

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ f_oF2 ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИНДЕКСОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2023 г. А. Д. Данилов^{1, *}, Н. А. Бербенева²

¹Институт прикладной геофизики

им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПП), Москва, Россия

²Физический факультет Московского государственного университета

им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 25.03.2023 г.

После доработки 25.04.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Для детального анализа того, как различные индексы солнечной активности описывают зависимость критической частоты ионосферного слоя $F2$, f_oF2 , от этой активности, рассматриваются результаты вертикального ионосферного зондирования на ст. Juliusruh в два зимних месяца (январь и февраль), два равноденственных месяца (март и октябрь) и летний месяц июнь. Используются пять индексов солнечной активности: $Ly-\alpha$, $MgII$, Rz , $F30$ и $F10.7$. Изменения f_oF2 сравниваются с соответствующими изменениями в 1957–1980 гг. В качестве меры качества описания зависимости f_oF2 от солнечной активности каждым из индексов используется коэффициент определенности R^2 согласно F-тесту Фишера. Получено, что в зимние месяцы наблюдается хорошо выраженный суточный ход величины R^2 — эта величина в околополуденные часы выше, чем в ночные. Иначе говоря, днем все индексы лучше описывают поведение f_oF2 , чем ночью. Хорошо выраженный суточный ход R^2 наблюдается и в равноденственные месяцы для четырех индексов, тогда как для индекса Rz этот ход выражен гораздо хуже, и наблюдается сильный разброс значений R^2 . В июне суточный ход величины R^2 отсутствует вовсе, и наблюдаются скачки этой величины от часа к часу. На основании проведенного анализа наиболее надежными для описания зависимости f_oF2 от солнечной активности для всех часов суток представляются индексы $MgII$, $F30$ и $Ly-\alpha$.

DOI: 10.31857/S0016794023600588, EDN: XYMAUR

1. ВВЕДЕНИЕ

Критическая частота ионосферного слоя $F2$, f_oF2 , является очень важным параметром, знание которого необходимо для решения многих проблем ионосферного распространения радиоволн. Очевидно, что очень важно знать зависимость f_oF2 от различных внешних параметров. В первую очередь это относится к зависимости от солнечной активности (СА), поскольку избавление от эффектов СА является первым шагом при анализе зависимости критической частоты от сезона и метеорологической обстановки (так называемое “coupling from below”), а также при поиске долгосрочных изменений (трендов) f_oF2 .

В последнее десятилетие изучению трендов параметров термосферы и ионосферы уделяется большое внимание. Чтобы не перегружать статью обсуждением этой проблемы и подробной библиографией, мы ограничимся ссылками на несколько обзоров [Laštovička, 2023; Zhang et al., 2023; Данилов и Константинова, 2020a].

При поисках трендов f_oF2 проблеме правильного учета солнечной активности уделяется особенно большое внимание. В течение первого десятилетия изучения ионосферных трендов в качестве индекса СА (solar proxy) использовался индекс $F10.7$ (поток солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см). Однако в дальнейшем возникли сомнения в том, что $F10.7$ является лучшим индексом для описания поведения f_oF2 и других ионосферных параметров.

В частности, было обнаружено, что связь между $F10.7$ и индексами солнечной активности $Ly-\alpha$ (интенсивность линии Лайман-альфа в солнечном спектре) и $MgII$ (отношение интенсивностей излучения в центре и крыльях ультрафиолетовой линии магния), прямо связанными с интенсивностью коротковолнового излучения Солнца (EUV), нарушается по крайней мере в 24-м цикле СА. Данилов и Константинова [2020b] проанализировали связь между $Ly-\alpha$ и $F10.7$ в более ранний период и в 24-м цикле СА. Совершенно аналогичное срав-

нение между индексами $Mg II$ и $F10.7$ было выполнено Laštovička [2019]. Обе группы авторов пришли к одному и тому же заключению: связь между индексом $F10.7$ и солнечным EUV нарушается в 24-м цикле.

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.

В серии недавних публикаций [Laštovička, 2021a, b; 2022; 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 . Анализировались данные вертикального зондирования (ВЗ) на сети европейских станций. Было получено [Laštovička, 2021a], что для поиска трендов $foF2$ наилучшим индексом является $MgII$, а затем следуют $Ly-\alpha$ и $F10.7$. В более поздней работе [Laštovička, 2021b] для описания поведения $foF2$ рекомендуются индексы $MgII$ и $F30$ (интенсивность солнечного радиоизлучения на волне 30 см), причем подчеркивается, что именно они должны использоваться для анализа периодов глубоких солнечных минимумов 2008–2009 и 2018–2019 гг. Этот вывод подтвержден и в недавней публикации [Laštovička and Buresova, 2023].

Отметим еще две работы аргентинской группы [De Haro Barbás and Elias, 2020; De Haro Barbás et al., 2020] и недавние публикации Laštovička [2022, 2023]. В двух последних работах рассматривалось использование нескольких индексов СА для выделения трендов критических частот слоев E и $F2$ и было получено, что наилучшими являются индексы $F10.7$ и $MgII$.

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 изменятся со временем суток и сезоном.

В данной работе мы поставили целью подробно проанализировать качество описания изменения $foF2$ со временем пятью индексами СА ($Ly-\alpha$, $MgII$, Rz , $F30$ и $F10.7mon$) для всех часов местного времени. Поскольку в банках данных нет данных о $MgII$ за 1958–1980 гг., мы рассчитали величины этого индекса на основании индекса $F10.7sm12$ для 1958–1980 гг. и связь между этими индексами, найденную для 22 и 23-го циклов СА (подробнее см. [Данилов и Константинова, 20206]). Анализ качества такого описания для всех месяцев года

требует специального рассмотрения. Здесь детальное рассмотрение суточных вариаций проводится для января и февраля. Именно в эти зимние месяцы (см. Danilov [2015]) наблюдаются наиболее хорошо выраженные долговременные тренды $foF2$. Для сравнения приводятся также данные для равноденствия и лета.

2. МЕТОД АНАЛИЗА

То, что критическая частота $foF2$ зависит от СА (растет с ростом СА) известно уже с 50-х годов прошлого столетия. Регулярные и достаточно надежные измерения параметров слоя $F2$ методом ВЗ ведутся в основном с периода Международного Геофизического Года (1957–1958 гг.). В большинстве работ рассматривался весь период имеющихся наблюдений на данной станции и анализировалась зависимость $foF2$ от индексов $F10.7$ и Rz (число солнечных пятен). Индекс $F10.7$ использовался в трех версиях: среднегодовое значение, среднемесячное значение и сглаженное значение $F10.7sm12$, вычисленное на основании среднемесячных величин (см. Bilitza [1990]).

В описываемом здесь анализе мы добавили к двум указанным индексам индексы $Ly-\alpha$, и $F30$.

Наиболее деликатным является вопрос о выборе периода, для которого следует проводить анализ зависимости $foF2$ от СА. Как уже указывалось выше, в большинстве работ анализировался весь доступный период наблюдений. Это относится и к работам по поиску трендов.

Нам представляется, что такой подход не вполне корректен. Если заметные тренды критической частоты существуют хотя бы в некоторые сезоны и определенные периоды суток, эти тренды неизбежно будут влиять на наблюдаемые величины $foF2$, а потому сравнение этих величин с индексом СА будет неизбежно давать неправильное представление о параметрах связи $foF2$ с рассматриваемым индексом, а, следовательно, приводить к неточности в устранении эффекта СА и, соответственно, к неверным результатам.

Единственный способ избежать подобной ситуации — это анализировать зависимость $foF2$ от СА для периода, когда можно надеяться, что значительных трендов еще не было. Поскольку тренды имеют в основном антропогенную природу, они, скорее всего появились в начале 80-х годов (подробнее см. Данилов [2012]). Именно поэтому в наших публикациях (см., например, Данилов и Константинова [20206]; Danilov and Konstantinova [2020]) период 1957–1980 гг. рассматривается как “эталонный”, с которым для поиска трендов сравниваются более поздние периоды.

Именно указанный период 1957–1980 гг. был выбран в настоящей работе для детального анализа зависимости $foF2$ от различных индексов СА.

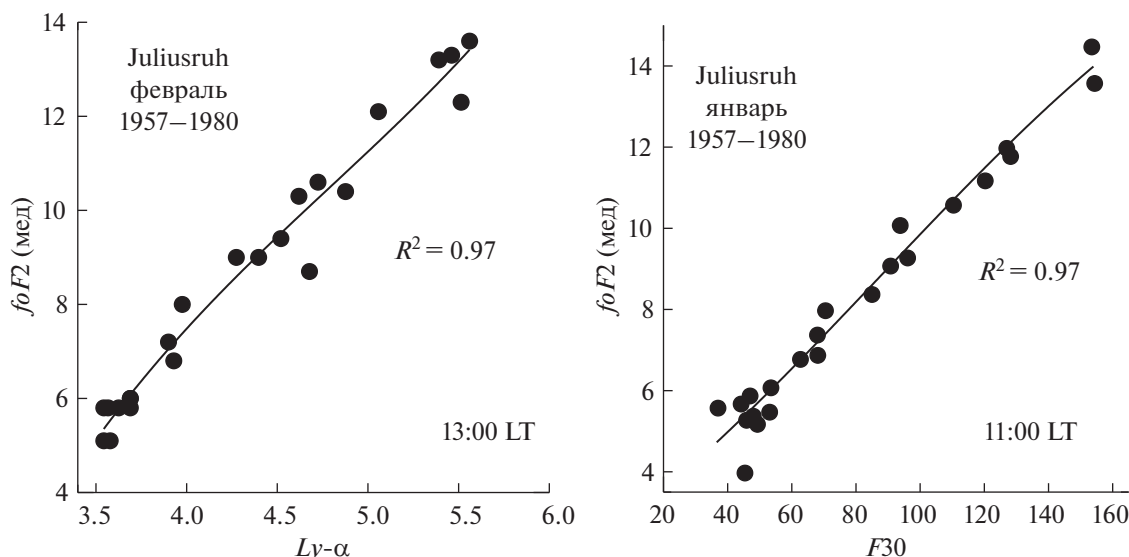


Рис. 1. Примеры хорошо выраженных зависимостей $foF2$ (в МГц) от индексов СА.

Для этого анализа мы рассматривали месячные медианы критической частоты по наблюдениям на ст. Juliusruh, данные которой по нашему опыту представляются наиболее надежными.

Для каждого из пяти анализируемых месяцев (январь, февраль, март, октябрь и июнь) мы строили для каждого часа местного времени зависимость $foF2$ от выбранного индекса СА. Эта зависимость аппроксимировалась полиномом третьей степени. Такой характер аппроксимации был выбран на основании большого опыта, накопленного в наших предыдущих работах по поиску трендов. Как меру качества описания экспериментальных величин $foF2$ указанной аппроксимацией мы рассматривали коэффициент определенности R^2 согласно F-тесту Фишера. Этот параметр легко определяется при построении соответствующего графика и является достаточно наглядным.

Рассмотрим теперь различные типы получаемых зависимостей $foF2$ от индексов СА. Следует подчеркнуть, что точки на рисунках представляют собой чисто экспериментальные данные — месячные медианы критической частоты $foF2$. Не проводилось никакого усреднения, сглаживания или иных искусственных операций.

На рис. 1 приведены примеры наиболее хорошо выраженных зависимостей, которые выглядят почти линейными. Величина R^2 для них лежит в пределах 0.96–0.98. Такие зависимости характерны для всех индексов для дневных часов LT.

На рис. 2 приведены примеры зависимостей, у которых заметна выраженная кривизна. Такие зависимости встречаются в ночные, утренние и вечерние часы. Величина R^2 для них ниже и колеблется в пределах 0.83–0.90.

Примеры, приведенные на рис. 3, иллюстрируют наличие в некоторых случаях (не слишком часто) зависимости с выраженным эффектом “насыщения” — при самой большой активности наблюдается падение $foF2$ с ростом индекса СА. При этом такой эффект может наблюдаться как при значительном разбросе экспериментальных точек ($R^2 < 0.80$, левая панель), так и при малом разбросе (высокие величины R^2 , правая панель).

Наконец, на рис. 4 приведены примеры зависимостей с относительно низкими величинами R^2 . Такие зависимости наблюдаются для некоторых индексов СА глубокой ночью. Согласно F-тесту Фишера, статистическая значимость S таких зависимостей колеблется в пределах 95–98%, тогда как для остальных случаев величина S превышает 99%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Январь–Февраль

Наиболее детальный анализ мы провели для января и февраля, поскольку именно в эти зимние месяцы наблюдаются самые сильные отрицательные тренды $foF2$, а правильный учет зависимости критической частоты от солнечной активности очень важен для всей проблемы трендов.

Мы построили зависимость величин R^2 , которые мы рассматриваем как меру качества описания зависимости $foF2$ от данного индекса солнечной активности на графиках типа рис. 1–4, от местного времени. Результаты для января и февраля приведены на рис. 5. Каждая точка на рис. 5 соответствует величине R^2 , полученной для данного момента LT и данного месяца на соответствующем рисунке типа рис. 1–4. Кривые на

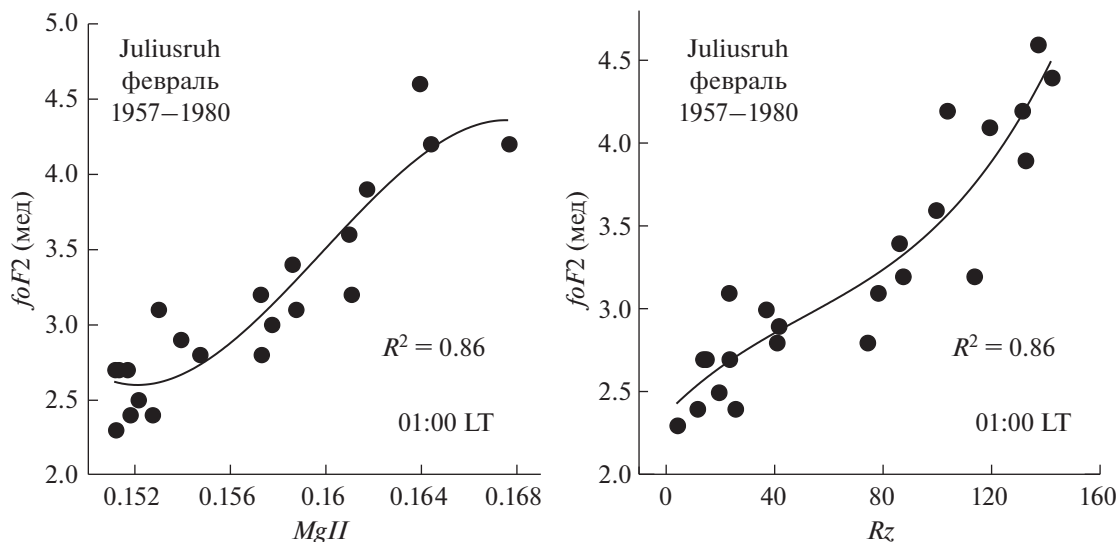


Рис. 2. Примеры зависимостей $foF2$ (в МГц) от индексов СА с выраженной кривизной.

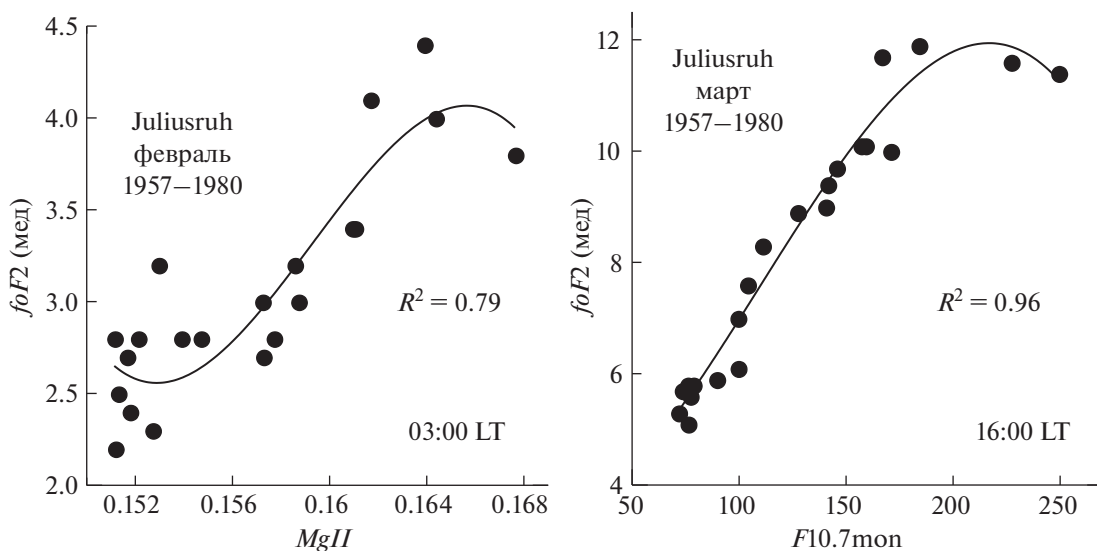


Рис. 3. Примеры зависимостей $foF2$ (в МГц) от индексов СА с эффектом “насыщения”.

рис. 5 представляют собой аппроксимацию точек полиномом третьей степени. Как и в случае рис. 1–4, мы используем для характеристики значимости зависимости коэффициент определенности по F-тесту Фишера. Для отличия от R^2 (на рисунках зависимости $foF2$ от индекса СА), который является нашим основным анализируемым параметром, мы обозначаем коэффициент определенности для зависимостей R^2 от LT как R_{LT}^2 . Для более наглядного представления суточного хода мы сместили точки для 01:00 и 02:00 на 25:00 и 26:00 LT и продублировали точку для 03:00 LT на 27:00 LT.

Наиболее характерной особенностью поведения величины R^2 на рис. 5 является суточная вариация. Эта величина в дневные часы (10:00–16:00 LT) максимальна и лежит в пределах 0.95–0.98. Как правило, в дневные часы она не меняется совсем в течение нескольких часов или меняется очень слабо (на 0.01–0.02). В ночные часы величины R^2 для всех рассмотренных ситуаций значительно меньше, чем в дневные часы. Минимальные значения R^2 приходятся на 02:00–03:00 LT.

Чтобы избежать громоздких таблиц с данными для всех LT, мы приводим в табл. 1 величины R^2 для ночного минимума (02:00–03:00 LT) и трех

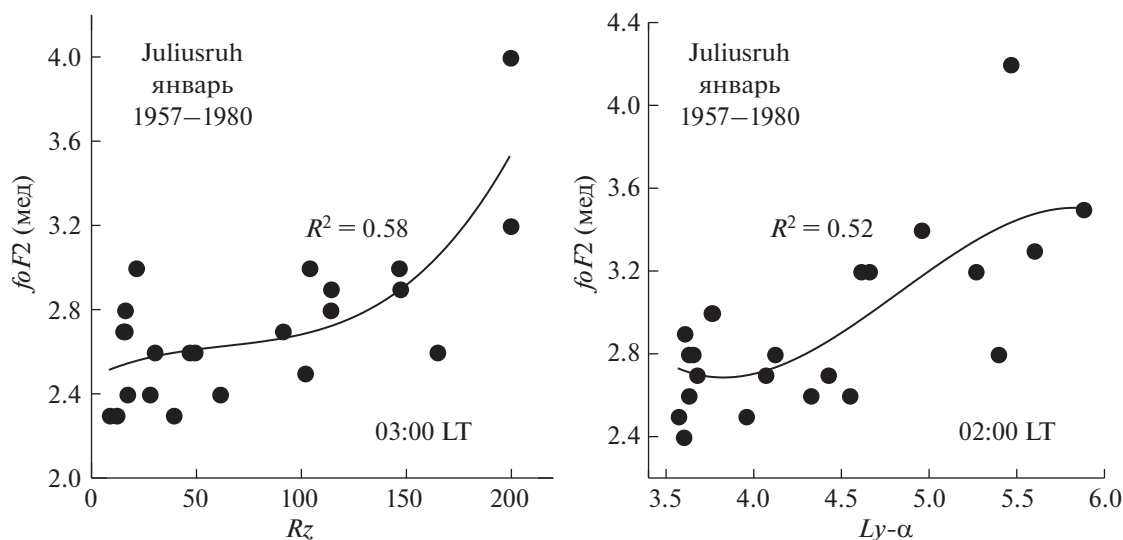


Рис. 4. Примеры зависимостей $foF2$ (в МГц) от СА с низкими величинами R^2 .

околополуденных часов (11:00–13:00 LT) для обоих рассмотренных месяцев и всех пяти анализируемых индексов. Как видно из этой таблицы, дневные величины R^2 в январе для всех трех LT близки между собой. Для четырех индексов дневные январские и февральские значения также близки друг другу. Исключение составляет индекс Rz , для которого дневные величины R^2 в феврале составляют всего 0.93–0.94. Это является первым признаком того, что индекс Rz описывает поведение $foF2$ хуже, чем другие рассмотренные индексы.

Как хорошо видно на рис. 5, падение величин R^2 от дневных значений к ночным происходит в январе значительно сильнее, чем в феврале. При этом, соответственно, в январе ночные величины R^2 существенно ниже, чем в феврале. Так, согласно табл. 1 средняя за 02:00–03:00 LT величина R^2 в январе для $Ly-\alpha$, $MgII$, Rz , $F30$ и $F10.7$ равна 0.59, 0.71, 0.59, 0.64 и 0.57, тогда как для февраля эта величина равна 0.80, 0.83, 0.86, 0.83 и 0.83 соответственно.

Таким образом, первый вывод нашего анализа гласит, что все рассмотренные индексы СА значительно лучше описывают зависимость критической частоты $foF2$ от солнечной активности в дневные часы, чем в ночные.

Для совместного описания поведения $foF2$ всех пяти рассматриваемых индексов СА мы построили рис. 6. Чтобы избежать взаимного наложения большого числа точек, мы нанесли на этом рисунке только аппроксимирующие линии, приведенные на рис. 5.

Как следует из рис. 6, аппроксимирующие кривые для индексов $MgII$, $F30$ и $F10.7$ идут очень близко друг к другу и даже частично совпадают

как в январе, так и в феврале. Относительно небольшое превышение относительно четырех других индексов наблюдаются для индекса $MgII$ в январе в вечерний и ночной периоды (примерно с 19:00 до 06:00 LT).

Поскольку поведение R^2 с LT для индекса Rz в феврале сильно отличается от поведения для других индексов, мы вынесли соответствующее сравнение на отдельный рисунок. На рис. 7 сравниваются величины R^2 для Rz (точки и штриховая линия) и усредненный по трем индексам ($Ly-\alpha$, $MgII$, и $F30$) ход R^2 (сплошная линия). Качество аппроксимации зависимости R^2 от LT (см. соответствующие величины R_{LT}^2) для Rz существенно хуже, чем для других индексов.

Причина указанных отклонений нам не ясна. Поскольку при анализе зависимостей критической частоты от индекса СА для конкретного ме-

Таблица 1. Величины R^2 для ночных и дневных часов

LT	$Ly-\alpha$	$MgII$	Rz	$F30$	$F10.7$
Январь					
02:00	0.62	0.72	0.61	0.67	0.61
03:00	0.57	0.7	0.58	0.61	0.54
11:00	0.96	0.97	0.96	0.98	0.97
12:00	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98
13:00	0.97	0.98	0.97	0.98	0.97
Февраль					
02:00	0.82	0.87	0.86	0.84	0.84
03:00	0.78	0.79	0.86	0.81	0.81
11:00	0.96	0.96	0.94	0.97	0.97
12:00	0.97	0.97	0.93	0.98	0.97
13:00	0.97	0.96	0.93	0.98	0.98

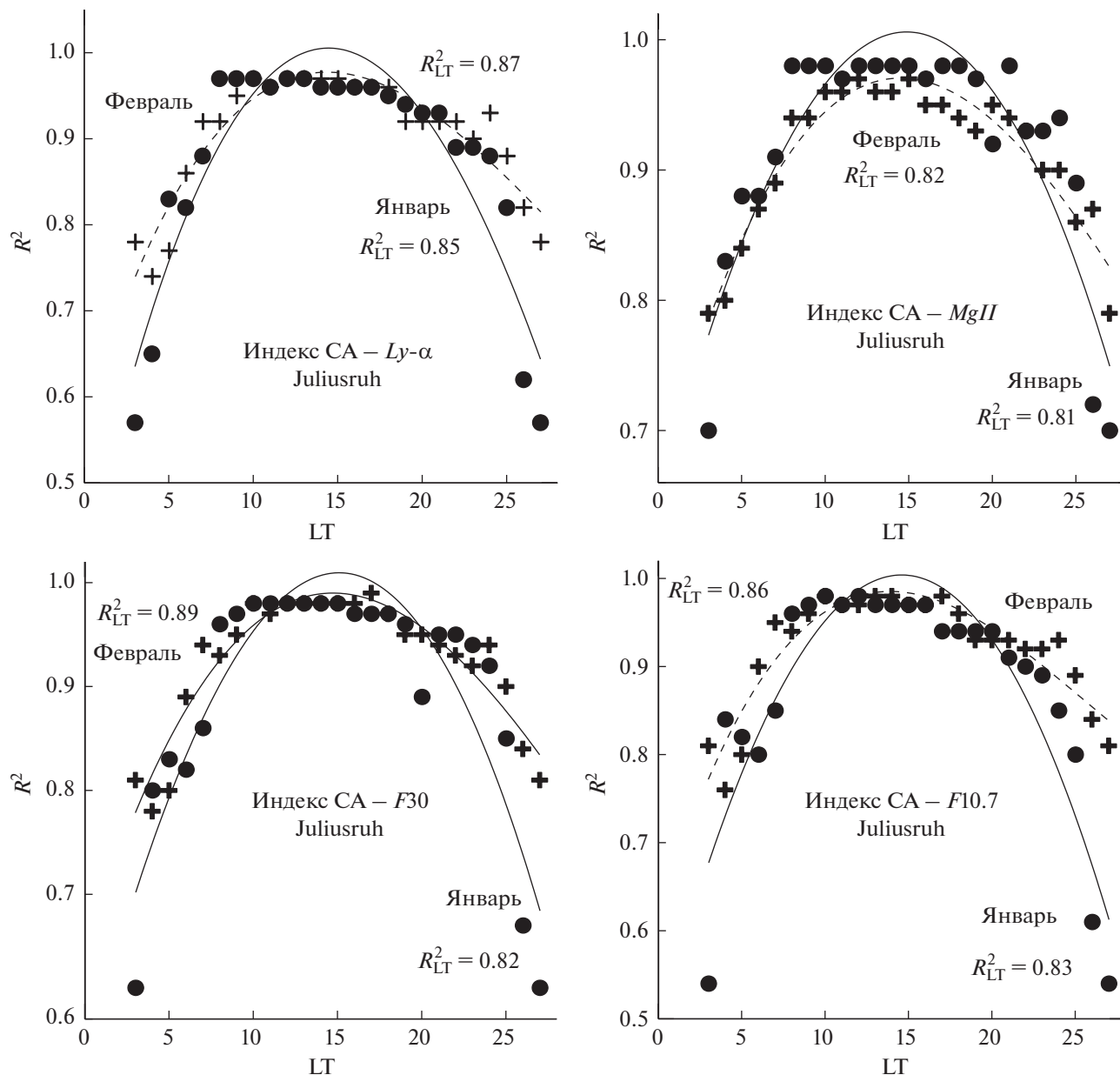


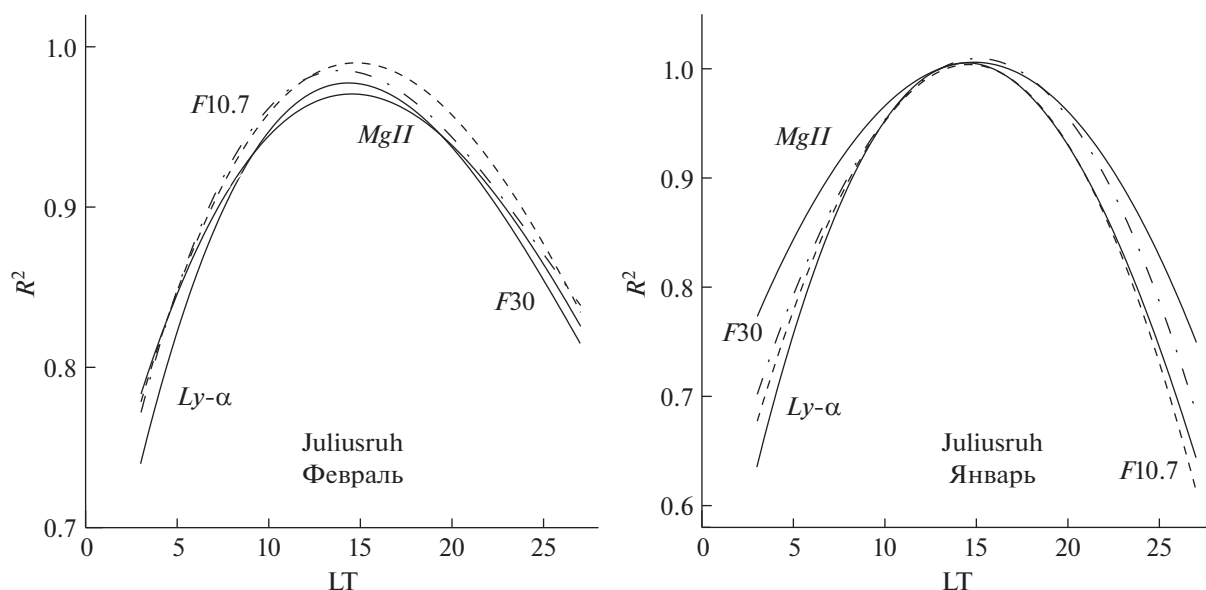
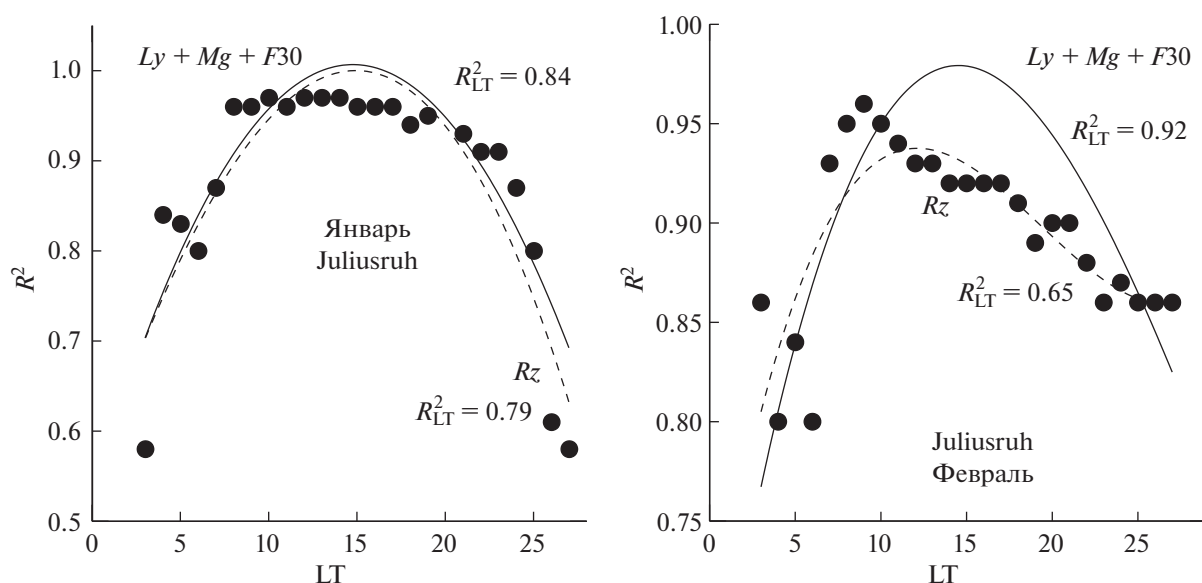
Рис. 5. Зависимости коэффициента определенности R^2 от LT для различных индексов СА.

сяца используются одни и те же величины $foF2$ для сравнения со всеми индексами, это различие может быть вызвано только различием в самих индексах. Связано ли это с какими-то ошибками в банках данных для индексов СА или с реальными различиями в поведении индексов, мы судить не беремся. Полученные нами результаты позволяют лишь утверждать, что для анализа зависимости $foF2$ от солнечной активности лучше всего использовать индексы $Ly-\alpha$, $MgII$ и $F30$. Не следует при таком анализе использовать индексы Rz .

Резюмируя результаты, полученные в данном подразделе, следует отметить следующее. Суще-

ствует хорошо выраженная зависимости величины R^2 (которую мы рассматриваем как меру качества описания зависимости $foF2$ от соответствующего индекса СА) от времени суток. Величина R^2 в дневные часы выше, чем ночью. Иными словами, все рассмотренные индексы СА лучше описывают зависимость $foF2$ от солнечной активности днем, чем ночью.

Качество указанного описания (величины R^2) в январе примерно одинаково для всех пяти индексов. В феврале величины R^2 для четырех индексов ($Ly-\alpha$, $MgII$, $F30$ и $F10.7$) близки, а для Rz сильно отличаются от них.

Рис. 6. Аппроксимирующие линии зависимостей R^2 от LT.Рис. 7. Сравнение зависимости R^2 от LT для R_z и для среднего значения R^2 для трех индексов.

Сравнение с результатами анализа для других месяцев приводится ниже.

3.2. Другие месяцы

В предыдущем подразделе мы подробно анализировали поведение величин R^2 в два типичных зимних месяца. В этом подразделе мы делаем попытку посмотреть на поведение R^2 в другие сезоны. Детальный анализ сезонных вариаций для всех месяцев требует отдельного исследования —

мы ограничимся здесь кратким анализом для двух равноденственных месяцев (марта и октября) и летнего месяца июня.

На рис. 8 приведены примеры зависимости R^2 от LT для двух равноденственных месяцев. Чтобы не перегружать рисунки, мы сравниваем эти зависимости для двух индексов — для $Ly-\alpha$ и $MgII$ в октябре и $Ly-\alpha$ и $F30$ в марте. Как видно из рис. 8, величины R^2 для двух индексов хорошо согласуются между собой. Многие точки просто совпада-

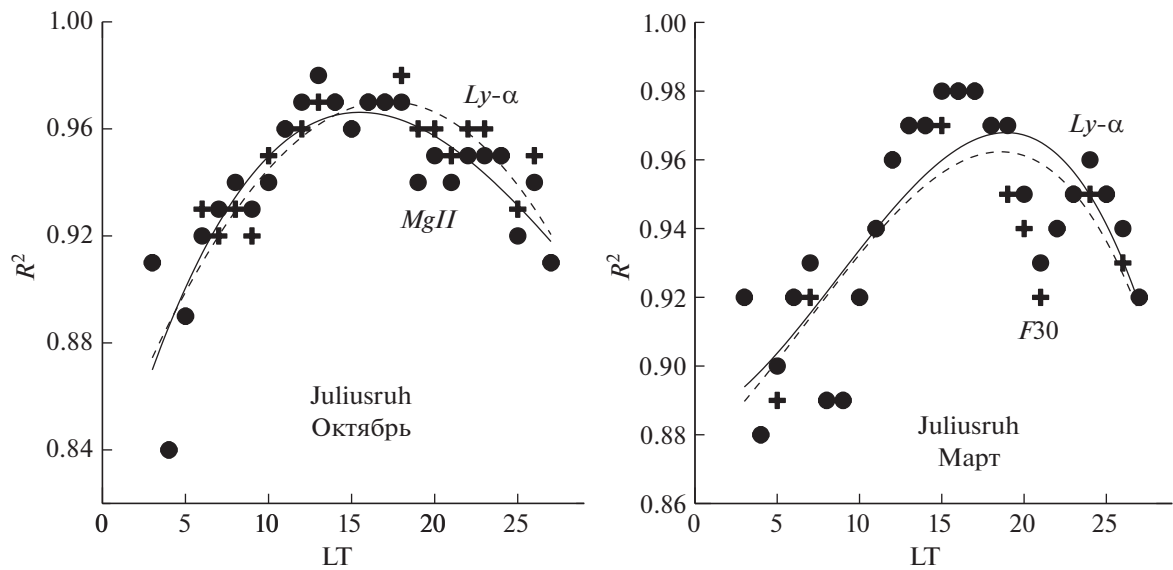


Рис. 8. Сравнение зависимости R^2 от LT для двух индексов СА в октябре и марте.

ют, а аппроксимирующие кривые (полиномы третьей степени) близки.

Изменения R^2 с LT для четырех индексов ($Ly-\alpha$, $MgII$, $F30$, и $F10.7$) для этих месяцев хорошо согласуются между собой. Чтобы избежать громоздких таблиц, мы сравниваем, как и выше в табл. 1, в табл. 2 величины R^2 для всех пяти индексов СА, но только для двух ночных и трех околополуденных моментов LT. Видно, что для указанных четырех индексов согласие очень хорошее.

Иная картина наблюдается для индекса Rz . Для ночных часов в табл. 2 заметно отличие величин R^2 для Rz от величин для четырех других индексов. Отличие становится еще более нагляд-

ным при рассмотрении полного суточного хода на рис. 9. Для большей наглядности мы сравниваем на этом рисунке изменение R^2 для Rz (точки и штриховая аппроксимирующая кривая) с усредненным ходом для трех индексов ($Ly-\alpha$, $MgII$, и $F30$) – сплошная аппроксимирующая кривая.

Рисунок 9 показывает, что величины R^2 почти для всех LT в марте и для моментов LT в послеполуденные, вечерние, ночные и ранние утренние часы в октябре заметно меньше, чем соответствующие величины для трех других индексов. В марте обращает на себя внимание также сильный разброс величин R^2 для Rz . Соответствующая величина коэффициента определенности R^2_{LT} при аппроксимации зависимости величины R^2 от LT для Rz существенно меньше, чем R^2_{LT} для трех других индексов.

Таким образом, можно утверждать, что, как и в зимние месяцы (см. предыдущий подраздел), в равноденственные месяцы индекс Rz гораздо хуже описывает изменение $foF2$ с солнечной активностью, чем другие индексы СА.

Для типичного летнего месяца июня наблюдается совершенно иная картина, чем для рассмотренных выше зимних и равноденственных месяцев. Изменение R^2 с LT для июня для четырех индексов СА приведено на рис. 10. Картина для Rz в июне близка к таковой для других индексов.

Как видно из рис. 10, для всех индексов СА полностью отсутствует выраженный суточный ход, подобный приведенному на рис. 5–9 для зимних и равноденственных месяцев. Наибольшие величины R^2 наблюдаются не в околополуденные часы, как на предыдущих рисунках, а в

Таблица 2. Величины R^2 для двух месяцев и пяти индексов СА

LT	$Ly-\alpha$	$MgII$	Rz	$F30$	$F10.7$
Март					
1	0.95	0.92	0.9	0.95	0.93
2	0.94	0.92	0.89	0.93	0.92
11	0.94	0.94	0.93	0.94	0.94
12	0.96	0.94	0.94	0.96	0.94
13	0.97	0.94	0.95	0.97	0.96
Октябрь					
1	0.92	0.93	0.89	0.93	0.92
2	0.94	0.95	0.9	0.95	0.93
11	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97
12	0.97	0.96	0.96	0.98	0.97
13	0.98	0.97	0.96	0.98	0.98

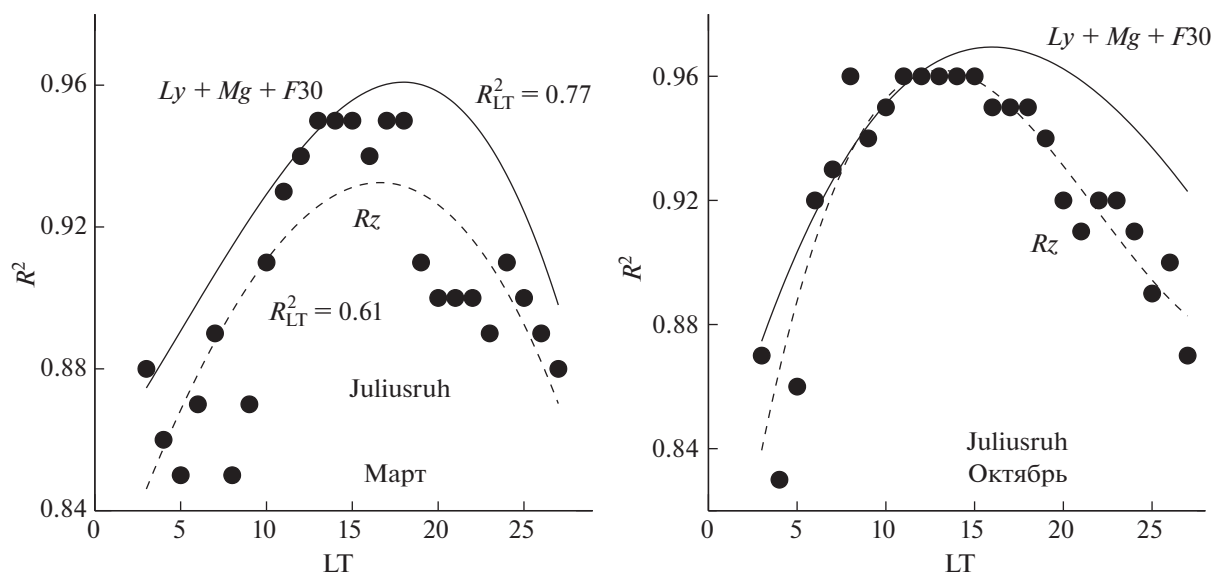


Рис. 9. Сравнение изменения R^2 для R_z и трех других индексов в марте и октябре.

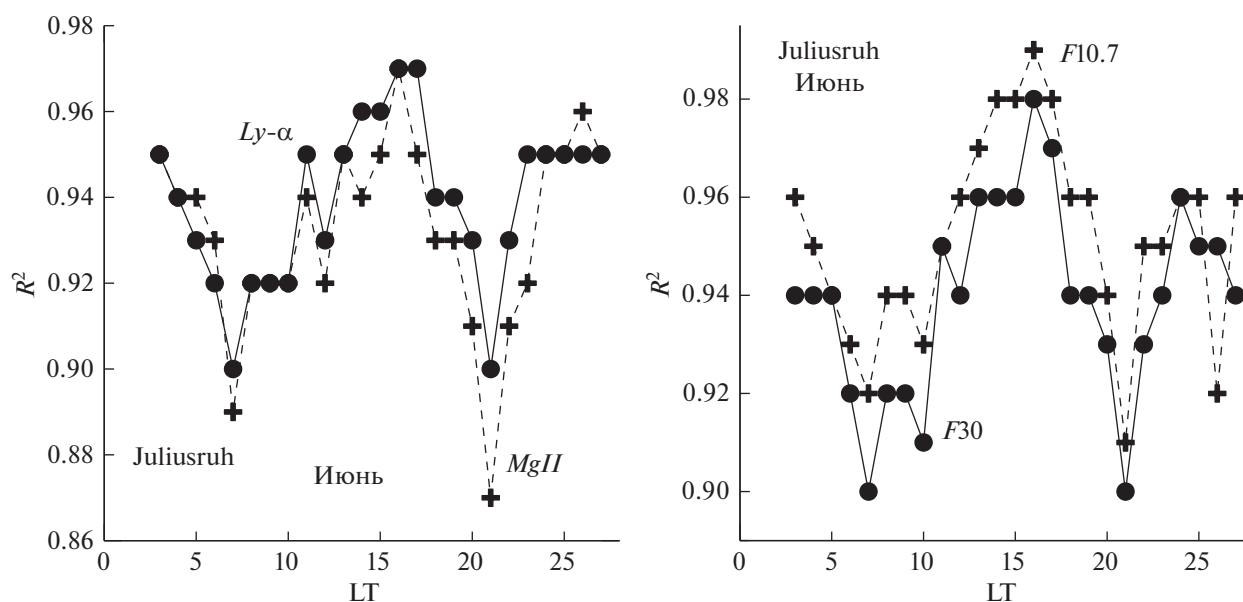


Рис. 10. Изменение R^2 с LT в июне для различных индексов СА.

15:00–17:00 LT, а минимальные значения R^2 приходятся не на 02:00–03:00 LT, а на поздние утренние и вечерние часы.

Чтобы завершить сравнение разных месяцев, мы приводим рис. 11, на котором показаны средние по трем индексам СА ($Ly-\alpha$, Mg и $F30$) изменения величины R^2 с LT для четырех месяцев.

Видно, что для февраля, марта и октября наблюдается хорошо выраженный суточный ход — днем величины R^2 выше, чем ночью. При этом в околополуденные часы величины R^2 для этих трех

месяцев близки, тогда как падение R^2 ото дня к ночи сильнее для февраля, чем для марта и октября. Поведение R^2 в июне совершенно отличается от такового в три других месяца — в июне практически нет выраженного суточного хода.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель данной работы — проанализировать качество описания поведения критической частоты слоя $F2$, $foF2$, различными индексами СА.

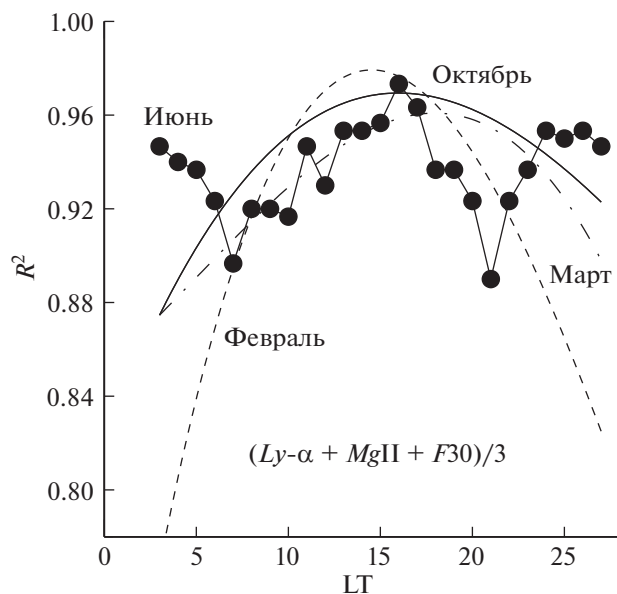


Рис. 11. Усредненное по трем индексам изменение R^2 с LT в различные месяцы.

Во ВВЕДЕНИИ уже подчеркивалось, что вопрос о наилучшем индексе СА для описания зависимости ионосферных параметров от солнечной активности весьма важен и активно обсуждается в настоящее время.

Мы провели детальный статистический анализ описания поведения $foF2$ с изменением индексов СА для пяти таких индексов — интенсивности линии $Ly-\alpha$, отношения интенсивностей в центре и крыльях линии магния ($MgII$), числа солнечных пятен (Rz), интенсивности солнечного радиоизлучения с длиной волны 30 см ($F30$) и интенсивности солнечного радиоизлучения с длиной волны 10.7 см ($F10.7$).

Рассматривался период 1957–1980 гг., когда по современным представлениям еще не было трендов критической частоты и можно получать “чистую” зависимость $foF2$ от солнечной активности. Эта зависимость строилась для каждого часа местного времени LT. Наиболее подробно проанализированы два зимних месяца (январь и февраль), когда по нашим данным максимальны отрицательные тренды $foF2$ в последние десятилетия.

В качестве меры качества описания зависимости $foF2$ от СА тем, или иным индексом использовался коэффициент определенности R^2 по F-тесту Фишера.

Основным результатом анализа для зимних месяцев явилось то, что существует хорошо выраженная зависимость величины R^2 от времени суток. Для всех пяти рассмотренных индексов СА эта величина в дневные часы выше, чем ночью. Иными словами, все рассмотренные индексы СА

зимой значительно лучше описывают зависимость от солнечной активности днем, чем ночью. При этом падение величин R^2 от дневных значений к ночным происходит в январе значительно сильнее, чем в феврале. Соответственно, в январе ночные величины R^2 существенно ниже, чем в феврале.

В целом все пять индексов в зимние месяцы примерно одинаково описывают вариации $foF2$. Исключением является суточный ход R^2 в январе для индекса Rz . Есть и другие указания на то, что этот индекс меньше подходит для описания $foF2$, чем другие индексы (см. ниже).

В равноденственные месяцы (март и октябрь) так же, как и зимой, для всех пяти индексов наблюдается хорошо выраженный суточный ход — величины R^2 в дневные часы выше, чем в ночные. Между четырьмя индексами СА ($Ly-\alpha$, $MgII$, $F30$ и $F10.7$) наблюдается хорошее согласие, а вот суточный ход R^2 для индекса Rz существенно отличается. Как следует из рис. 9, в периоды равноденствия во все часы суток число солнечных пятен гораздо хуже описывает поведение $foF2$ с солнечной активностью, чем другие рассмотренные индексы.

Совершенно иная картина наблюдается для летнего месяца июня. Для всех пяти индексов полностью отсутствует суточный ход величины R^2 , и наблюдаются сильные скачки этой величины от одного часа LT к другому. При этом, однако, сами величины R^2 остаются на достаточно высоком уровне (0.89–0.97). Тем не менее, полученный результат заставляет с осторожностью относиться к учету влияния солнечной активности на поведение $foF2$ в летние месяцы с помощью рассмотренных индексов.

По совокупности всего проведенного в данной работе анализа мы считаем, что в целом наилучшими индексами для описания поведения $foF2$ в цикле СА являются индексы $MgII$ и $F30$. За ними следует индекс $Ly-\alpha$. Этот вывод согласуется с нашими выводами, полученными при анализе трендов $foF2$ [Данилов и др., 2023; Danilov and Konstantinova, 2023], а также частично совпадает с выводами, полученными другими авторами. Laštovička [2021a, b; 2022] для поиска трендов среднегодовых величин $foF2$ рекомендует индексы $MgII$ и $F30$. Perna and Pezzopane [2016] и Venchiarutti et al. [2021] рекомендовали $MgII$ для описания поведения $foF2$. Gulyaeva et al. [2018] рекомендовали $MgII$ как наилучший индекс для построения эмпирических ионосферных моделей. De Haro Barbás et al. [2023] пришли к выводу, что для описания поведения $foF2$ с помощью модели IRI наилучшим индексом является $MgII$.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Величины солнечных индексов были взяты с сайта LISIRD (<https://lasp.colorado.edu>). Авторы благодарят А.В. Константинову за расчеты месячных медиан $foF2$.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 3. С. 291–312. 2012.
- 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. 2020а.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Тренды параметров слоя $F2$ и 24-й цикл солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 5. С. 619–630. 2020б.
- Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Тренды критической частоты слоя $F2$ в последнее десятилетие // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 2. С. 139–146. 2023.
- Bilitza D. International Reference Ionosphere 1990. National Space Science Data Center, NSSDC 90–92, Greenbelt, Maryland. 1990.
- Danilov A.D. Seasonal and diurnal variations in $foF2$ trends // J. Geophys. Res. – Space. V. 120. P. 3868–3882. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020971>
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Trends in $foF2$ and the 24th solar activity cycle // Adv. Space Res. V. 65. P. 959–965. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.10.038>
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Trends in $foF2$ to 2022 and various solar activity indices // Adv. Space Res. V. 71. № 11. P. 4594–4603. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.028>
- 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.
<https://doi.org/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.F., Jun G.T., Bravo M., Ledesma M.M., Venchiarutti V., Gonzalez G., Medina F.D., Trinidad Duran T., Elias A.G. IRI performance considering Mg II as EUV solar proxy // Adv. Space Res. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.06.0007>
- Gulyaeva T.L., Arikan 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. Is the relation between ionospheric parameters and solar proxies stable? // Geophys. Res. Lett. V. 46. № 24. P. 14208–14213. 2019.
<https://doi.org/10.1029/2019GL085033>
- Laštovička J. What is the optimum solar proxy for long-term ionospheric investigations? // Adv. Space Res. V. 67. № 1. P. 2–8. 2021a.
<https://doi.org/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.
<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. Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere and ionosphere. 2023.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-302>
- 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.
<https://doi.org/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., Renkowitz 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>
- Venchiarutti J.V., Farge M., Zossi B.S., Tan Juan Rios G., Medina F.D. Mg II as a solar proxy to filter F2-region ionospheric parameters // Pure Appl. Geophys. V. 178. P. 4605–4618. 2021.
<https://doi.org/10.1007/s00024-021-02884>
- Zhang S.R., Cnossen I., Laštovička J., Elias A.G., Yue X., Jacobi C., Yue J., Wang W., Qian L., Goncharenko L. Long-term geospace climate monitoring // Frontiers in Astronomy and Space Science. V. 10. 2023.
<https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1139230>