

ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В 24-М ЦИКЛЕ И ПОВЕДЕНИЕ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ

© 2021 г. А. Д. Данилов*

Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПП), г. Москва, Россия

*e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 20.08.2020 г.

После доработки 15.09.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Продолжен анализ, начатый в предыдущих работах автора, связи между наиболее часто используемым индексом солнечной активности $F10.7$ и индексами солнечной активности ($Ly-\alpha$, Rz и $Mg II$), отражающими вариации ультрафиолетового излучения Солнца, которое определяет поведение основных ионосферных слоев. Показано, что связи между $F10.7$ и указанными тремя индексами близки между собой в 22-м и 23-м циклах активности. Однако в 24-м цикле они отличаются от таковых в двух предыдущих циклах и менее значимы статистически. Для одних и тех же значений индексов $Ly-\alpha$, Rz и $Mg II$ величины $F10.7$ меньше в 24-м цикле, чем в двух предыдущих циклах. Это объясняет полученный ранее результат, что использование индекса $F10.7$ без коррекции при анализе поведения $foF2$ и $hmF2$ в 24-м цикле приводит к положительным трендам, которые противоречат современным представлениям об охлаждении и оседании верхней атмосферы. Предложена коррекция $F10.7$ тремя указанными индексами для вычисления ионосферных трендов.

DOI: 10.31857/S0016794021020048

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долговременных изменений (трендов) параметров ионосферных слоев остается одной из важных проблем физики верхней атмосферы. Не отвлекаясь на дальнейшее обсуждение важности этой проблемы, мы отсылаем читателей к недавнему обзору Данилова и Константиновой [2020a].

В серии недавних работ [Данилов и Константинова, 2019, 2020б, в; Danilov and Konstantinova 2020a, b] подробно рассмотрены тренды параметров ионосферного слоя $F2$ ($foF2$ и $hmF2$) на основании наблюдений методом вертикального зондирования на станциях Juliusruh и Boulder. Основным результатом этих работ был вывод о том, что наиболее часто используемый индекс солнечной активности (СА), $F10.7$, не описывает правильно изменение солнечного ультрафиолетового излучения EUV, ответственного за образование большей части ионосферы. Оказалось, что при коррекции этого индекса двумя другими индексами солнечной активности (число солнечных пятен Rz и интенсивность линии $Ly-\alpha$), лучше передающими вариации EUV, наблюдается хаотическое изменение как $foF2$, так и $hmF2$ в период с 2002–2004 до 2008–2010 гг., который получил название “смутный период”, а затем

восстанавливается отрицательный тренд обоих параметров.

Как и большинство исследователей, которые обращали внимание на необычный характер поведения ионосферных и термосферных параметров в период глубокого минимума СА между 23-м и 24-м циклами (см. Emmert et al. [2010]; Chen et al. [2011]; Solomon et al. [2011, 2013]), Danilov and Konstantinova [2020a, b] связали полученный результат с нарушением связи между наиболее часто используемым индексом солнечной активности $F10.7$ и интенсивностью солнечного ультрафиолетового излучения, определяющего поведение параметров ионосферы и термосферы.

Многие исследователи обращали внимание на необычное поведение индекса солнечной активности $F10.7$ в течение минимума 23/24 и 24-го цикла СА (см., например, [Chen et al., 2011, 2014, 2018; De Haro Barbas and Elias, 2020; De Haro Barbas et al., 2020; Laštovička, 2016, 2019]). Тот факт, что 24-й цикл СА является необычным, неоднократно упоминался в докладах на предыдущих четырех Симпозиумах по долговременным трендам в атмосфере и, в частности, в итоговых докладах J. Laštovička. Laštovička [2016] указывал на проблемы, связанные с правильным учетом солнечной активности при определении трендов ионосферных параметров. В работах Livingstone et al. [2012]

and Balogh et al. [2014] сообщалось о нарушениях связи между R_z и $F_{10.7}$.

Наиболее четко эта проблема сформулирована в работе De Naro Barbas and Elias [2020]. Авторы этой работы анализировали тренды foF_2 в дневные часы по данным двух японских ионосферных станций Kokubunji и Wakkanai. Они обнаружили, что включение в анализируемый ряд данных измерений в течение 24-го цикла резко меняет величины получаемых трендов — тренды становятся “более положительными”. Иначе говоря, либо значительно уменьшается магнитуда отрицательных трендов, либо они даже превращаются в положительные. В следующей работе De Naro Barbas et al. [2020] пришли точно к такому же выводу, анализируя данные измерений foF_2 на указанных станциях в ночные часы.

Поскольку выводы, полученные в их недавних работах, представляются важными для всей проблемы поиска трендов параметров слоя F_2 , Данилов и Константинова [2020в] продолжили анализ поведения трендов foF_2 в 24-м цикле СА на основании дополнительных данных. Как и в предыдущих работах, анализировались тренды по данным ст. Juliusruh и ст. Boulder. Однако для Juliusruh в доступных банках данных появились измерения за 2019 г. Таким образом, появилась еще одна важная точка на зависимостях foF_2 от времени, по которым определяется тренд. Кроме того, в дополнение к анализу для трех месяцев (январь—март) и трех моментов LT (10:00, 12:00 и 14:00 LT), когда согласно предыдущим исследованиям [Danilov, 2015; Данилов и Константинова, 2015] наблюдаются самые большие по амплитуде отрицательные тренды foF_2 в их сезонном и суточном ходе, был добавлен анализ для июня и октября и ночного времени (04:00 и 20:00 LT). И, наконец, в дополнение к корректировке индекса $F_{10.7}$ индексами R_z и $Ly-\alpha$, выполненной в предыдущих работах, была добавлена корректировка $F_{10.7}$ очень часто используемым индексом СА. Этот индекс представляет собой интенсивности линии Mg II в солнечном спектре и считается наилучшим индикатором изменения солнечного ультрафиолета (EUV).

Результаты Данилова и Константиновой [2020в] подтвердили выводы предыдущих публикаций и показали, что при корректировке $F_{10.7}$ индексами $Ly-\alpha$, R_z и Mg II получается одна та же картина изменения foF_2 со временем: хорошо выраженные и статистически значимые отрицательные тренды до 2002—2004 гг., хаотичный характер вариаций foF_2 в течение “смутного периода” и восстановление отрицательных трендов после 2008—2010 гг.

2. ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В 24-М ЦИКЛЕ

Поскольку приведенные выше выводы о трендах foF_2 основываются на утверждении, что наиболее часто используемый индекс $F_{10.7}$ в 24-м цикле не передает правильно вариации солнечного УФ-излучения, определяющего поведение ионосферы и термосферы, и его нужно корректировать с помощью других индексов СА, был проведен более детальный анализ связи между различными индексами СА в этом цикле. Ниже представлены результаты этого анализа.

Анализ поведения foF_2 и hmF_2 в работах Данилов и Константинова [2019, 2020б, в] и Danilov and Konstantinova [2020a, b] был основан на том факте, что связь между $F_{10.7}$ и другими солнечными индексами, лучше отражающими вариации EUV, нарушена в 24-м цикле. Соответствующие примеры, демонстрирующие различный характер поведения соотношения между $F_{10.7}$ и индексами $Ly-\alpha$ и R_z в этом цикле и в предыдущих циклах можно найти в работе Danilov and Konstantinova [2020б]. Аналогичное сравнение поведения индексов $F_{10.7}$ и Mg II было выполнено Laštovička [2019]. На рисунке 1 в работе Danilov and Konstantinova [2020б] приведено сравнение поведения индекса солнечного EUV ($Ly-\alpha$) и $F_{10.7}$ в более ранний период и в 24-м цикле СА согласно работе Danilov and Konstantinova [2020а]. Рядом на том же рисунке приведено аналогичное сравнение другого индекса солнечного EUV (Mg II) и $F_{10.7}$ в течение более раннего периода (1979—1995) и 24-го цикла СА согласно Laštovička [2019]. Оба рисунка удивительно схожи и ведут к одному и тому же выводу (полученному независимо двумя группами авторов!), что связь между индексом $F_{10.7}$ и солнечным EUV нарушена в 24-м цикле.

Ниже представлен дальнейший анализ проблемы. Было выполнено сравнение связи между $F_{10.7}$ и другими солнечными индексами ($Ly-\alpha$, R_z и Mg II) в течение 22-го, 23-го и 24-го циклов СА для всех месяцев, проанализированных Даниловым и Константиновой [2020в]: январь, февраль, март, июнь и октябрь. Во всех сравнениях использовался индекс $F_{10.7}sm_{12}$, который был использован при поиске ионосферных трендов (см. Данилов и Константинова [2019, 2020а, б]). Типичные примеры сравнения индексов $F_{10.7}sm_{12}$ и Mg II приведены на рис. 1. На рисунке 2 приведены примеры сравнения $F_{10.7}sm_{12}$ с $Ly-\alpha$ и R_z . Для каждого цикла экспериментальные точки аппроксимировались прямой линией. Соответствующие величины коэффициента определенности по F-тесту Фишера R^2 приведены возле линий. Рисунки показывают, что связь между $F_{10.7}sm_{12}$ и другими индексами СА ($Ly-\alpha$, R_z и Mg II) в 24-м цикле отличается от таковой в 22-м и 23-м циклах. Наклон аппроксимирующей линии в 24-м цик-

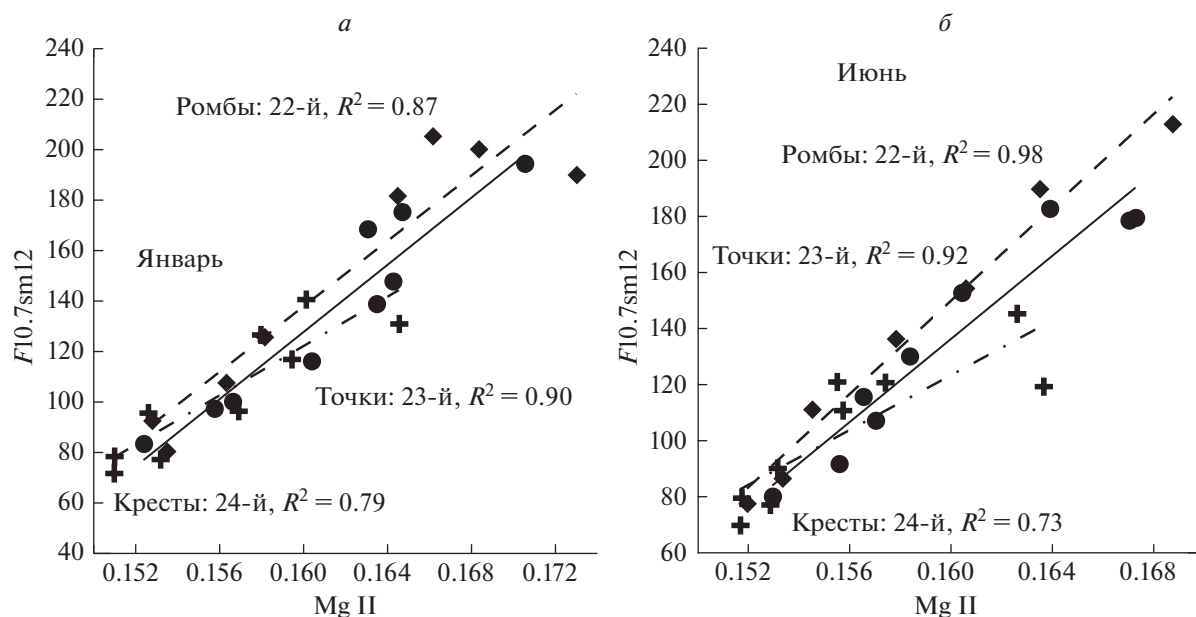


Рис. 1. Примеры связи между $F10.7sm12$ и $Mg II$.

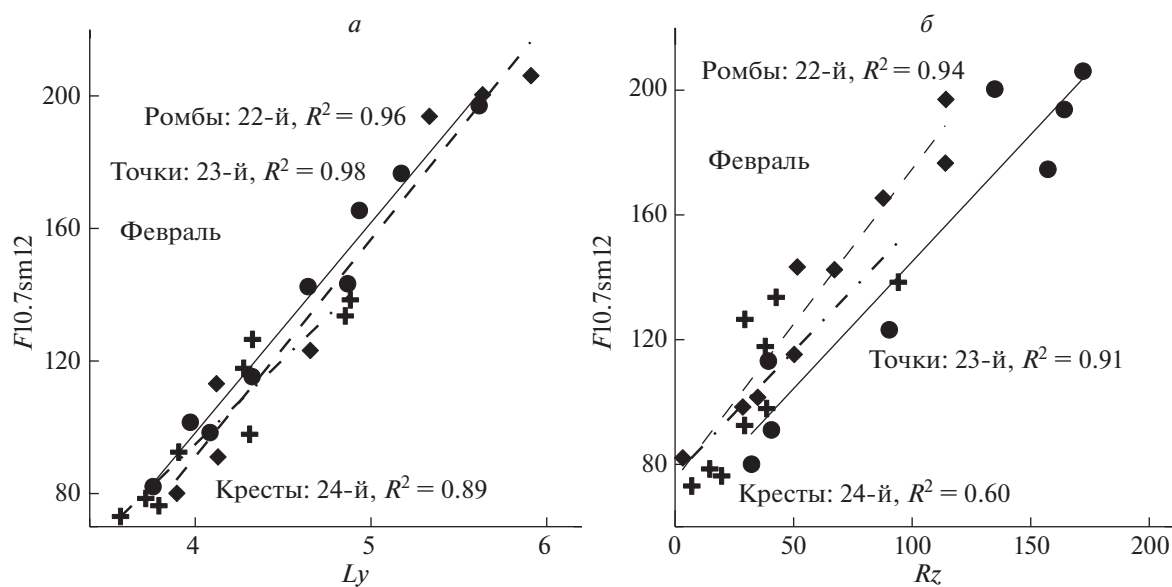


Рис. 2. Примеры связи между $F10.7sm12$ и $Ly-\alpha$ (а) и Rz (б).

ле меньше, чем в более ранних циклах, а разброс точек — сильнее, что видно и по величинам R^2 .

В таблице 1 приведены результаты сравнения $F10.7sm12$ с тремя другими индексами для всех пяти месяцев. Наклон S линейной аппроксимации приведен в отношениях единиц использованных индексов. В скобках приведены величины R^2 .

Таблица 1 показывает, что наклоны зависимости $F10.7$ от других индексов СА примерно одинаковы для 22-го и 23-го циклов, тогда как наклон этой зависимости для 24-го цикла меньше (и в не-

которых случаях существенно), чем для двух предыдущих циклов. Этот эффект особенно выражен для зависимости $F10.7$ от индекса $Mg II$ для всех пяти месяцев. В то же время, статистическая значимость зависимостей (величина R^2) во многих случаях ниже для 24-го цикла, чем для двух других циклов. Наиболее наглядные примеры видны для зависимостей $F10.7$ от Rz в феврале и от $Mg II$ в июне.

Различие в величинах S и R^2 подтверждает предположение о том, что связь между $F10.7$ и другими индексами СА в 24-м цикле нарушена.

Таблица 1. Наклон S аппроксимации зависимости между $F10.7sm12$ и другими индексами СА в течение трех циклов

Индексы СА		22-й цикл	23-й цикл	24-й цикл
Январь	$F10.7$ и $Ly-\alpha$	55.72 (0.92)	56.79 (0.93)	52.48 (0.98)
	$F10.7$ и Rz	0.857 (0.93)	1.029 (0.97)	0.918 (0.95)
	$F10.7$ и $Mg II$	6484 (0.87)	6655 (0.90)	4887 (0.79)
Февраль	$F10.7$ и $Ly-\alpha$	65.58 (0.96)	63.43 (0.98)	51.32 (0.89)
	$F10.7$ и Rz	0.814 (0.91)	0.995 (0.94)	0.795 (0.60)
	$F10.7$ и $Mg II$	6844 (0.90)	6832 (0.90)	6127 (0.82)
Март	$F10.7$ и $Ly-\alpha$	65.27 (0.93)	58.48 (0.95)	52.58 (0.93)
	$F10.7$ и Rz	1.088 (0.99)	0.697 (0.91)	0.911 (0.78)
	$F10.7$ и $Mg II$	7797 (0.85)	7852 (0.89)	6178 (0.85)
Июнь	$F10.7$ и $Ly-\alpha$	57.86 (0.97)	69.68 (0.97)	65.72 (0.92)
	$F10.7$ и Rz	0.878 (0.91)	0.774 (0.98)	1.076 (0.93)
	$F10.7$ и $Mg II$	8325 (0.98)	7471 (0.92)	4892 (0.73)
Октябрь	$F10.7$ и $Ly-\alpha$	61.04 (0.98)	56.02 (0.93)	56.41 (0.94)
	$F10.7$ и Rz	0.884 (0.93)	0.833 (0.94)	0.853 (0.80)
	$F10.7$ и $Mg II$	8429 (0.98)	7030 (0.92)	6922 (0.83)

Таблица 2. Сравнение индексов $F10.7sm12$, скорректированных другими индексами СА (А), с индексами без коррекции (Б)

Год	Январь		Февраль		Март		Июнь		Октябрь	
	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
2010	82.2	75.5	92.3	76.5	90.9	77.4	72.9	79.7	89.0	85.2
2011	84.7	91.2	101.3	92.7	116.8	95.8	100.0	110.9	136.6	118.4
2012	119.7	124.4	120.9	126.7	120.5	126.8	112.4	121.1	114.6	119.2
2013	124.5	118.9	113.0	118	122.8	117.1	115.0	120.9	130.4	134.7
2014	136.1	137.3	151.9	138.6	151.5	140.8	135.0	145.5	134.4	138.4
2015	142.0	135.8	131.9	133.8	133.6	131.2	132.7	119.5	108.5	107.9
2016	106.8	99.8	117.7	98.1	106.4	96.6	82.6	90.3	90.3	82.4
2017	79.9	79.3	83.1	78.7	81.6	78.6	76.6	77.3	78.7	75.1
2018	72.4	74.0	77.7	73.3	75.4	71.9	69.7	70.0	71.3	70.3

Более низкие величины S означают, что для той же самой величины индексов, более тесно связанных с EUV, величины $F10.7$ в 24-м цикле ниже, чем в двух предыдущих циклах. Более низкие величины R^2 косвенно подтверждают это утверждение.

Приведенный выше вывод объясняет результаты, полученные в работах Данилова и Константиновой [2019, 2020б, в], Danilov and Konstantinova [2020a], De Haro Varbas and Elias [2020] и De Haro Varbas et al. [2020], о том, что, если используется индекс $F10.7$ без коррекции, тренды $foF2$ становятся “более положительными”. Тренды получают, сравнивая наблюдаемые величины $foF2$ с их регрессионной зависимостью от $F10.7$. Если последняя величина недооценивается в

24-м цикле из-за недооценки величин $F10.7$, разница между наблюдаемыми и регрессионными величинами будет завышена, и это приведет к высоким значениям тренда.

Стоит вычислить “правильные” величины индекса $F10sm12$ для анализа ионосферных трендов в 24-м цикле СА, используя зависимость $F10.7sm12$ от трех других индексов ($Ly-\alpha$, Rz и $Mg II$) в 22-м и 23-м циклах и величины этих индексов, полученные в 24-м цикле. В таблице 2 приведено сравнение скорректированных величин $F10.7sm12$ (столбцы А) с величинами без коррекции (столбцы Б). Величины в столбцах А представляют собой среднее значение трех величин, полученных при коррекции $F10.7sm12$ каждым из трех других индексов ($Ly-\alpha$, Rz , and $Mg II$).

Сравнение соответствующих столбцов в таблице 2 подтверждает приведенный выше вывод о том, что в подавляющем большинстве случаев скорректированные величины $F10.7$ выше, чем величины без коррекции. Представляется правильным при анализе трендов ионосферных параметров в 24-м цикле СА использовать именно скорректированные величины $F10.7$.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В недавней работе Данилова и Константиновой [2020в] на основании использования дополнительных данных были подтверждены выводы, полученные ранее в работах Данилова и Константиновой [2019, 2020б] и Danilov and Konstantinova [2020a, b] о поведении трендов $foF2$ в течение 24-го цикла СА. В качестве дополнительных данных использовались величины $foF2$ для июня и октября и ночных часов (20:00 LT и 04:00 LT); а также индекс Mg II, наиболее часто используемый для описания поведения солнечного ультрафиолета (см. De Haro Barbas and Elias [2020], De Haro Barbas et al. [2020] и Laštovička [2016, 2019]).

Полученные результаты полностью подтвердили выводы более ранних работ, приведенных выше. Если индекс $F10.7$ скорректирован другими индексами СА ($Ly-\alpha$, Rz , или Mg II), во всех рассмотренных ситуациях (месяц и LT), наблюдаются отрицательные тренды $foF2$ до 2002–2004 гг. Затем наступает “смутный период”, когда поведение $foF2$ носит хаотичный характер. После 2008–2009 гг. восстанавливается отрицательный тренд $foF2$. Последнее заключение очень важно, поскольку использование величин $F10.7$ без коррекции будет приводить к неизбежному заключению о росте $foF2$ и, таким образом, о положительных трендах в 24-м цикле. Такое заключение будет противоречить процессу охлаждения и оседания верхней атмосферы, который происходит в настоящее время (см. Laštovička et al. [2008]; Laštovička [2018]).

Подтверждение результатов о трендах $foF2$ в 24-м цикле СА заставило более детально проанализировать связь индекса солнечной активности $F10.7$ с другими индексами СА ($Ly-\alpha$, Rz и Mg II), которые лучше описывают вариации солнечного ультрафиолета (EUV). Получено, что наклон зависимости $F10.7$ от других индексов в большинстве случаев в 24-м цикле меньше, чем в 22-м и 23-м циклах. Это означает, что индекс $F10.7$ занижает величины EUV в 24-м цикле. Полученный результат объясняет более высокие величины трендов $foF2$ в 24-м цикле, которые получаются, если используются величины $F10.7$ без коррекции.

Обсуждение природы и физических механизмов обнаруженного явления — дело специалистов в области солнечной физики. Цель данной статьи —

подтвердить выводы, полученные ранее в работах Данилова и Константиновой [2019, 2020б, в], Danilov and Konstantinova [2020a, b] и Laštovička [2019] о нарушении связи между $F10.7$ и другими индексами СА, используя еще один индекс (Mg II) и увеличив количество анализируемых месяцев.

Можно надеяться, что другие авторы проведут исследования, аналогичные поведенным в работах De Haro Barbas and Elias [2020], De Haro Barbas et al. [2020], Laštovička [2019], Danilov and Konstantinova [2020a, b] и в данной работе, чтобы проверить полученные заключения о поведении индексов солнечной активности в 24-м цикле СА.

БЛАГОДАРНОСТИ

Среднемесячные величины числа солнечных пятен Rz , а также индексов $Ly-\alpha$ и Mg II были взяты с сайта: (<https://lasp.colorado.edu>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д., Константинова А.В. Вариации трендов $foF2$ сезоном и временем суток // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 55. № 1. С. 56–63. 2015.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Тренды $foF2$ и 24-й цикл солнечной активности // Гелиогеофизические исслед. Вып. 23. С. 42–49. 2019.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэронаука. 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 аэронаука. Т. 60. № 5. С. 619–613. 2020б.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Дальнейший анализ трендов $foF2$ до 2018–2019 гг. // Гелиогеофизические исслед. Вып. 27. С. 46–54. 2020в.
- Balogh A., Hudson H.S., Petrovay K., von Steiger R. Introduction to the solar cycle: Overview of causes and consequences // Space Sci. Rev. 186. P. 1–15. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0125-8>
- Chen Y., Libo L., Wan W. Does the $F10.7$ index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009? // J. Geophys. Res. V. 116. № A04304. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA016301>
- Chen Y., Libo L., Le H., Wan W. How does ionospheric TEC vary if solar EUV irradiance continuously decreases? // Earth Planets Space. V. 66. 2014. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-52>
- Chen Y., Libo L., Le H., Wan W. Ionospheric variations under extremely low solar EUV condition. Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere. Hefei, China, May 14–18, 2018.
- 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. 2020a.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.10.038>
- *Danilov A.D., Konstantinova A.V.* Trends in *hmF2* and the 24th solar activity cycle // *Adv. Space Res.* V. 66. P. 292–298. 2020b.
- *De Haro Barbas 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. doi: 200-021-0548 9. 2020.
<https://doi.org/10.1007/s11>
- *Emmert J.T., Lean J.L., Picone J.M.* Record-low thermospheric density during the 2008 solar minimum // *Geophys. Res. Lett.* V. 37. N L12102. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2010GL043671>
- *Laštovička J.* Stability of solar correction for calculating ionospheric trends? Paper presented at the 9th Workshop on long-term changes and trends in the atmosphere, Kühlungsborn, Germany, September 19–23, 2016.
- *Laštovička J.* A review of progress in trends in the mesosphere-thermosphere-ionosphere system. Paper presented at the 10th Workshop on Long-term Changes and Trends in the Atmosphere, Hefei, China, May 14–18, 2018. 2018.
- *Laštovička J.* Is the relation between ionospheric parameters and solar proxies stable? *Geophys. Res. Letters.* V. 46. № 24. P. 14208–14213. 2019.
<https://doi.org/10.1029/2019GL085033>
- *Laštovička J., Akmaev R.A., Beig G., Bremer J., Emmert J.T., Jacobi C., Jarvis M.J., Nedoluha G., Portnyagin Y.I., Ulich T.* Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere // *Ann. Geophysicae.* V. 26. № 5. P. 1255–1268. 2008.
- *Livingstone W., Penn M.J., Svalgaard L.* Decreasing sunspot magnetic fields explain unique 10.7 cm radio flux // *Astrophys. J. Lett.* V. 757. № 1. 2012.
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/757/1/L8>
- *Solomon S.C., Qian L., Didkovsky L.V., Viereck R.A., Woods T.N.* Causes of low thermospheric density during the 2007–2009 solar minimum // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A00H07. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016508>
- *Solomon S.C., Qian L., Burns A.G.* The anomalous ionosphere between solar cycles 23 and 24 // *J. Geophys. Res. Space.* V. 118. P. 6524–6535. 2013.