to describe the *foF2* behavior in the solar cycle, whereas the sunspot number *Rz* is the worst. Based on the comparison of the R^2 changes with LT in the same months at the stations of the Northern and Southern Hemispheres, it is shown that the aforementioned well pronounced diurnal behavior is observed only in winter and is absent in summer.

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