

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

*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 10.04.2024 г.

После доработки 22.04.2024 г.

Принята к публикации 23.05.2024 г.

Представлены первые результаты выделения трендов средних за год ионосферных индексов ΔIG_{12} и ΔT_{12} , которые получены после исключения из IG_{12} и T_{12} зависимости этих индексов от индексов солнечной активности. В данном случае индексами солнечной активности являются $F10$ и $F30$ — потоки радиоизлучения Солнца на 10.7 и 30 см. Получено, что для интервала 1957–2023 гг. все анализируемые линейные тренды отрицательны, т.е. величины ΔIG_{12} и ΔT_{12} уменьшаются со временем, и эти тренды значимы. По абсолютной величине они максимальны для ΔIG_{12} с учетом зависимости IG_{12} от $F10_{12}$ и минимальны для ΔT_{12} с учетом зависимости T_{12} от $F30_{12}$. Учет нелинейности трендов показывает, что, например, после 2010 г. они усилились. Представлены соотношения, которые позволяют по данным трендов ионосферных индексов (ΔIG_{12} или ΔT_{12}) судить о характере тренда $\Delta foF2$ над конкретным пунктом. Для этого по модели IRI для $foF2$ получен коэффициент, который дает связь между трендами ионосферного индекса и $\Delta foF2$ над данным пунктом. На основе сопоставления с экспериментальными данными на средних широтах получено, что тренды ионосферных индексов позволяют правильно определить знак тренда $\Delta foF2$ и общую тенденцию изменения этого тренда, но вычисленная величина тренда над конкретным пунктом может заметно отличаться от экспериментальных данных.

DOI: 10.31857/S0016794024050052, EDN: QQZLRQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Тренды (долговременные тенденции изменения) критической частоты ионосферного слоя $F2$, $foF2$, обсуждались 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 трендов 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 различные индексы солнечной активности, включая потоки радиоизлучения Солнца на длинах волн 10.7 см ($F10$) и 30 см ($F30$). Результаты анализа данных $foF2$ для интервалов времени около 20–30 лет показали, что индекс $F30$ является более точным индикатором солнечной активности, чем $F10$ [Danilov and Berbeneva, 2023; Laštovička and Burešova, 2023; Laštovička, 2024]. Это может потребовать пересмотра ряда

моделей ионосферы и термосферы, поскольку индекс $F10$ является наиболее часто используемым индикатором солнечной активности для таких моделей.

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]. Например, 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 — коэффициенты, 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 R_z , месяца года и мирового времени. Подстановка, например, IG в уравнение (1) вместо R_z 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. В данном случае с помощью ионосферных индексов косвенно учтены тренды $foF2$ и зависимости $foF2$ от геомагнитной активности. Учет зависимости IG от индекса солнечной активности, например $F10$, позволяет выделить тренд IG , который является средней (глобальной) характеристикой этого тренда.

Целью данной работы было первое выделение трендов ионосферных индексов IG и T после учета их зависимостей от индексов солнечной активности $F10$ и $F30$. Для этого использованы скользящие средние за год значения этих индексов, центрированные на данный месяц, в интервале от 01.1957 до 06.2023 гг., который для краткости будем обозначать как интервал 1957–2023 гг.

2. ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Исходными для анализа были средние за месяц ионосферные и солнечные индексы активности T , IG , $F10$ и $F30$. Индекс T построен по данным медиан $foF2$ во все часы мирового времени для каждой из ионосферных станций, выбранных для анализа [Caquana, 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 этим причинам для одинаковых условий индексы T и IG могут различаться, но обычно их отличие незначительно. Это следует из уравнения регрессии для скользящих средних за год индексов T_{12} и IG_{12} за 1957–2023 гг.:

$$T_{12} = 1.7 + 0.965IG_{12} \pm 3, \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции $K = 0.998$. Напомним, что величины R_z , T и IG являются безразмерными величинами. Из уравнения (2) видно, что обычно $IG_{12} > T_{12}$.

Средние за месяц значения индексов солнечной активности $F30$ были преобразованы в индекс $F30^*$, который соответствует приведению $F30$ к масштабу $F10$ с учетом калибровки на зависимость $F30$ от времени, принятой в полуэмпи-

рической модели термосферы DTM-2020 на основе спутниковых данных о плотности термосферы для продолжительного интервала времени [Bruinsma and Boniface, 2021]:

$$F30^* = -1.6 + 1.55F30 - 0.22(t - 1992.042), \quad (3)$$

$$t = nyr + (mth - 0.5)/12,$$

где nyr и mth — год и месяц данной даты. Уравнение (3) аналогично уравнению в модели DTM-2020 для ежедневных значений $F30^*$ [Bruinsma and Boniface, 2021]. По ежемесячным данным индексов $F10$ и $F30^*$ были вычислены скользящие средние за год индексы $F10_{12}$ и $F30^*_{12}$, которые центрированы на данный месяц данного года. В среднем индексы $F10_{12}$ и $F30^*_{12}$ различаются слабо. Это следует из уравнения регрессии для индексов $F10_{12}$ и $F30^*_{12}$ за 1957–2010 гг.:

$$F10_{12} = 0.7 + 0.998F30^*_{12} \pm 3.5 \quad (4)$$

с коэффициентом корреляции $K = 0.997$.

Для выделения трендов ионосферных индексов IG_{12} и T_{12} необходимо исключить зависимости этих индексов от солнечной активности, в данном случае, от индексов $F10_{12}$ или $F30^*_{12}$ с помощью уравнений регрессии

$$Y_{\text{mod}} = b_0 + b_1X + b_2X^2, \quad (5)$$

где Y равно IG_{12} или T_{12} , X равно $F10_{12}$ или $F30^*_{12}$. Ионосферный индекс, вычисленный по уравнению (5), является моделью этого индекса. Он обозначен через Y_{mod} . Для определения коэффициентов уравнений регрессии b_j использованы данные об анализируемых индексах активности за 1957–1996 гг., когда связи между ионосферными и солнечными индексами активности, включая R_{z12} , относительно слабо зависели от времени [Деминев и Деминаева, 2020]. Для оценки точности этих моделей в табл. 1 приведены коэффициенты корреляции K и стандартные отклонения σ

Таблица 1. Стандартные отклонения σ и коэффициенты корреляции K уравнений регрессии (5) по данным об ионосферных индексах солнечной активности и солнечных индексах этой активности за 1957–1996 гг.

$Y \setminus X$	$F10_{12}$		$F30^*_{12}$	
	σ	K	σ	K
IG_{12}	4.4	0.997	5.5	0.995
T_{12}	3.5	0.998	4.5	0.996

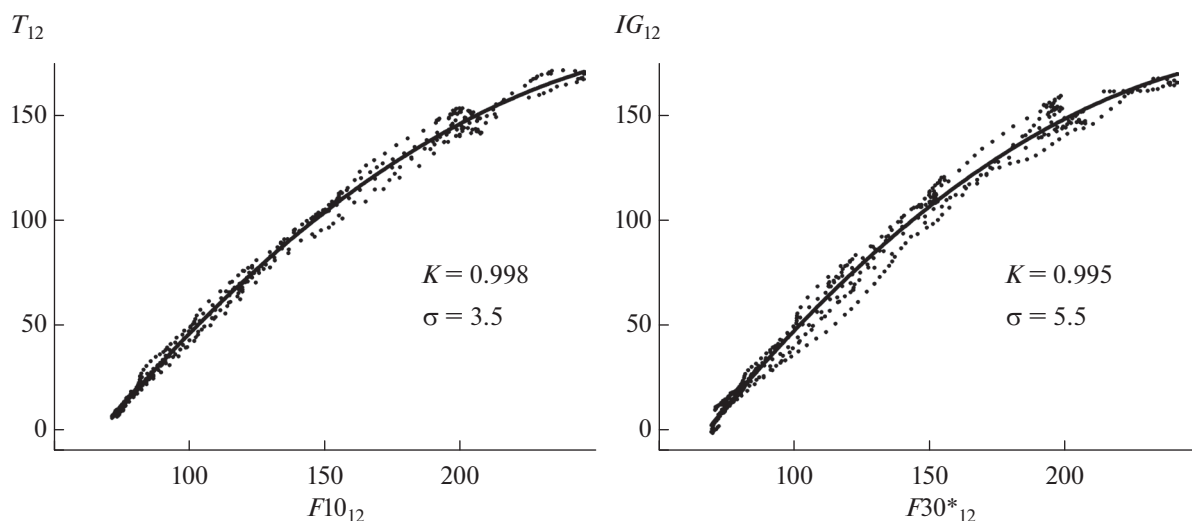


Рис. 1. Зависимости ионосферных индексов T_{12} и IG_{12} от солнечных индексов активности $F10_{12}$ и $F30^*_{12}$ по данным измерений и уравнениям регрессии (5) — точки и сплошные линии; K и σ — коэффициенты корреляции и стандартные отклонения этих уравнений.

измеренных значений Y от Y_{mod} . Отметим, что K^2 — коэффициенты определенности этих моделей. Из таблицы видно, что точности моделей (5) достаточно высокие и слабо отличаются друг от друга. Тем не менее, зависимость T_{12} от $F10_{12}$ или $F30^*_{12}$ точнее зависимости IG_{12} от этих индексов. Зависимость T_{12} от $F10_{12}$ является самой точной, а зависимость IG_{12} от $F30^*_{12}$ наименее точной из рассмотренных зависимостей. Для большей наглядности эти зависимости 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_{mod} от солнечного индекса X по уравнению регрессии (5). Это позволяет найти долговременные тренды индексов Y с помощью уравнений регрессии, которые в линейном приближении имеют вид:

$$\Delta Y(X) = Y - Y_{\text{mod}}(X) = c_0 + c_1 t, \quad (6)$$

где t — время в годах (см. уравнение (3)), 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 $Y_{\text{mod}}(X)$.

В табл. 2 приведены параметры уравнений регрессии (6) для интервала 1957–2023 гг. Из данных в табл. 2 следует, что все анализируемые тренды являются отрицательными ($c_1 < 0$). По абсолютной величине они изменяются в пределах 0.08–0.20, минимальны для $T_{12}(F30^*_{12})$ и максимальны для $IG_{12}(F10_{12})$. Дополнительный учет зависимости ионосферных индексов от времени не приводит к заметному увеличению точности моделей для этих индексов: величины σ в табл. 1 и табл. 2 практически совпадают, т.е. вклад трендов ионосферных индексов в значения этих индексов относительно мал. Тем не менее, все эти тренды значимы при уровне значимости 95% по критерию Фишера.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции K , стандартные отклонения σ и коэффициенты c_1 (в 1/год) уравнений регрессии (6) по данным измерений ионосферных (IG_{12} , T_{12}) и солнечных ($F10_{12}$, $F30^*_{12}$) индексов за 1957–2023 гг.

$\Delta Y \setminus X$	$F10_{12}$			$F30^*_{12}$		
	c_1	σ	K	c_1	σ	K
IG_{12}	–0.20	4.4	0.667	–0.16	5.1	0.520
T_{12}	–0.12	3.7	0.542	–0.08	4.0	0.373

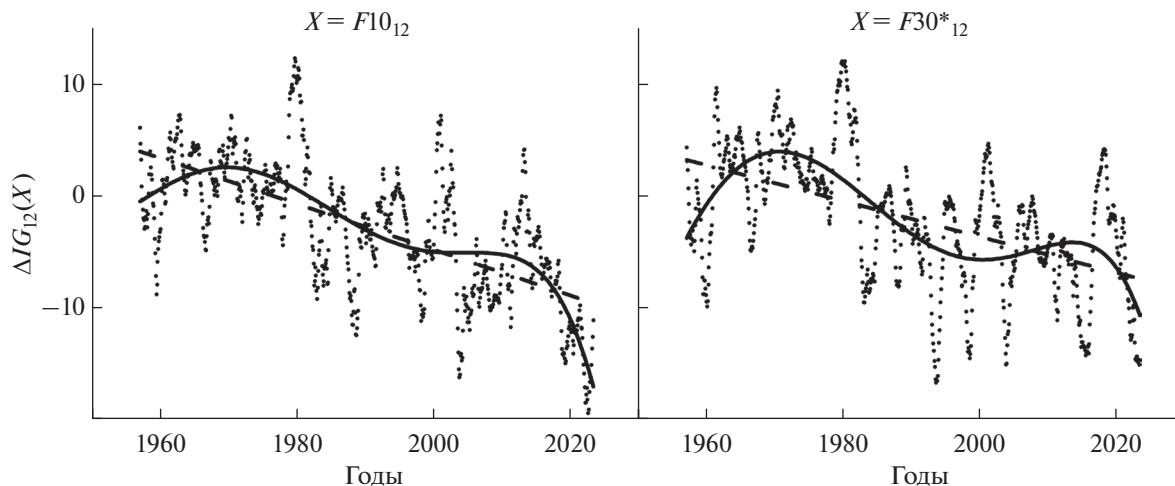


Рис. 2. Изменения индекса $\Delta IG_{12}(X)$ со временем в годах по экспериментальным данным (точки) и линейная (по уравнению (6)) и нелинейная интерполяции этих данных — штриховые и сплошные линии.

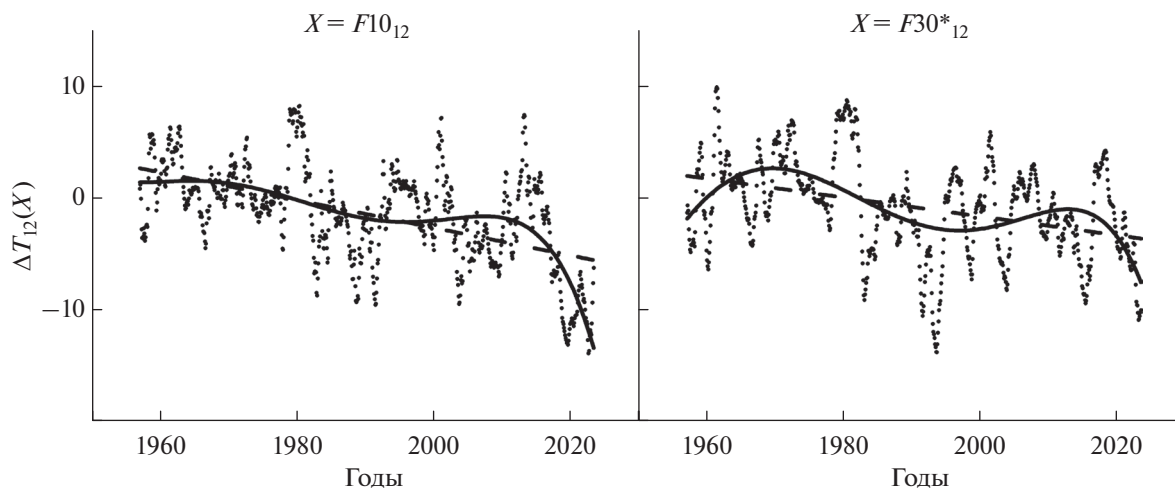


Рис. 3. Изменения индекса $\Delta T_{12}(X)$ со временем в годах по экспериментальным данным (точки) и линейная (по уравнению (6)) и нелинейная интерполяции этих данных — штриховые и сплошные линии.

Более наглядно о характере изменений $\Delta Y(X)$ со временем, линейных и нелинейных трендах этих изменений можно судить по данным на рис. 2 и рис. 3. Нелинейные тренды на этих рисунках получены с помощью полиномов пятой степени по времени в годах. Из данных на этих рисунках можно видеть, что разброс данных относительно линейного тренда действительно большой и нелинейный тренд до некоторой степени отражает особенности этого тренда в отдельные промежутки времени. Так, из этих нелинейных трендов следует, что они были положительными в интервале 1957–1970 гг., самые сильные отрицательные тренды наблюдались после 2010 г.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Тренды ионосферных индексов IG и T позволяют получить качественное представление о тренде $foF2$ над выбранным пунктом:

$$\Delta foF2 = d_0 + d_1 t, \quad (7)$$

включая зависимость d_1 от сезона и местного времени. Для этого необходимо использовать уравнение (1) в модели IRI [Bilitza, 2018], которое по данным относительного числа солнечных пятен R_z позволяет вычислить $foF2$ над выбранным пунктом для данного месяца года и мирового или местного времени. В результате, можно вычислить коэффициент пропорциональности a_1 в уравнении (1):

$$a_1 = (foF2(Rz(2)) - foF2(Rz(1)))/(Rz(2) - Rz(1)),$$

где $foF2(Rz(2))$ и $foF2(Rz(1))$ — значения $foF2$, вычисленные по модели IRI для рассматриваемых условий при $Rz = Rz(2)$ и $Rz = Rz(1)$. В вычислениях удобно принять $Rz(2) = 100$, $Rz(1) = 0$. В этом случае уравнение для a_1 имеет вид

$$a_1 = (foF2(100) - foF2(0))/100. \quad (8)$$

Это позволяет по известному линейному тренду ионосферного индекса (IG_{12} или T_{12}) с коэффициентом c_1 определить величину линейного тренда $foF2$ над выбранным пунктом для данного месяца года и местного времени:

$$d_1 = a_1 c_1, \quad (9)$$

где d_1 , a_1 и c_1 измеряются в МГц/год, МГц и 1/год, они определены уравнениями (7), (8) и (6). Зависимость d_1 от координат пункта, сезона и местного времени определена коэффициентом a_1 , тенденции изменения тренда d_1 , включая знак тренда, определены коэффициентом c_1 , который является трендом ионосферного индекса. На средних широтах коэффициент a_1 максимален зимой в околополуденные часы, поэтому согласно (9) тренд $foF2$ также должен быть максимален по абсолютной величине для этих условий, что качественно согласуется с данными измерений этого тренда [Danilov and Konstantinova, 2015].

Приведем более детальные примеры использования уравнения (9) для координат станции Juliusruh (54.6° N, 13.5° E) и варианта, когда тренд ионосферного индекса в уравнении (6) определен величиной $\Delta IG_{12}(F10_{12})$. Из результатов анализа экспериментальных данных $foF2$ этой станции за 1985–2009 гг. в дневные (10–16 LT) часы следует, что $d_1 = -0.005$ МГц/год летом (5, 6, 7, 8) и $d_1 = -0.033$ МГц/год зимой (11, 12, 1, 2), где в скобках указаны месяцы года [Danilov and Konstantinova, 2015]. Вычисления тренда $\Delta IG_{12}(F10_{12})$ в интервале 1985–2009 гг. по приведенной выше методике дают $c_1 = -0.24$ (1/год). Вычисления коэффициента a_1 для этих условий: $a_1 = 0.022$ МГц для лета и $a_1 = 0.044$ МГц для зимы. Следовательно, вычисленные по уравнению (9) значения d_1 равны -0.005 и -0.011 МГц/год. Видно, что вычисленные значения d_1 совпадают с экспериментальными данными для лета и отличаются в 3 раза для зимы. Тем не менее, результаты вычислений передают качественные особенности изменения d_1 : они отрицательны и по абсолютной величине зимой больше, чем летом.

На основе анализа средних за год значений $foF2$ в полдень над Juliusruh с учетом индекса $F10_{12}$

было получено, что для интервалов 1976–1995 и 1996–2014 гг. величина d_1 равна -0.014 и 0.01 МГц/год [Laštovička, 2024]. Вычисления по модели IRI для этой станции в полдень дают среднее за год значение $a_1 = 0.035$ МГц. В данном случае коэффициенты уравнений (5) вычислялись отдельно для каждого интервала времени для согласования с методикой выделения тренда $foF2$ по экспериментальным данным. В остальном вычисления трендов $\Delta IG_{12}(F10_{12})$ не отличались от приведенной выше методики. Они дают $c_1 = -0.33$ (1/год) и $d_1 = -0.012$ МГц/год для 1976–1995 гг., $c_1 = 0.1$ (1/год) и $d_1 = 0.004$ МГц/год для 1996–2014 гг. Из этих данных следует, что ионосферный индекс позволил правильно определить знаки тренда $foF2$ для этих интервалов. Для интервала 1976–1995 гг. даже величина тренда $foF2$ почти не отличается от полученной по ионосферным данным. Знаки линейного тренда для этих интервалов можно определить и по нелинейным трендам на рис. 2, т.е. зависимости $\Delta IG_{12}(F10_{12})$ от времени. Они отрицательны в интервале 1976–1995 и практически отсутствуют в интервале 1996–2014 гг. Отметим, что сильные отрицательные тренды $\Delta IG_{12}(F10_{12})$ наблюдались после 2010 г. (см. рис. 2). Аналогичную тенденцию отражают тренды $foF2$ над Juliusruh по экспериментальным данным [Danilov and Konstantinova, 2023].

Выше было получено, что для координат станции Juliusruh в полдень среднее за год значение $a_1 = 0.035$ МГц. Линейные тренды c_1 (в 1/год) для ионосферных индексов в интервале 1957–2023 гг. изменяются от -0.08 до -0.2 (см. таблицу 2). Следовательно, средние за год тренды $\Delta foF2$ изменяются от -0.003 до -0.007 МГц/год. В данном случае за интервал 66 лет уменьшение $foF2$ над Juliusruh составило 0.2 – 0.5 МГц, если судить по среднегодовым значениям $\Delta foF2$. Такое слабое уменьшение $foF2$ за столь продолжительный интервал времени не имеет практического значения.

Тем не менее, линейные тренды ионосферных индексов значимы. По абсолютной величине они максимальны для $\Delta IG_{12}(F10_{12})$ и минимальны для $\Delta T_{12}(F30^*_{12})$. Мы не нашли критерия, по которому можно было бы оставить один из этих трендов, например, $\Delta T_{12}(F30^*_{12})$. Тем не менее, возможно, что $F10$ (и, в меньшей степени, $F30^*$) увеличиваются со временем относительно EUV-потока. Следовательно, возможно, что для $F10$ требуется калибровка по времени, аналогичная калибровке, приведенной в уравнении (3) для $F30$. Только после этого, по-видимому, можно будет судить о возможности использования потоков солнечного радиоизлучения на длинах волн 10.7 и 30 см для учета вклада солнечного фактора в тренды

в ионосфере. Еще один недостаток индекса $F10$ как индикатора EUV-излучения Солнца хорошо известен: индекс $F10$ перестает быть адекватным индикатором солнечной активности для $foF2$ в периоды продолжительной низкой солнечной активности [Chen et al., 2011]. По-видимому, это справедливо и для $F30^*$. Поэтому самостоятельный интерес представляет анализ возможности использования других индикаторов солнечного EUV-излучения для выделения трендов ионосферных индексов. Решение этой задачи выходит за рамки данной работы. Здесь мы пытались, в первую очередь, отработать методику выделения трендов ионосферных индексов и оценить возможность использования этих трендов для качественного анализа трендов $foF2$.

5. ВЫВОДЫ

В работе представлены первые результаты выделения трендов средних за год ионосферных индексов ΔIG_{12} и ΔT_{12} , которые получены после исключения из IG_{12} и T_{12} зависимости этих индексов от индексов солнечной активности. В данном случае индексами солнечной активности являются $F10$ и $F30^*$ — потоки радиоизлучения Солнца на 10.7 и 30 см с приведением $F30$ к шкале $F10$ и калибровкой $F30$ по времени. Получены следующие выводы.

1. Для интервала 1957–2023 гг. все анализируемые линейные тренды отрицательны, т.е. величины ΔIG_{12} и ΔT_{12} уменьшаются со временем, и эти тренды значимы. По абсолютной величине они максимальны для ΔIG_{12} с учетом зависимости IG_{12} от $F10_{12}$ и минимальны для ΔT_{12} с учетом зависимости T_{12} от $F30^*_{12}$. Учет нелинейности трендов показывает, что, например, после 2010 г. они усилились.

2. Представлены соотношения, которые позволяют по данным трендов ионосферных индексов (ΔIG_{12} или ΔT_{12}) судить о характере тренда $\Delta foF2$ над конкретным пунктом. Для этого по модели IRI для $foF2$ получен коэффициент, который дает связь между трендом ионосферного индекса и $\Delta foF2$ над данным пунктом. На основе сопоставления с экспериментальными данными на средних широтах получено, что тренды ионосферных индексов позволяют правильно определить знак тренда $\Delta foF2$ и общую тенденцию изменения этого тренда, но вычисленная величина тренда над конкретным пунктом может заметно отличаться от экспериментальных данных.

3. Средние за год значения линейных трендов $\Delta foF2$ за 1957–2023 гг., вычисленные по ионосферным индексам для средних широт, составля-

ют $-(0.003-0.007)$ МГц/год. Их учет в задачах вычисления $foF2$ не имеет практического значения, но может стать важным для аэронавигации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данные об индексах солнечной активности были взяты с сайтов (<http://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1>) (WDC for Solar-Terrestrial Physics, UK), www.spaceweather.gc.ca/solarflux (Space Weather Canada), www.sws.bom.gov.au/HF_Systems (Space Weather Services, Australia), <http://solar.nro.nao.ac.jp/norp> (Nobeyama Radio Observatory, Japan).

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 аэронавигация. Т. 60. № 4. С. 411–435. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020040045>
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Эффективный индекс солнечной активности для медианы критической частоты $F2$ -слоя // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 60. № 5. С. 641–645. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020050053>
- 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>
- Bruinsma S., Boniface C. The operational and research DTM-2020 thermosphere models // J. Space Weather Spac. V. 11. ID 47. 2021. <https://doi.org/10.1051/swsc/2021032>
- 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.
- Chen Y., Liu L., Wan W. Does the $F10.7$ index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009? // J. Geophys. Res. — Space. V. 116. № 4. ID A04304. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA016301>
- 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>
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Variations in $foF2$ trends with season and local time // Geomagn. Aeronomy. V. 55. № 1. P. 51–58. 2015. <https://doi.org/10.1134/S0016793215010041>
- 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>

- 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.

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*

The first results of identifying trends in the annual average ionospheric indices ΔIG_{12} and ΔT_{12} are presented, which were obtained after excluding the dependence of these indices on solar activity indices from IG_{12} and T_{12} . In this case, the solar activity indices are $F10$ and $F30$ — solar radio emission fluxes at 10.7 and 30 cm. It was found that for the interval 1957–2023 all analyzed linear trends are negative, i.e. the values of ΔIG_{12} and ΔT_{12} decrease with time, and these trends are significant. In absolute value, they are maximum for ΔIG_{12} , taking into account the dependence of IG_{12} on $F10_{12}$, and minimum for ΔT_{12} , taking into account the dependence of T_{12} on $F30_{12}$. Taking into account the nonlinearity of trends shows that, for example, after 2010 they intensified. Relationships are presented that allow, based on the data of trends in ionospheric indices (ΔIG_{12} or ΔT_{12}), to judge the nature of the $\Delta foF2$ trend over a specific point. For this purpose, using the IRI model for $foF2$, a coefficient was obtained that gives the relationship between the trends of the ionospheric index and $\Delta foF2$ over a given point. Based on a comparison with experimental data at mid-latitudes, it was found that trends in ionospheric indices make it possible to correctly determine the sign of the $\Delta foF2$ trend and the general tendency for this trend to change, but the calculated trend value over a specific point may differ markedly from the experimental data.