

УДК 550.388.2

# ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ИОНОСФЕРНЫХ ИНДЕКСОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2024 г. М. Г. Деминов\*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),  
Москва, Троицк, Россия

\*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 05.06.2024 г.

После доработки 18.07.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Представлены результаты выделения трендов средних за год ионосферных индексов  $\Delta IG$  и  $\Delta T$ , которые получены после исключения из  $IG$  и  $T$  зависимости этих индексов от средних за год индексов солнечной активности. Индексами солнечной активности были  $F10$ ,  $Ly-\alpha$  и  $MgII$  – потоки излучения Солнца на 10.7 см, в линии Лайман-альфа водорода (121.567 нм) и отношение центральной части к флангам в полосе излучения магния 276–284 нм. Рассмотрены два интервала времени (в годах) 1980–2012 и 2013–2023. Получено, что для интервала 1980–2012 все анализируемые линейные тренды были отрицательны, т.е. величины  $\Delta IG$  и  $\Delta T$  уменьшались со временем. Они были очень слабыми и незначимыми. Флуктуации  $\Delta IG$  и  $\Delta T$  относительно трендов для  $Ly-\alpha$  были почти вдвое больше, чем для  $F10$  и  $MgII$ . В интервале 2013–2023 все анализируемые линейные тренды усилились и стали значимыми, т.е. увеличилась скорость уменьшения  $\Delta IG$  и  $\Delta T$  со временем. Для  $MgII$  эта скорость была почти в два раза больше, чем для  $F10$ . Для интервала 2013–2023 индекс  $MgII$  завышал вклад солнечного излучения в ионосферные индексы, особенно в фазу роста солнечного цикла 25, который начался в конце 2019 г. В результате, в фазу роста солнечного цикла 25 индекс  $F10$  стал более адекватным, чем  $MgII$ , индикатором солнечной активности для ионосферных индексов. В интервале 1980–2012 индексы  $F10$  и  $MgII$  изменялись почти синхронно. Фаза роста солнечного цикла 25 стала первым случаем нарушения этой синхронности за весь период измерения  $MgII$ .

DOI: 10.31857/S0016794024060051, EDN: QOOKKX

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Долговременные изменения (тренды) критической частоты ионосферного слоя  $F2$ ,  $foF2$ , анализировались неоднократно как один из возможных индикаторов изменения климата средней и верхней атмосферы (см., например, недавние обзоры [Данилов и Константинова, 2020; Laštovička, 2022]).

Для выделения таких изменений необходимо учесть гораздо более сильные зависимости  $foF2$  от крайнего ультрафиолетового (EUV) излучения Солнца как источника ионизации и нагрева термосферы. В качестве индикатора EUV-излучения Солнца используют индексы солнечной активности  $F10$ ,  $F30$ ,  $Ly-\alpha$  и  $MgII$ , где  $F10$ ,  $F30$  и  $Ly-\alpha$  – потоки излучения Солнца на длинах волн 10.7, 30 см и 121.567 нм,  $MgII$  – отношение центральной части к периферии излучения в интервале 276–284 нм

с центром на 280 нм [Danilov and Berbeneva, 2023; Laštovička and Burešova, 2023; Laštovička, 2024].

Дополнительную косвенную информацию о трендах  $foF2$  можно получить на основе анализа ионосферных индексов солнечной активности  $IG$  и  $T$ . Индексы  $T$  и  $IG$  построены по экспериментальным данным медиан  $foF2$  ряда ионосферных станций для замены солнечных индексов в эмпирических моделях с целью обеспечения минимальных ошибок вычисления  $foF2$  по этим моделям [Liu et al., 1983; Caruana, 1990]. Индексы  $IG$  или  $T$  являются входным параметром модели IRI [Bilitza, 2018] для замены индекса  $Rz$  в уравнении для медианы  $foF2$

$$foF2 = a_0 + a_1 Rz, \quad (1)$$

где  $Rz$  – международное число солнечных пятен (прежняя версия, которая включает классический Цюрихский ряд данных),  $a_0$  и  $a_1$  – коэффи-

циенты, которые определяются на основе карт ITU-R для данного пункта, месяца года и мирового времени [Jones and Gallet, 1962, 1965]. Уравнение (1) позволяет получить глобальное распределение  $foF2$  для данного  $Rz$ , месяца года и мирового времени. Подстановка  $IG$  в уравнение (1) вместо  $Rz$  обычно дает более точное глобальное распределение медианы  $foF2$  для данного месяца данного года и мирового времени, поскольку ионосферные индексы основаны на измерениях  $foF2$  в эту дату. Учет зависимости  $IG$  от индекса солнечной активности, например  $F10$ , позволяет выделить тренд  $IG$ , который может служить косвенным индикатором изменения климата верхней атмосферы.

В предыдущей работе были выделены тренды ионосферных индексов  $IG$  и  $T$  после исключения их зависимостей от индексов солнечной активности  $F10$  и  $F30$  [Deminov, 2024]. Было получено, в том числе, что отрицательные тренды индексов  $IG$  и  $T$  усилились в последнее десятилетие. Причина такого свойства долговременных изменений ионосферных индексов остается неизвестной. Возможно, что дополнительный учет индексов солнечной активности  $Ly-\alpha$  и  $MgII$  позволит выделить особенности трендов ионосферных индексов в последнее десятилетие для разных индексов солнечной активности. Решение этой задачи было главной целью данной работы.

## 2. ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Исходными для анализа были средние за месяц ионосферные и солнечные индексы активности  $T$ ,  $IG$ ,  $F10$ ,  $Ly-\alpha$  и  $MgII$ . Индексы  $T$ ,  $IG$  и  $MgII$  являются безразмерными величинами, индекс  $F10$  измеряется в  $10^{-22} \text{Вт}/(\text{м}^2 \text{Гц})$ , индекс  $Ly-\alpha$  — в  $10^{15} \text{фотон}/(\text{м}^2 \text{с})$ . Индекс  $T$  построен по данным медиан  $foF2$  во все часы мирового времени для каждой из ионосферных станций, выбранных для анализа [Caruana, 1990]. Индекс  $IG$  построен по данным медиан  $foF2$  ионосферных станций в полдень [Liu et al., 1983]. Наборы ионосферных станций, использованных для вычисления  $T$  и  $IG$ , не совпадают. По этой причине для одинаковых условий индексы  $T$  и  $IG$  могут различаться, но обычно их отличие незначительно.

Индекс  $Ly-\alpha$  получен по данным измерений излучения в линии Лайман-альфа водорода (121.167 нм) на нескольких спутниках, которые были откалиброваны по наиболее надежным из этих данных. Кроме того, для периодов отсутствия измерений  $Ly-\alpha$  индекс  $Ly-\alpha$  был получен на основе уравнений регрессии, отражающих связь  $Ly-\alpha$  с  $F10$ ,  $F30$  или  $MgII$ . Следовательно,

данные индекса  $Ly-\alpha$  для больших интервалов времени являются составными (композитными) данными. Ниже использована версия 4 таких композитных данных  $Ly-\alpha$  [Machol et al., 2019]. В этой версии есть данные об индексе  $Ly-\alpha$  с 1947 г. по настоящее время, но измерения  $Ly-\alpha$  начались с середины 1977 г. Здесь использованы средние за месяц значения  $Ly-\alpha$  в интервале 01.1979–03.2024, где указаны месяц года и год. Отметим, что в этом интервале есть период 04.1989–11.1991, для которого отсутствуют данные  $Ly-\alpha$  были заполнены данными  $MgII$  на основе уравнения регрессии  $Ly-\alpha$  с  $MgII$ .

Индекс  $MgII$  также получен по данным измерений на спутниках в полосе примерно 276–284 нм как отношение интенсивности излучения в центре этой полосы (280 нм) к ее флангам [Snow et al., 2019]. Данные индекса  $MgII$  также являются составными (композитными) данными. Они начинаются с 01.1979. Здесь использованы средние за месяц значения  $MgII$  в интервале 01.1979–03.2024.

По средним за месяц значениям индексов  $T$ ,  $IG$ ,  $F10$ ,  $Ly-\alpha$  и  $MgII$  были получены скользящие средние за год значения этих индексов ( $T_{12}$ ,  $IG_{12}$ ,  $F10_{12}$ ,  $Ly-\alpha_{12}$  и  $MgII_{12}$ ) для каждого месяца года в интервале 01.1980–09.2023. Интервал 01.1980–12.2010 был выбран в качестве эталонного интервала, для которого определялись корреляционные связи между ионосферными и солнечными индексами активности. Для этого интервала корреляция между индексами  $T_{12}$  и  $IG_{12}$  почти полная:

$$T_{12} = 4.0 + 0.947 IG_{12} \pm 2.1 \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции  $K = 0.9993$ . Корреляция между индексами  $Ly-\alpha_{12}$  и  $MgII_{12}$  также достаточно высокая:

$$Ly - \alpha_{12} = -13.4 + 113.7 MgII \pm 0.08 \quad (3)$$

с коэффициентом корреляции  $K = 0.993$ .

Для выделения трендов ионосферных индексов  $IG_{12}$  и  $T_{12}$  необходимо исключить зависимости этих индексов от солнечной активности, в данном случае, от индексов  $MgII_{12}$ ,  $Ly-\alpha_{12}$  или  $F10_{12}$  с помощью уравнений регрессии

$$Y_{\text{mod}}(X) = b_0 + b_1 X + b_2 X^2, \quad (4)$$

где  $Y$  равно  $IG_{12}$  или  $T_{12}$ ,  $X$  равно  $MgII_{12}$ ,  $Ly-\alpha_{12}$  или  $F10_{12}$ . Ионосферный индекс, вычисленный по уравнению (4), является моделью этого индекса. Он обозначен через  $Y_{\text{mod}}(X)$ . Для определения коэффициентов уравнений регрессии  $b_j$  использованы данные об анализируемых индексах активности за 1980–2010 гг. Для оценки точности этих моделей в табл. 1 приведены коэффициенты кор-

**Таблица 1.** Стандартные отклонения  $\sigma$  и коэффициенты корреляции  $K$  уравнений регрессии (4) по данным об ионосферных индексах солнечной активности и солнечных индексах этой активности за 1980–2010 гг.

$Y \setminus X$	$MgII_{12}$		$Ly-\alpha_{12}$		$F10_{12}$	
	$\sigma$	$K$	$\sigma$	$K$	$\sigma$	$K$
$IG_{12}$	4.3	0.997	6.9	0.993	4.5	0.997
$T_{12}$	3.5	0.998	6.9	0.992	3.6	0.998

реляции  $K$  и стандартные отклонения  $\sigma$  измеренных значений  $Y$  от  $Y_{\text{mod}}$ . Из табл. 1 видно, что точности моделей (4) достаточно высокие. Тем не менее, зависимости  $IG_{12}$  и  $T_{12}$  от  $MgII_{12}$  и  $F10_{12}$  точнее зависимостей ионосферных индексов от  $Ly-\alpha_{12}$ . Для большей наглядности некоторые из этих зависимостей приведены на рис. 1. Из данных на этом рисунке видно, что полиномы второй степени являются достаточно точными аппроксимациями этих зависимостей.

### 3. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ИОНОСФЕРНЫХ ИНДЕКСОВ

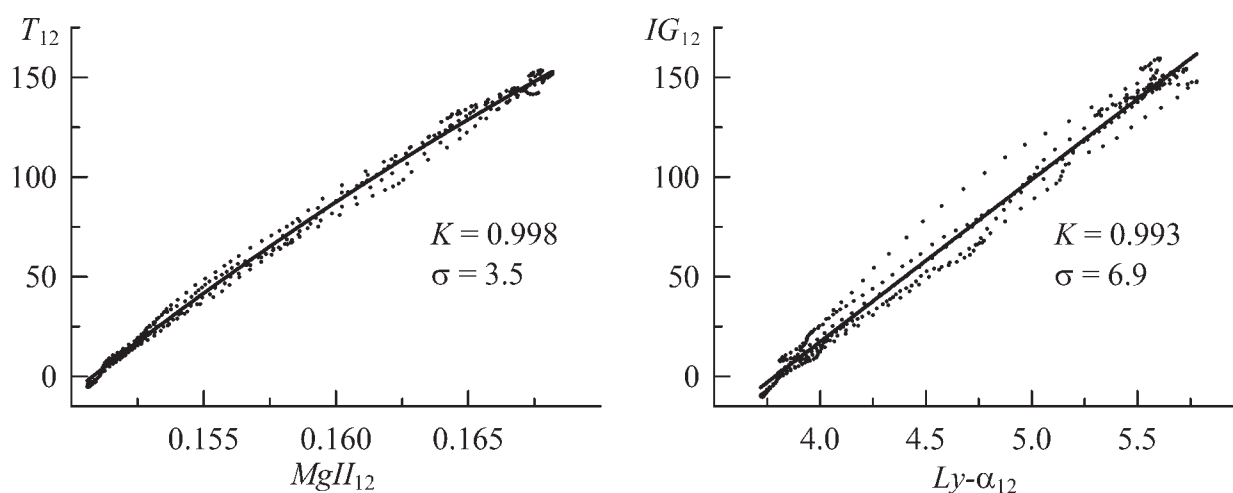
На предыдущем этапе были получены модели  $Y_{\text{mod}}(X)$ . Они определяются зависимостью ионосферного индекса  $Y_{\text{mod}}$  от солнечного индекса  $X$  по уравнению регрессии (4). Это позволяет найти долговременные тренды индексов  $Y$  с помощью уравнений регрессии, которые в линейном приближении имеют вид:

$$\Delta Y(X) = Y - Y_{\text{mod}}(X) = c_0 + c_1 t, \quad (5)$$

где  $t$  — время в годах,  $c_0$  и  $c_1$  — коэффициенты уравнения регрессии, величины  $Y$  и  $Y_{\text{mod}}(X)$  — скользящие средние за год значения ионосферного индекса по данным измерений и по модели, которые центрированы на данный месяц года. Ионосферные индексы являются безразмерными величинами. Поэтому коэффициент  $c_1$  имеет размерность 1/год. Он дает скорость изменения ионосферного индекса  $Y$  со временем, из которого исключена сильная зависимость  $Y$  от солнечной активности с помощью уравнения регрессии  $Y_{\text{mod}}(X)$ .

Одной из целей данной работы было оценить особенности трендов ионосферных индексов в последнее десятилетие. Поэтому тренды ионосферных индексов оценивались для интервалов 1980–2012 и 2013–2023 гг.

В табл. 2 приведены параметры уравнений регрессии (5) для этих интервалов. Из данных в таблице 2 следует, что все анализируемые тренды являются отрицательными ( $c_1 < 0$ ). Для интервала 1980–2012 они не значимы (коэффициенты корреляции  $K$  изменяются в пределах 0.01–0.23) с сильными флуктуациями ( $\Delta Y(Ly-\alpha_{12})$  относительно трендов ( $\sigma = 6.5 \pm 0.1$ ). Для интервала 2013–2023 все анализируемые тренды значимы, т.е. они отрицательны и усиливаются при переходе от интервала 1980–2012 к интервалу 2013–2023 гг. Самые сильные ( $c_1 = -2.78$ ) и слабые ( $c_1 = -1.42$ ) из этих трендов в интервале 2013–2023 наблюдаются для  $\Delta IG_{12}(MgII_{12})$  и  $\Delta T_{12}(F10_{12})$ . Тренды  $\Delta IG_{12}(X)$  и  $\Delta T_{12}(X)$  для совпадающих индексов  $X$



**Рис. 1.** Зависимости ионосферных индексов  $T_{12}$  и  $IG_{12}$  от солнечных индексов активности  $MgII_{12}$  и  $Ly-\alpha_{12}$  по данным измерений и уравнениям регрессии (4) — точки и сплошные линии;  $K$  и  $\sigma$  — коэффициенты корреляции и стандартные отклонения этих уравнений.

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции  $K$ , стандартные отклонения  $\sigma$  и коэффициенты  $c_1$  (в 1/год) уравнений регрессии (5) по данным измерений ионосферных ( $IG_{12}$ ,  $T_{12}$ ) и солнечных ( $MgII_{12}$ ,  $Ly-\alpha_{12}$ ,  $F10_{12}$ ) индексов за 1980–2012 и 2013–2023 гг.

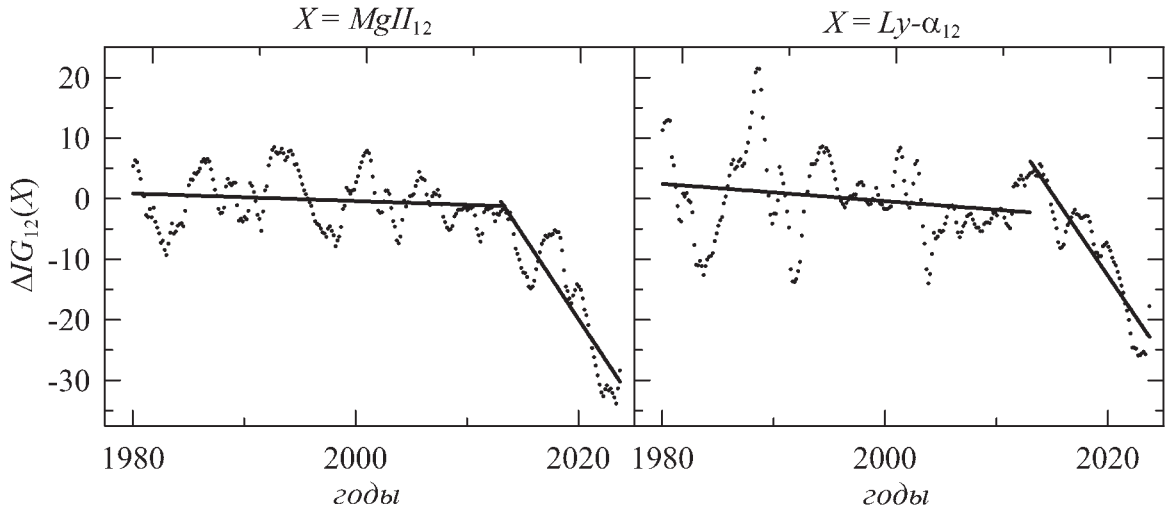
$\Delta Y \backslash X$	$MgII_{12}$			$Ly-\alpha_{12}$			$F10_{12}$		
	$c_1$	$\sigma$	$K$	$c_1$	$\sigma$	$K$	$c_1$	$\sigma$	$K$
	1980–2012								
$IG_{12}$	–0.06	4.3	0.14	–0.14	6.6	0.20	–0.11	4.3	0.23
$T_{12}$	–0.004	3.5	0.01	–0.08	6.4	0.13	–0.004	3.5	0.12
	2013–2023								
$IG_{12}$	–2.78	4.8	0.88	–2.71	4.6	0.92	–1.45	3.0	0.83
$T_{12}$	–2.74	3.1	0.94	–2.66	2.1	0.97	–1.42	3.7	0.77

отличаются слабо, тем не менее, отрицательные тренды  $\Delta IG_{12}(X)$  немного сильнее трендов  $\Delta T_{12}(X)$ .

Более наглядно о характере изменений  $\Delta Y(X)$  со временем можно судить по данным на рис. 2 и рис. 3. Из данных на этих рисунках можно видеть, что разброс данных относительно линейных трендов действительно большой. Этот разброс особенно большой для  $\Delta Y(Ly-\alpha_{12})$ , включая интервал 1989–1991, когда прямые измерения  $Ly-\alpha$  отсутствовали и были заполнены данными  $MgII$  на основе уравнения регрессии между  $Ly-\alpha$  и  $MgII$  [Machol et al., 2019]. Относительно большие значения стандартных отклонений  $\sigma$  для  $\Delta Y(Ly-\alpha_{12})$

в интервале 1980–2012 связаны с этой же причиной (см. таблицу 2). Отметим, что на рисунках 2 и 3 не видно особенно сильных флуктуаций  $\Delta Y(MgII_{12})$  для интервала 1989–1991, в котором  $MgII$  использовался для заполнения отсутствующих данных  $Ly-\alpha$ .

Очень сильные отрицательные тренды  $\Delta Y(MgII_{12})$  в интервале 2013–2023 соответствуют определенным фазам солнечных циклов. Дополнительную информацию об особенностях изменений трендов с циклами солнечной активности можно получить на основе сопоставления изменений со временем ионосферных индексов  $Y$  и моделей



**Рис. 2.** Изменения индекса  $\Delta IG_{12}(X)$  со временем в годах по экспериментальным данным (точки) и линейные интерполяции (тренды) этих данных – сплошные линии.



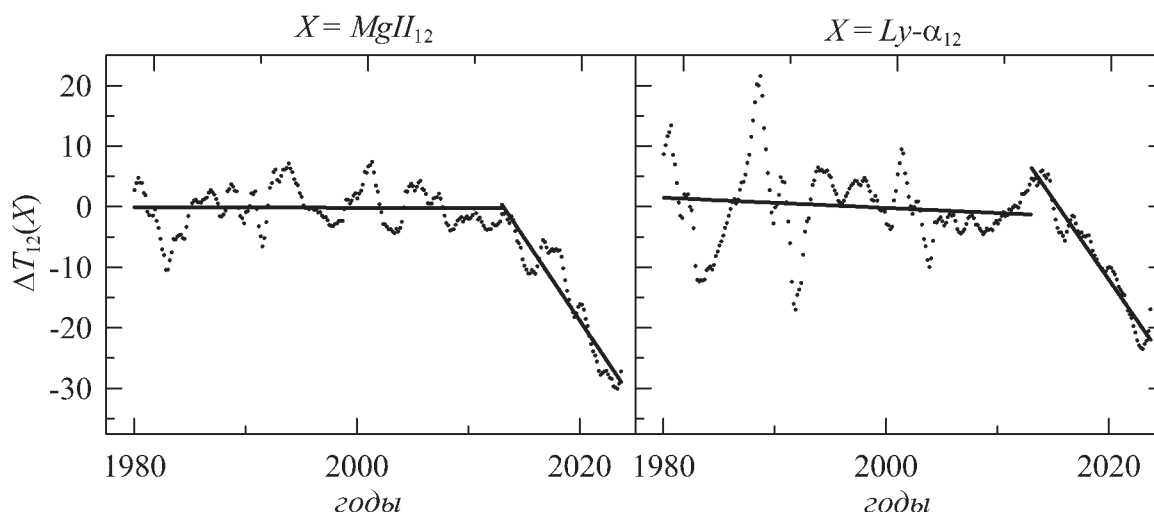


Рис. 3. Изменения индекса  $\Delta T_{12}(X)$  со временем в годах по экспериментальным данным (точки) и линейные интерполяции (тренды) этих данных — сплошные линии.

этих индексов  $Y_{\text{mod}}(X)$ . На рис. 4 показан пример такого сопоставления для индексов  $IG_{12}$ ,  $IG_{\text{mod}}(F10_{12})$  и  $IG_{\text{mod}}(MgII_{12})$ . Из этого рисунка видно, что интервал 2013–2023 соответствует фазе максимума и спада солнечного цикла 24 и фазе роста солнечного цикла 25. Считают, что цикл 25 начался в конце 2019 г. [Upton and Hathaway, 2023]. Из данных на этом рисунке можно видеть, что самые сильные отклонения  $IG_{\text{mod}}(MgII_{12})$  от  $IG_{12}$  происходили на фазе роста солнечного цикла 25, которые и привели сильному отрицательному тренду  $\Delta IG_{12}(MgII_{12}) = IG_{12} - IG_{\text{mod}}(MgII_{12})$ . Для этого периода отклонения  $IG_{\text{mod}}(F10_{12})$  от  $IG_{12}$  были относительно слабыми. Следовательно, индекс  $F10$  является более точным индикатором солнечной активности, чем  $MgII$ , для ионосферного индекса  $IG$  на фазе роста солнечного цикла

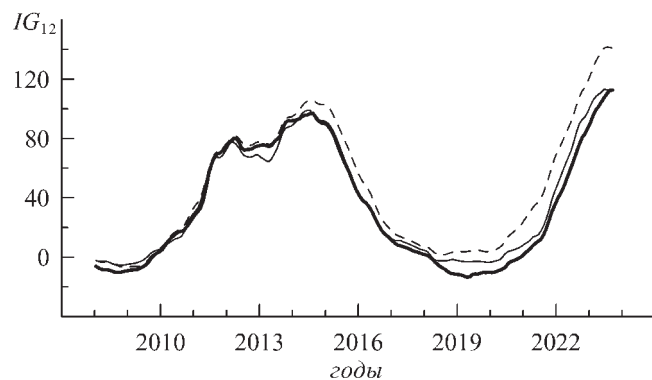


Рис. 4. Изменения со временем в годах индекса  $IG_{12}$  (толстая линия) и моделей этого индекса  $IG_{\text{mod}}(F10_{12})$  — тонкая линия и  $IG_{\text{mod}}(MgII_{12})$  — штриховая линия.

25. Данное утверждение справедливо и для ионосферного индекса  $T$ . Дополнительный анализ показал, что в интервале 1980–2013 величины  $IG_{\text{mod}}(MgII_{12})$  и  $IG_{\text{mod}}(F10_{12})$  изменялись почти синхронно и слабо отличались от  $IG_{12}$ , т.е. отмеченная выше особенность индекса  $MgII$  на фазе роста солнечного цикла 25 не наблюдалась за весь предыдущий период измерений этого индекса.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Ионосферные индексы  $T$  и  $IG$  получены по медианам  $foF2$  ряда ионосферных станций Северного и Южного полушарий. Поэтому они могут служить косвенными показателями средних изменений этой величины. Точность определения  $T$  и  $IG$  по данным  $foF2$  понижена при низкой солнечной активности. Это следует из уравнения (1):  $foF2$  почти не зависит от солнечной активности при выполнении условия  $a_0 > a_1 R_z$ . Поэтому, например, отклонения  $IG_{12}$  от  $IG_{\text{mod}}(MgII_{12})$  на рис. 4 при низкой солнечной активности (2019–2020) могут быть, по крайней мере, частично связаны с неточностью определения ионосферного индекса  $IG$ . Для фазы роста солнечного цикла 25 (после 2020 г.) вычисления ионосферных индексов по данным  $foF2$  более надежны. Это позволяет утверждать, что для фазы роста солнечного цикла 25 индекс  $MgII$  завышает вклад солнечной активности в ионосферный индекс  $IG$  и, по-видимому, в  $foF2$ . В данном случае, индекс  $IG$  позволил выделить интервал, для которого индекс  $MgII$  перестает быть адекватным индикатором солнечной активности для  $foF2$ . Это утверждение требует

независимой проверки, поскольку  $IG$  является косвенным индексом для  $foF2$ .

Целью данной работы было уточнить особенности трендов ионосферных индексов  $T$  и  $IG$  в последнее десятилетие на основе учета дополнительных индексов солнечной активности  $MgII$  и  $Ly-\alpha$ . Результат оказался неожиданным: для интервала 2013–2023 учет  $MgII$  или  $Ly-\alpha$  привел даже к более сильным отрицательным трендам ионосферных индексов, чем общепринятый индекс  $F10$ . Поэтому вопрос о причине усиления в последнее десятилетие отрицательных трендов ионосферных индексов и, тем более  $foF2$ , остается открытым. Возможно, что рассмотрение средних за месяц ионосферных и солнечных индексов позволит до некоторой степени решить эту задачу. Это требует специального рассмотрения, что выходит за рамки данной работы.

## 5. ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты выделения трендов средних за год ионосферных индексов  $\Delta IG$  и  $\Delta T$ , которые получены после исключения из  $IG$  и  $T$  зависимости этих индексов от средних за год индексов солнечной активности. Индексами солнечной активности были  $F10$ ,  $Ly-\alpha$  и  $MgII$  – потоки излучения Солнца на 10.7 см, в линии Лайман-альфа водорода (121.567 нм) и отношение центральной части к флангам в полосе излучения магния 276–284 нм. Рассмотрены два интервала времени (в годах) 1980–2012 и 2013–2023. Получены следующие выводы.

1. Для интервала 1980–2012 все анализируемые линейные тренды отрицательны, т.е. величины  $\Delta IG$  и  $\Delta T$  уменьшались со временем. Они были очень слабыми и незначимыми. Флуктуации  $\Delta IG$  и  $\Delta T$  относительно трендов для  $Ly-\alpha$  были почти вдвое больше, чем для  $F10$  и  $MgII$ .

2. Для интервала 2013–2023 все анализируемые линейные тренды усилились и стали значимыми, т.е. увеличилась скорость уменьшения  $\Delta IG$  и  $\Delta T$  со временем. Для  $MgII$  эта скорость была почти в два раза больше, чем для  $F10$ .

3. Для интервала 2013–2023 индекс  $MgII$  завышал вклад солнечного излучения в ионосферные индексы, особенно в фазу роста солнечного цикла 25, который начался в конце 2019 г. Это и привело к высоким значениям отрицательных трендов ионосферных индексов для  $MgII$  в данном интервале времени. Для  $F10$  такой тренд был гораздо меньше. В результате, в фазу роста солнечного цикла 25 индекс  $F10$  стал более адекватным, чем  $MgII$ , индикатором солнечной активности для ионосферных индексов.

4. В интервале 1980–2012 индексы  $F10$  и  $MgII$  изменялись почти синхронно. Фаза роста солнечного цикла 25 стала первым случаем нарушения этой синхронности за весь период измерения  $MgII$ .

## БЛАГОДАРНОСТИ

Данные об индексах солнечной активности были взяты с сайтов <http://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1> (WDC for Solar-Terrestrial Physics, UK), <ftp://seismo.nrcan.gc.ca/spaceweather> (Space Weather Canada), [www.sws.bom.gov.au/HF\\_Systems](http://www.sws.bom.gov.au/HF_Systems) (Space Weather Services, Australia), <https://lasp.colorado.edu/lisird> (LASP Interactive Solar Irradiance Datacenter, USA) 10.04.2024.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации по теме: “Изучение солнечной активности и физических процессов в системе Солнце–Земля” (№ 1021100714181-3).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## 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>
- Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere // Adv. Radio Sci. V. 16. P. 1–11. 2018. <https://doi.org/10.5194/ars-16-1-2018>
- Caruana J. The IPS monthly T index / Proc. Solar-Terrestrial Prediction Workshop. Leura, Australia. October 16–20, 1989. V. 2. Ed. R.J. Thompson. Boulder, CO: Environmental Research Lab. P. 257–263. 1990.
- Danilov A.D., Berbeneva N.A. Statistical analysis of the critical frequency  $foF2$  dependence on various solar activity indices // Adv. Space Res. V. 72. № 6. P. 2351–2361. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.05.012>
- Deminov M.G. Trends in ionospheric indices of solar activity // Geomagn. Aeron. (Engl. Transl.) V. 64. № 5. 2024.
- Jones W.B., Gallet R.M. The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods // Telecommun. J. V. 29. № 5. P. 129–149. 1962.
- Jones W.B., Gallet R.M. The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods. 2 // Telecommun. J. V. 32. № 1. P. 18–28. 1965.

- *Laštovička J.* Long-term changes in ionospheric climate in terms of  $foF2$  // *Atmosphere*. V. 13. № 1. ID 110. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13010110>
- *Laštovička J., Burešova D.* Relationships between  $foF2$  and various solar activity proxies // *Space Weather*. V. 21. № 4. ID e2022SW003359. 2023. <https://doi.org/10.1029/2022SW003359>
- *Laštovička J.* Dependence of long-term trends in  $foF2$  at middle latitudes on different solar activity proxies // *Adv. Space Res.* V. 73. № 1. P. 685–689. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.047>
- *Liu R., Smith P., King J.* A new solar index which leads to improved  $foF2$  predictions using the CCIR atlas // *Telecommun. J.* V. 50. № 8. P. 408–414. 1983.
- *Machol J., Snow M., Woodraska D., Woods T., Viereck R., Coddington O.* An improved Lyman-alpha composite // *Earth and Space Science*. V. 6. № 12. P. 2263–2272. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019EA000648>
- *Snow M., Machol J., Viereck R., Woods T., Weber M., Woodraska D., Elliott J.* A revised Magnesium II core-to-wing ratio from SORCE SOLSTICE // *Earth and Space Science*. V. 6. № 11. P. 2106–2114. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019EA000652>
- *Upton L.A., Hathaway D.H.* Solar cycle precursors and the outlook for cycle 25 // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 128. N 10. ID e2023JA031681. 2023. <https://doi.org/10.1029/2023JA031681>

## Long-Term Trends in Ionospheric Indices of Solar Activity

M. G. Deminov\*

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia*

\*e-mail: [deminov@izmiran.ru](mailto:deminov@izmiran.ru)

The results of identifying trends in the annual average ionospheric indices  $\Delta IG$  and  $\Delta T$  are presented, which were obtained after excluding from  $IG$  and  $T$  the dependence of these indices on the annual average solar activity indices. The solar activity indices were  $F10$ ,  $Ly-a$  and  $MgII$  – solar radiation fluxes at 10.7 cm, in the Lyman-alpha line of hydrogen (121.567 nm) and the ratio of the central part to the flanks in the magnesium emission band 276–284 nm. Two time intervals (in years), 1980–2012 and 2013–2023, are considered. It was found that for the interval 1980–2012 all analyzed linear trends were negative, i.e.  $\Delta IG$  and  $\Delta T$  values decreased over time. They were very weak and insignificant. Fluctuations of  $\Delta IG$  and  $\Delta T$  relative to trends for  $Ly-a$  were almost twice as large as for  $F10$  and  $MgII$ . In the interval 2013–2023, all analyzed linear trends intensified and became significant, i.e. the rate of decrease in  $\Delta IG$  and  $\Delta T$  over time increased. For  $MgII$  this rate was almost twice as high as for  $F10$ . For the interval 2013–2023, the  $MgII$  index overestimated the contribution of solar radiation to ionospheric indices, especially during the growth phase of solar cycle 25, which began at the end of 2019. As a result, in the growth phase of solar cycle 25, the  $F10$  index became a more adequate indicator of solar activity for ionospheric indices than  $MgII$ . In the interval 1980–2012, the  $F10$  and  $MgII$  indices changed almost synchronously. The growth phase of solar cycle 25 was the first time this synchrony was disrupted for the entire period of  $MgII$  measurements.