

РАЗДЕЛ
ДИСКУССИИ

УДК 550.388.2

СРАВНЕНИЕ ТРЕНДОВ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ F_2 © 2024 г. А. Д. Данилов¹, *, А. В. Константинова¹¹Институт прикладной геофизики им. Е.К. Фёдорова Росгидромета (ИПГ Росгидромета), Москва, Россия

*e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 03.05.2024 г.

После доработки 21.05.2024 г.

Принята к публикации 23.05.2024 г.

Приводятся и сравниваются между собой оценки долговременных изменений параметров ионосферного слоя F_2 : приведенная толщина, полное содержание электронов, высота и максимальная концентрация. Показано, что эти оценки согласуются между собой и показывают, что и foF_2 , и hmF_2 уменьшаются в последние десятилетия.

DOI: 10.31857/S0016794024050128, EDN: QPOKFB

Проблема долговременных изменений (трендов) параметров ионосферного слоя F_2 хорошо известна и ей посвящено много публикаций. Авторы неоднократно публиковали результаты своих определений трендов критической частоты и высоты слоя F_2 (см. недавние работы Данилова и др. [2024а, б]). Цель данной работы показать, как наши результаты согласуются с результатами оценок трендов двух других параметров слоя F_2 — полного содержания электронов ТЕС и приведенной толщины (slab thickness) ионосферного слоя F_2 , ST.

Существует несколько экспериментальных оценок скорости изменения со временем (тренда) ST. Эти данные получены разными методами на основании наблюдений полного содержания электронов в ионосфере ТЕС или моделей. Вот краткая сводка этих измерений из работы большей группы авторов [Elias et al., 2024]:

–7.6 км/год (SWACI ТЕС, Jakowski et al. [2017]),

–9.4 км/год (CODE ТЕС, Jakowski et al. [2017]),

–5.1 км/год (SPIDR, Jakowski et al. [2017]),

–5.2 км/год (Pignalberi et al., [2022]).

Примем для простоты на основании этих данных, что производная по времени величины приведенной толщины (ST) $d(ST)/dt = -6$ км/год. На основании тех же работ можно принять, что сама величина ST составляет примерно 300 км. В этом случае $[d(ST)/dt]/ST = -0.02$ в год.

По определению

$$ST = TEC / NmF_2. \quad (1)$$

Путем несложных преобразований легко получить

$$\begin{aligned} [d(ST)/dt]/ST &= \\ &= [d(TEC)/dt]/TEC - [d(NmF_2)/dt]/NmF_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно нашим исследованиям (см., например, Данилов и др. [2024а]) величина тренда критической частоты в периоды, когда изменение foF_2 происходит сильнее всего (зимние месяцы, дневные часы суток), составляет около -0.05 МГц в год. Если принять среднюю величину foF_2 равной 8 МГц, мы получим $[d(foF_2)/dt]/foF_2 = -0.006$ в год.

Поскольку NmF_2 пропорциональна $(foF_2)^2$, $[d(NmF_2)/dt]/NmF_2 = -0.012$ в год.

Возвращаясь к формуле (2), мы получаем

$$-0.02 = [d(TEC)/dt]/TEC + 0.012. \quad (3)$$

Это означает, что $[d(TEC)/dt]/TEC = -0.032$, т.е. полное содержание электронов ТЕС уменьшается примерно на 3% в год.

В нашем обзоре [Данилов и Константинова, 2020] рассматривались, в том числе, и работы многих авторов по определению трендов ТЕС. Хотя в результатах этих работ нет полного согласия, в большинстве исследований получены отрицательные тренды ТЕС. Так, согласно работе Emmert et al. [2017] изменение ТЕС между двумя соседними минимумами солнечной активности составляет $-19.3\% \pm 1\%$. Если это так, то, принимая период между минимумами, равным 11 годам, мы получаем тренд ТЕС, равный -1.8%

в год. Учитывая приближенный характер наших оценок, эта величина близка к величине, полученной нами выше из данных о трендах ST и $foF2$ (-3% в год).

В недавней работе [Данилов и др., 2024б] анализировались тренды высоты слоя $F2$ $hmF2$ по измерениям на двух ионосферных станциях. Были подробно исследованы суточные и сезонные вариации этих трендов. Опуская детали, можно утверждать согласно этим результатам, что величина $hmF2$ в течение последних десятилетий уменьшалась на $0.6\text{--}1.0$ км в год.

Если такое систематическое уменьшение величины $hmF2$ действительно существует, величины ТЕС должны неизбежно уменьшаться, поскольку это означает, что весь слой $F2$ опускается на высоты с более высоким содержанием молекул, а значит — с более высокой скоростью рекомбинации. В этом случае также неизбежно должны уменьшаться величины электронной концентрации на каждой высоте и, как следствие, — величины ТЕС.

Таким образом, наши оценки трендов высоты слоя $F2$ приводят к выводу о неизбежности наличия отрицательных трендов критической частоты слоя и полного содержания электронов. Именно такие тренды и получены нами ранее на основании данных вертикального зондирования (отрицательные тренды $foF2$). Приведенные выше оценки трендов ТЕС, основанные на опубликованных трендах полутолщины слоя $F2$, также дают отрицательные тренды.

Основной вывод этой работы таков: четыре группы независимых экспериментальных данных о параметрах слоя $F2$ ($foF2$, $hmF2$, ТЕС и ST) дают взаимно согласующиеся указания на отрицательные тренды этих параметров. Это является дополнительным подтверждением нашей концепции

отрицательных трендов $foF2$ и $hmF2$, опубликованной в ряде работ (см. Данилов и др. [2024а, б]). Стоит подчеркнуть, что все рассмотренные данные получены для средних широт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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. <https://doi.org/10.31857/S0016794020040045>
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Тренды критической частоты $foF2$ по данным станций северного и южного полушарий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 3. С. 387–400. 2024а.
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Долговременные тренды высоты максимума ионосферного слоя $F2$ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 4. С. 489–502. 2024б.
- Elias A., Alberti T., Bravo M. et al. Long-term trends in the ionospheric equivalent slab thickness: Some evidences by Working Team #1 within IAGA WGII-F / Paper presented at the 12th International Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 6–10 May 2024, Ourense, Galicia, Spain.
- Emmert J.T., Mannucci A.J., McDonald S.E., Vergados P. Attribution of interminimum changes in global and hemispheric total electron content // J. Geophys. Res. — Space. V. 122. № 2. P. 2424–2439. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016JA023680>
- Jakowski N., Hoque M.M., Mielich J., Hall C. Equivalent slab thickness of the ionosphere over Europe as an indicator of long-term temperature changes in the thermosphere // J. Atmos. Sol. — Terr. Phys. V. 163. P. 91–102. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.04.008>
- Pignalberi A., Pietrella M., Pezzopane M., Nava B., Cesaroni C. The ionospheric equivalent slab thickness: A review supported by a global climatological study over two solar cycles // Space Sci. Rev. V. 218. № 4. ID 37. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11214-022-00909-z>

Comparison of Trends in Various Parameters of the $F2$ Layer

A. D. Danilov¹*, A. V. Konstantinova¹

¹*Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia*

*e-mail: adanilov99@mail.ru

Estimates of the long-term changes in the ionospheric $F2$ -layer parameters (slab thickness, total electron content, height, and maximal electron concentration) are presented and mutually compared. It is shown that these estimates mutually agree and show that both $foF2$ and $hmF2$ are decreasing during the recent decades.