



## ТРЕНДЫ $hmF2$ И 24-Й ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А.В. Константинова, А.Д. Данилов

Методом, разработанным авторами и использованным ранее для определения долговременных трендов параметров ионосферного слоя  $F2$ , проанализированы измерения высоты слоя  $F2$ ,  $hmF2$ , на станции Juliusruh в период с 1958 по 2018 гг. Получено, что, как и для поведения критической частоты  $foF2$ , описанного авторами в двух предыдущих публикациях, наблюдаются особенности поведения  $hmF2$  после 2002-2003 гг. При использовании индекса солнечной активности  $F10.7$  после 2002-2003 г. наблюдается рост величины  $\Delta hmF2$ , дающий положительный тренд  $hmF2$ , который противоречит современным представлениям о продолжающемся процессе охлаждения и оседания верхней атмосферы. Если же использовать индекс  $F10.7$ , скорректированный по другим индексам СА (число солнечных пятен  $Rz$  и интенсивность линии Лайман-альфа), как это сделано для трендов  $foF2$  в двух предыдущих работах авторов, то получается такая же картина изменения трендов  $hmF2$ , как получена для  $foF2$ . До 2002-2003 гг. наблюдается хорошо выраженный отрицательный тренд  $hmF2$ , который сменяется хаотичным изменением  $\Delta hmF2$  в «смутный период», а в последние анализируемые годы вновь становится отрицательным.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** высота слоя  $F2$ , долговременные тренды, 24 цикл СА.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах авторов [Данилов и Константинова, 2019; Danilov and Konstantinova, 2019] были рассмотрены тренды критической частоты ионосферного слоя  $F2$ ,  $foF2$ , в период перехода от 23-го к 24-му циклу солнечной активности (СА). Было показано, что в переходный период 23/24 и в течение 24-го цикла индекс солнечной активности  $F10.7$ , наиболее часто используемый при анализе изменений со временем ионосферных параметров, не описывает правильно поведение  $foF2$  со временем. Долговременный отрицательный тренд  $foF2$ , который был хорошо выражен, начиная с 80-х годов прошлого столетия и до примерно 2009 г. (см. статью Данилова и Константиновой [2015] и ссылки там) при использовании индекса  $F10.7$  сменился на резко положительный примерно с 2003-2005 гг. Мы посчитали такой эффект нереальным, поскольку ионосферные тренды являются естественным следствием оседания и охлаждения верхней атмосферы (см. Lastovicka et al. [2008]). Эти процессы, в свою очередь, являются следствием увеличения в атмосфере количества двуокси углерода  $CO_2$ . Поскольку это количество продолжает неуклонно расти, нет оснований ожидать прекращения указанных процессов охлаждения и оседания верхней атмосферы и сопутствующих им отрицательных трендов  $foF2$ .

Дальнейший анализ ситуации привел авторов [Данилов и Константинова, 2019; Danilov and Konstantinova, 2019] к заключению, что изменение индекса  $F10.7$  в 24-м цикле СА следует подкорректировать, используя другие индексы СА, в частности – число солнечных пятен  $Rz$  и интенсивность линии Лайман-альфа в солнечном спектре. В результате такой коррекции было получено, что примерно после 2007-2009 гг. восстанавливается «нормальный» ход  $foF2$ , т.е. наблюдается отрицательный тренд этого параметра с магнитудой, близкой к тому, что наблюдалось до примерно 2003-2004 гг. Между 2003-2004 и 2007-2009 гг. поведение величины  $\Delta foF2$ ,

характеризующей тренд  $foF2$ , носило хаотичный характер, что дало нам основание назвать это время "смутным периодом". Мы связываем специфику этого периода с аномально низким минимумом СА, наблюдавшимся в 2008-2009 гг.

Указания на то, что в период смены 23/24 циклов наблюдались аномалии в поведении параметров термосферы и ионосферы, имеется и в публикациях других авторов (за подробностями мы отсылаем читателя к работе [Данилов и Константинова, 2019]). Здесь упомянем лишь недавнюю работу De Naro Barbas and Elias [2019], в которой несоответствие изменения индекса  $F10.7$  и ультрафиолетового излучения Солнца (EUV) рассматривалось как одно из наиболее вероятных объяснений поведения  $foF2$  в течение 24-го цикла СА.

В данной работе была поставлена задача проверить, как указанные особенности изменения солнечной активности в период смены 23/24 циклов и в 24-м цикле СА сказались на изменении высоты ионосферного слоя  $F2$ ,  $hmF2$ .

## 2 ИЗМЕНЕНИЕ СО ВРЕМЕНЕМ $hmF2$

Мы проанализировали результаты измерений  $hmF2$  на станции Juliusruh за тот же период с 1957(1958) по 2018 гг., за который анализировались данные по  $foF2$  в двух указанных выше предыдущих работах. Как и в указанных работах, мы рассматривали три месяца (январь, февраль и март) и три момента местного времени (1000, 1200 и 1400 LT), для которых в наших более ранних работах были получены наиболее выразительные отрицательные тренды  $foF2$  в суточных и сезонных вариациях этих трендов. Величины  $hmF2$  рассчитывались на основании величин M3000 методом Шимазакки [Shimazaki, 1955]. Мы применили к анализу величин  $hmF2$  тот же метод, что использовался нами в течение многих лет для анализа трендов параметров ионосферных слоев. Так же, как и в двух предыдущих работах, мы использовали индекс  $F10.7sm12$ , сглаженный за 12 месяцев, аналогично индексу R12, используемому в модели IRI [Bilitsa, 1990].

Следуя процедуре двух предыдущих работ, мы первоначально построили изменение величины  $\Delta hmF2$ , характеризующей изменение  $hmF2$  в текущий период по сравнению с "эталонным" периодом 1958-1980 гг., используя индекс  $F10.7sm12$  безо всякой коррекции. Результаты оказались качественно подобны результатам, полученным по  $foF2$ . Примеры изменения  $\Delta hmF2$  для 1200 LT в феврале и 1400 LT в марте приведены на рис 1.

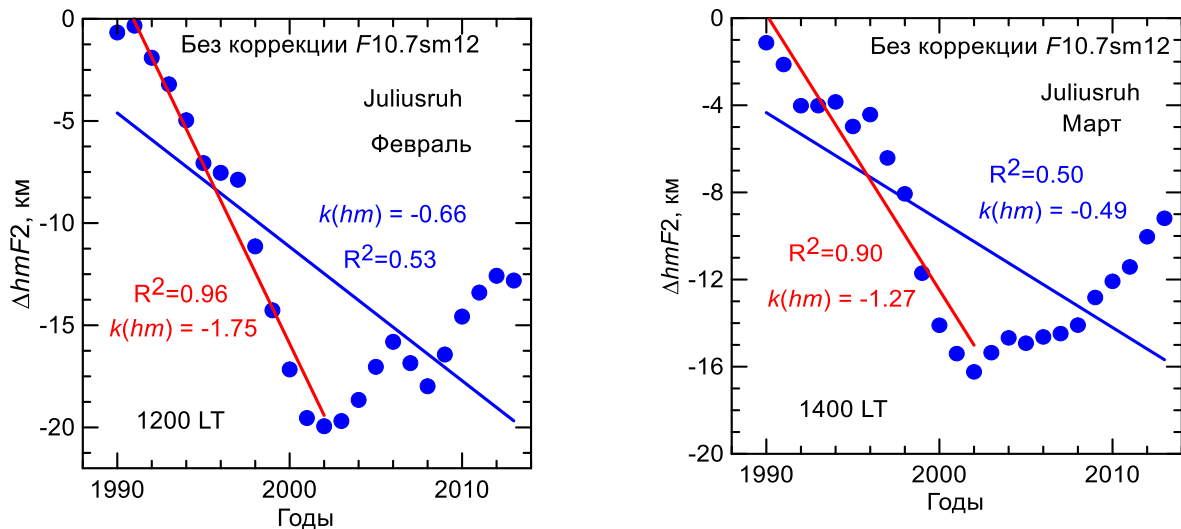


Рис. 1. Примеры изменения  $\Delta hmF2$  по данным станции Juliusruh в 1200 LT в феврале и в 1400 LT в марте.

Как следует из рис. 1, в случае  $hmF2$  наблюдается та же картина изменения тренда  $hmF2$  ( $k(hm)$ ) со временем: до 2002-2003 гг. как и в случае  $foF2$  (см. рис. 2 в работе Данилова и Константиновой (2019)). Мы имеем хорошо выраженный отрицательный тренд с высокой статистической значимостью (коэффициент определенности  $R^2 = 0.96$  и  $0.90$ ). После 2002-2003 гг. уменьшение  $\Delta hmF2$  прекращается и наблюдается его рост. Если рассматривать все годы на рис. 1, то в обоих случаях получается падение  $\Delta hmF2$  (синяя линия), но она соответствует гораздо более низкому тренду при гораздо более низких величинах  $R^2$ .

Поскольку, как и в случае  $foF2$ , такое поведение  $\Delta hmF2$  представляется нам нереальным и противоречащим текущей ситуации с увеличением количества  $CO_2$  и усилением оседания и охлаждения верхней атмосферы, мы провели с величинами  $hmF2$  ту же процедуру, что и с  $foF2$  в двух предыдущих работах. Мы использовали для 24-го цикла величины  $F10.7sm12$ , скорректированные по величинам индексов  $Rz$  и  $Ly$ , измеренным в этом цикле. Более подробно процедура корректировки описана в работах [Данилов и Константинова, 2019; Danilov and Konstantinova, 2019].

Результаты анализа данных по  $hmF2$  оказались качественно подобны результатам по  $foF2$ . До 2002-2003 гг. наблюдается хорошо выраженный отрицательный тренд с высокой статистической значимостью, а затем падение  $\Delta hmF2$  нарушается (наступает «смутный» период по терминологии двух предыдущих работ). И лишь в последние 4-6 лет вновь появляется тенденция уменьшения  $\Delta hmF2$  со временем, дающая отрицательный тренд  $hmF2$ . Наиболее яркий пример такого поведения  $\Delta hmF2$  приведен на рис. 2 для 1200 LT в феврале при корректировке величин  $F10.7sm12$  индексами  $Rz$  и  $Ly$ . На рисунке 2 и следующих рисунках красным показана аппроксимация точек до 2002-2003 гг., а также соответствующие величины тренда в единицах км/год и коэффициента определенности  $R^2$ . Зеленый и синий цвета соответствует тем же величинам для последнего периода и для аппроксимации всех точек, соответственно.

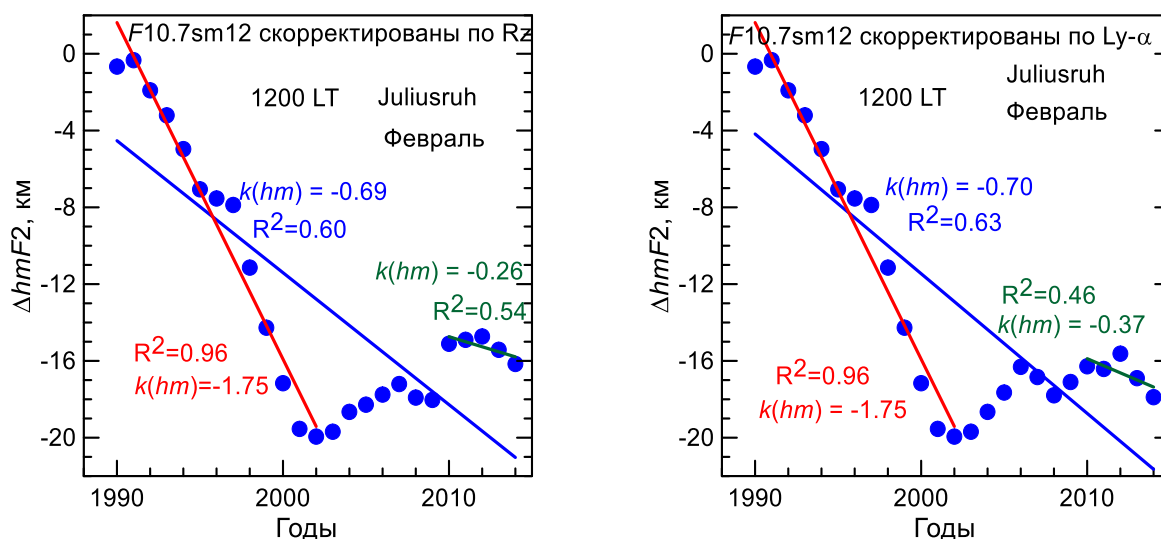


Рис. 2. Изменение  $\Delta hmF2$  со временем (Февраль, 1200 LT) при корректировке индекса  $F10.7sm12$  индексами  $Rz$  и  $Ly$ .

Как видно из рис. 2, до примерно 2002 г. в обеих ситуациях наблюдается хорошо выраженный отрицательный тренд ( $-1.75$  км в год), затем в течение «смутного» периода поведение  $\Delta hmF2$  носит достаточно хаотичный характер и лишь в последние несколько лет вновь намечается тенденция отрицательного тренда. В этом отношении картина близка к тому, что наблюдается для поведения величин  $\Delta foF2$  (см. соответствующие рисунки в работах [Данилов и Константинова, 2019; Danilov and Konstantinova, 2019]).

Во всех 18 рассмотренных ситуациях (3 месяца, 3 момента LT и два корректирующих параметра) указанный эффект присутствует и хорошо выражен в 14 случаях. Для полноты иллюстрации на рис. 3 приводится картина, аналогичная рис. 2, но для 1200 в Марте.

В 4 случаях из 18 эффект «смутного» периода выражен не так четко, как на рис. 2 и 3. Пример для 1000 LT в марте и январе приведен на рис. 4. Как видно из рис. 4, там эффект «смутного» периода только намечается в виде небольшого отклонения точек  $\Delta hmF2$  от хорошо выраженного хода до 2002-2003 гг. Отрицательный тренд после 2007-2008 гг. выражен лучше, чем на рисунках 2 и 3. Он больше по абсолютной величине и более значим статистически ( $R^2$  равен 0.84 и 0.95). При этом аппроксимация по всем точкам дает отрицательный тренд с высокой статистической значимостью, близкий по величине к тренду, получаемому до 2002-2003 гг.

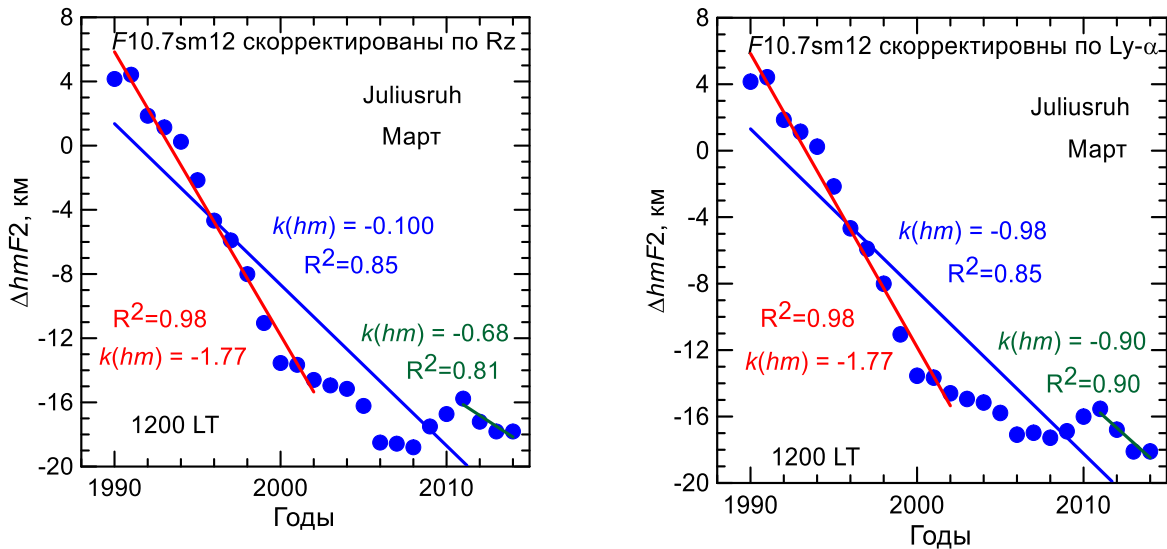


Рис. 3. Изменение  $\Delta hmF2$  со временем (Март, 1200 LT) при корректировке индекса  $F10.7sm12$  индексами  $Rz$  и  $Ly$ .

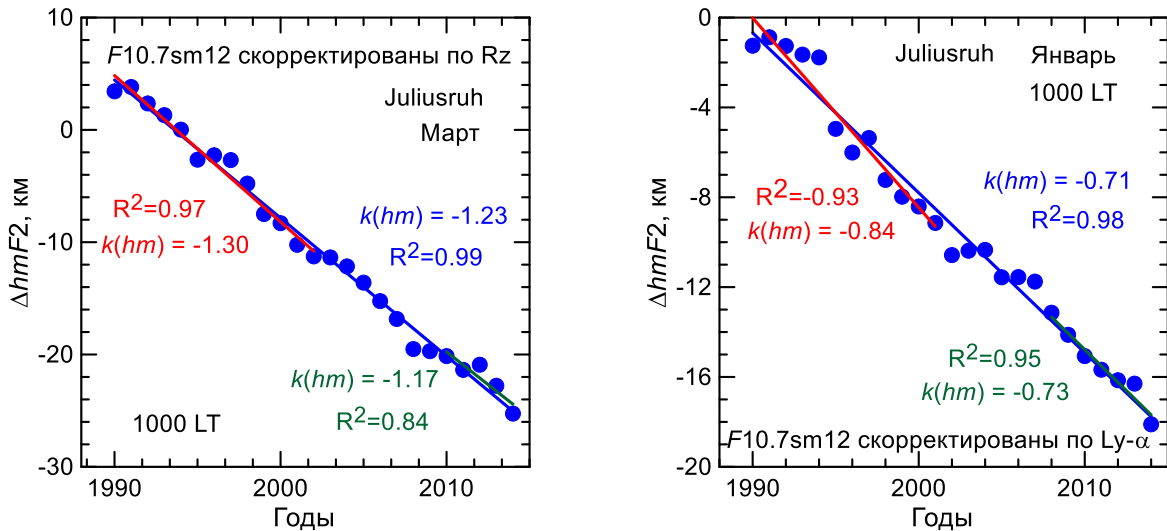


Рис. 4. Изменение  $\Delta hmF2$  со временем (март, 1000 LT и январь, 1000 LT) при корректировке индекса  $F10.7sm12$  индексами  $Rz$  и  $Ly$ .

### 3 ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ данных по  $hmF2$  на станции Juliusruh за период 1957-2018 гг. показывает, что эффект «смутного периода» между 2002-2003 и 2007-2008 гг., который был обнаружен в предыдущих статьях авторов в критической частоте, проявляется и в поведении высоты слоя  $F2$ . Для обоих параметров наблюдается хорошо выраженный отрицательный тренд с высокой статистической значимостью до 2002-2003 гг., а затем на несколько лет этот ход нарушается и наблюдается хаотический характер поведения  $\Delta foF2$  и  $\Delta hmF2$  со временем. В конце анализируемого интервала отрицательный тренд обоих параметров восстанавливается. Для  $foF2$  это восстановление выражено лучше, чем для  $hmF2$ .

В предыдущих публикациях мы высказали предположение, что хаотический характер поведения  $foF2$  время «смутного периода» связан со спецификой очень низкого минимума солнечной активности 2008-2009-гг. На эту специфику обращали внимание многие исследователи (за ссылками мы отсылаем читателя к работам [Данилов и Константинова, 2019; Danilov and Konstantinova, 2019]). Предполагается, что это связано с особенностями поведения EUV в период 23/24 минимума. Полученные нами результаты по поведению  $foF2$  и  $hmF2$  в «смутный период» косвенно

подтверждают это предположение. Тот факт, что хаотичный характер изменения в течение этого периода для  $\Delta foF2$  выражен сильнее, чем для  $\Delta hmF2$ , соответствует тому факту, что критическая частота прямо зависит от EUV (через скорость ионизации), тогда как высота слоя зависит опосредованно через вызванное изменением EUV изменение температуры термосферы. В этом случае более слабая реакция  $hmF2$  на особенности поведения EUV в течение «смутного периода» вполне понятна.

Важным выводом двух предыдущих работ и настоящего исследования является то, что индекс SA  $F10.7$  не годится для описания поведения параметров ионосферного слоя  $F2$  и, возможно, других ионосферных параметров в период 24-го цикла SA. Насколько восстановится «нормальная» связь этого индекса с  $foF2$  и  $hmF2$  в 25-м цикле, можно будет сказать лишь через 5-6 лет.

Важным является также и заключение о том, что при корректировке индекса  $F10.7$  с помощью других индексов SA, более тесно связанных с изменением солнечного ультрафиолета, после «смутного периода» продолжают отрицательные тренды как  $foF2$ , так и  $hmF2$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- Данилов А. Д., Константинова А. В. Вариации трендов foF2 с сезоном и временем суток // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015, том 55, № 1, с. 56–63.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Тренды foF2 и 24-й цикл солнечной активности // Гелиогеофизические исследования выпуск 23, с. 40-43, 2019
- Bilitza, D., 1990. International Reference Ionosphere 1990, National Space Science Data Center, NSSDC 90-92, Greenbelt, Maryland.
- Danilov A. D., Konstantinova A. V. Trends in foF2 and the 24th solar activity cycle // Adv. Space Res. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.10.038>
- de Haro Barbas, B.F., Elias, A.G., 2019. Effect of the inclusion of solar cycle 24 in the calculation of foF2 long-term trend for two Japanese ionospheric stations. Geophys. Pure Appl. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02307>.
- Laštovicka 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.
- Shimazaki T. World wide daily variations in the height of the maximum electron density in the ionospheric F2 layer // J. Radio Res. Labs. (Japan), V. 2. P. 85–97. 1955.

## TRENDS $hmF2$ AND THE 24TH CYCLE OF SOLAR ACTIVITY

A.V. Konstantinova, A.D. Danilov

The measurements of the F2-layer height,  $hmF2$ , at Juliusruh station during 1958-2018 are analyzed by the method developed by the authors earlier and used to determine long-term trends in parameters of the F2 layer. It is found that, in the same way as for the behavior of the critical frequency described by the authors in the two previous publications, peculiarities in the  $hmF2$  behavior are observed after 2002-2003. If the solar activity index  $F10.7$  is used, an increase in the  $\Delta hmF2$  value is observed and provides a positive trend in  $hmF2$  that contradicts to the available ideas on the continuing process of cooling and contraction of the upper atmosphere. If the  $F10.7$  index corrected by other SA indices (the sunspot number  $Rz$  and the Lyman-alpha line intensity) is used, as it has been done for the  $foF2$  trends in the two previous publications by the authors, the picture of changes in the  $hmF2$  trends is obtained similarly to the changes in the  $foF2$  trends. A well pronounced negative trend in  $hmF2$  is observed to 2002-2003, and then it is substituted by a chaotic change in  $\Delta hmF2$  in the “vague” period, whereas during the last analyzed years it becomes negative again.

**KEYWORDS:** F2-LAYER HEIGHT, LONG-TERM TRENDS, 24TH SA CYCLE