

УДК 523.98;550.388.2

## ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ ИОНОСФЕРЫ В ЦИКЛАХ 23 И 24: ФОРМА ЦИКЛОВ

© 2022 г. М. Г. Деминов<sup>1</sup>\*, Р. Г. Деминов<sup>2</sup>, Е. В. Непомнящая<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия<sup>2</sup>Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

\*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 30.06.2021 г.

После доработки 12.08.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Проведен анализ особенностей формы низких солнечных циклов 23 и 24 для индексов солнечной активности ( $F$  – потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см,  $R_z$  и  $R_i$  – относительного числа солнечных пятен, прежняя и новая версии) и ионосферного индекса этой активности  $T$ . Для этого анализируемые индексы приведены к шкале  $R_z$  и рассмотрены сглаженные (с помощью 24-месячного гауссова фильтра) значения этих индексов. Получено, что для циклов 23 и 24 и предыдущих солнечных циклов по индексу  $R_z$  форма циклов сохранялась, т.е. выполнялась определенная связь между амплитудой цикла и временем наступления максимума цикла. Эта же связь соблюдалась для индекса  $R_i$ , за исключением цикла 23, когда наблюдаемое время наступления максимума цикла произошло на 7 месяцев позже времени, ожидаемого на основе предыдущих циклов. Для индексов  $F$  и  $T$  форма циклов также сохранялась вплоть до цикла 22, но в циклах 23 и 24 наблюдаемые максимумы циклов произошли почти на год позже ожидаемых, что является одним из свойств нового режима продолжительной низкой солнечной активности. В этом режиме нарушается связь между индексами  $R_i$  и  $F$ , что и приводит к разным формам циклов для этих индексов.

DOI: 10.31857/S0016794022010059

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Эмпирические модели ионосферы, такие как IRI [Bilitza, 2018] или NeQuick [Nava et al., 2008], содержат индексы солнечной активности  $F_{12}$  или  $R_{z12}$  в качестве входных параметров для вычисления, например, медианы критической частоты  $F_2$ -слоя  $foF_2$ . Здесь и ниже  $F_{12}$  и  $R_{z12}$  – средние за 12 месяцев значения потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см и относительного числа солнечных пятен (версия 1, включающая классический Цюрихский ряд данных), которые центрированы на середину данного месяца. В этих моделях в соответствии с рекомендациями ITU-R [1999] принято, что индексы  $R_{z12}$  и  $F_{12}$  являются эквивалентными индексами, поскольку они связаны между собой уравнением регрессии, которое не зависит от времени, и использование любого из этих двух индексов будет приводить к практически совпадающим значениям медианы  $foF_2$ . Более точными индикаторами солнечной активности для  $foF_2$  считают так называемые ионосферные индексы этой активности  $IG_{12}$  и  $T_{12}$ , которые построены по экспериментальным дан-

ным медиан  $foF_2$  ряда ионосферных станций для замены индекса  $R_{z12}$  в уравнении регрессии

$$foF_2 = a_0 + a_1 R_{z12} \quad (1)$$

с целью обеспечения минимальных ошибок вычисления  $foF_2$  по эмпирическим моделям [Liu et al., 1983; Caruana, 1990]. Коэффициенты  $a_0$  и  $a_1$  определяются на основе карт ITU-R для данного пункта, месяца года и мирового времени [Jones and Gallet, 1962, 1965], и эти карты являются составной частью моделей IRI и NeQuick. Тем не менее, повышенная точность ионосферных индексов относительно солнечных индексов может быть нивелирована неточностью прогноза ионосферных индексов в задачах долгосрочного прогноза ионосферы [Zakharenkova et al., 2013].

Считают, что солнечные циклы 23 (05.1996–09.2008 г.) и 24 (09.2008–12.2019 г.) соответствуют переходу в новый продолжительный режим низкой солнечной активности, свойства которого недостаточно изучены, поскольку аналогичный режим, по-видимому, наблюдался более 100 лет назад [Svalgaard and Hansen, 2013]. Одним из наиболее ярких свойств нового режима низкой солнечной активности явилось нарушение эквива-

лентности между индексами  $Rz_{12}$  и  $F_{12}$  [Svalgaard and Hansen, 2013]. На основе сопоставления ионосферного индекса с солнечными индексами было получено, что индекс  $F_{12}$  является более адекватным индикатором солнечной активности для ионосферы, чем  $Rz_{12}$  или  $Ri_{12}$ , где  $Ri_{12}$  – версия 2 международного числа солнечных пятен [Деминов и Деминова, 2019; Деминов и др., 2020]. Напомним, что индекс  $Rz_{12}$  перестал поддерживаться в конце 2014 г., поскольку ряды чисел солнечных пятен были пересмотрены для получения  $Ri$  – новой версии этого индекса, и ряд  $Ri$  продолжен до настоящего времени [Clette et al., 2014, 2015]. Эти и другие свойства солнечных индексов для циклов 23 и 24 были представлены нами недавно [Деминов и др., 2020].

Целью данной работы было продолжение этих исследований: анализ особенностей формы солнечных циклов для ионосферных и солнечных индексов в циклах 23 и 24. При этом основное внимание уделялось степени отклонения этой формы от закономерности, которая по данным сглаженного (24-месячным гауссовым фильтром) значения  $Rz$  сохранялась практически во все известные циклы солнечной активности: максимум высокого солнечного цикла наступал раньше низкого цикла [Hathaway, 2015]. Результаты решения этой задачи приведены ниже.

## 2. ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Средние за месяц значения индексов солнечной активности ( $Rz_m$ ,  $Ri_m$  и  $F_m$ ) и ионосферного индекса этой активности  $T_m$  в интервале 01.1947–05.2015 г. для  $Rz_m$  и в интервале 01.1947–05.2021 г. для остальных индексов были исходными для анализа. Индекс  $T_m$  получен по медианам  $foF2$  ионосферных станций для данного месяца данного года как замена индекса  $Rz_m$  (или  $Rz_{12}$ ) в уравнении регрессии (1) для увеличения точности вычисления  $foF2$  по этому уравнению [Caгуana, 1990]. Ионосферный индекс основан на данных измерений  $foF2$ , поэтому он точнее солнечных индексов для медианы  $foF2$  [Caгуana, 1990]. Это позволяет использовать индекс  $T_m$  в качестве характеристики  $foF2$ , и этот индекс измеряется в шкале (единицах измерения)  $Rz$ . Индексы  $F_m$  и  $Ri_m$  также целесообразно привести к шкале  $Rz$ , что обеспечит сопоставимость этих индексов. Для этого использованы уравнения регрессии [Деминов и Деминова, 2019, 2020]:

$$Rr_m = 0.708Ri_m - 0.3, \quad (2)$$

$$Rf_m = -117 + 1.94F_m - 0.00313F_m^2, \quad (3)$$

где  $Rr_m$  и  $Rf_m$  есть  $Ri_m$  и  $F_m$  в шкале  $Rz$ . Уравнения (2) и (3) основаны на данных  $Rz_m$  и  $Ri_m$  и данных  $T_m$  и  $F_m$  за 1954–1996 гг., когда связь между этими ин-

дексами была устойчивой, т.е. почти не изменялась со временем при переходе от одного солнечного цикла к другому. Следует отметить, что уравнения (2) и (3) были получены для средних за 12 месяцев индексов солнечной активности [Деминов и Деминова, 2019, 2020], но они справедливы и для средних за месяц значений этих индексов.

При анализе амплитуды и формы солнечных циклов используют фильтр с весовой функцией [Hathaway, 2015]:

$$W(t) = \exp(-x^2/2) - (3 - x^2/2)\exp(-2), \quad (4)$$

где  $x = t/12$ ,  $t$  измеряется в месяцах, изменяется от  $t = -23$  до  $t = 23$ , и  $t = 0$  – это данный месяц. Отметим, что  $W(t) = 0$  при  $|t| = 24$ , поэтому фильтр с весовой функцией  $W(t)$  называют 24-месячным гауссовым фильтром [Hathaway et al., 1994; Hathaway, 2015]. Такой фильтр почти полностью исключает флуктуации на временных масштабах меньше 1–3 лет и дает один отчетливый максимум цикла солнечной активности для каждого из 24 солнечных циклов [Hathaway, 2015]. Индексы солнечной активности, полученные с помощью такого фильтра по исходным данным – средним за месяц значениям этих индексов, обозначены как  $Rz$ ,  $Rr$ ,  $Rf$  и  $T$ . Они названы сглаженными индексами для краткости изложения.

Ниже рассмотрены свойства этих индексов в солнечных циклах 22 (03.1986–05.1996 г.), 23 (05.1996–09.2008 г.) и 24 (09.2008–12.2019 г.). Для этого использованы сглаженные данные  $Rz$  в интервале 03.1986–05.2013 г. и сглаженные данные остальных индексов в интервале 03.1986–05.2019 г. Цикл 22 использован для выделения возможных особенностей циклов 23 и 24. Сглаженные индексы солнечной активности в циклах 22, 23 и 24 показаны на рис. 1. Из данных на этом рисунке можно видеть, что и минимумы, и максимумы каждого из анализируемых индексов в этих циклах уменьшались со временем, т.е. они были максимальны для цикла 22 и минимальны для цикла 24. Индексы  $T$  и  $Rf$  практически совпадали почти для всего анализируемого интервала времени. Исключение составили только периоды очень низкой солнечной активности в конце циклов 23 и 24. Это подтверждает вывод, что индекс  $Rf$  является более адекватным индикатором солнечной активности для  $foF2$ , чем  $Rz$  или  $Rr$  [Деминов и Деминова, 2019, 2020]. Разница между индексами  $T$  и  $Rr$  минимальна для цикла 22 и становится значительной при переходе к низким циклам 23 и 24: отношение максимумов  $C(T, Rr) = T_{\max}/Rr_{\max}$  примерно равно 1.01, 1.13, 1.25 для циклов 22, 23, 24. Аналогично, отношение  $C(Rf, Rr) = Rf_{\max}/Rr_{\max}$  равно 1.02, 1.10, 1.22 для циклов 22, 23, 24. Отношение  $C(T, Rz) = T_{\max}/Rz_{\max}$  примерно равно 0.96 и 1.19 для циклов 22 и 23, т.е.

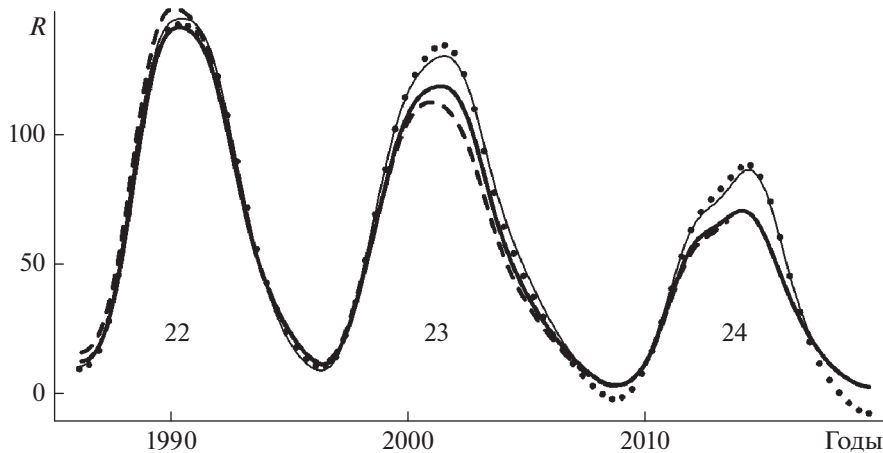


Рис. 1. Сглаженные индексы солнечной активности в циклах 22, 23 и 24:  $Rr$  – толстая сплошная линия,  $Rz$  – штриховая линия,  $Rf$  – тонкая сплошная линия,  $T$  – точки.

для цикла 23 индекс  $Rz$  является наименее точным индикатором солнечной активности для  $foF2$  из рассмотренных. Для цикла 24 данные  $Rz_{\max}$  отсутствуют, поскольку сглаженный индекс  $Rz$  перестал поддерживаться до наступления максимума цикла по этому индексу. Тем не менее, данные сглаженных индексов  $Rz$  и  $Ri$  в цикле 24 показывают, что они слабо отличались до окончания измерений  $Rz$ , т.е. до 05.2013 г. Это позволило предположить, что в цикле 24 было выполнено равенство  $Rz_{\max} = Rr_{\max} = 71.2$ . Итак, в целом анализируемые индексы солнечной активности почти совпадали в цикле 22, но при переходе к низким солнечным циклам индексы  $Rz$  и  $Ri$  стали заметно отличаться от индексов  $T$  и  $Rf$ , что является характерной особенностью таких циклов [Svalgaard and Hansen, 2013; Деминов и др., 2020].

### 3. ФОРМА СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

Форма солнечных циклов для сглаженного индекса  $Rz$  почти универсальна, т.е. применима для каждого из законченных циклов [Hathaway, 2015]:

$$dR = ax^3 / (\exp(x^2) - 0.71), \quad (5)$$

где

$$dR = Rz - Rz_0, \quad x = (t - t_0)/b, \quad (6)$$

$a$  и  $b$  – искомые параметры цикла;  $t$  – время в месяцах, отсчитываемое от начала цикла  $t_0$ ;  $Rz_0$  – значение  $Rz$  для  $t = t_0$ . Для законченных циклов величины  $a$  и  $b$  можно определить через амплитуду цикла  $dR_{\max} = Rz_{\max} - Rz_0$  [Hathaway et al., 1994; Hathaway, 2015; Деминов и др., 2020]:

$$a = dR_{\max} / 0.504, \quad b = (37 + 1700/dR_{\max}) / 1.081. \quad (7)$$

Из уравнения (5) можно видеть, что интервал времени от начала до максимума цикла пропорционален параметру  $b$  [Hathaway et al., 1994]:

$$t_{\max} - t_0 = 1.081b.$$

Уравнения (7) показывают, что параметр  $b$  уменьшается с ростом амплитуды цикла  $dR_{\max}$ . Тем самым учтено, что максимум высокого солнечного цикла наступал раньше низкого цикла практически для всех законченных циклов по сглаженному индексу  $Rz$  [Hathaway, 2015]. Из уравнений (5)–(7) можно видеть, что для определения формы цикла достаточно задать три величины: время начала цикла  $t_0$ , значение индекса солнечной активности в это время  $Rz_0$  и высоту цикла, т.е. величину  $Rz_{\max}$ .

Целью данной работы было оценить, насколько универсальной является форма циклов по уравнениям (5)–(7) для сглаженных индексов  $Rr$ ,  $Rf$ ,  $T$  при условии, что из экспериментальных данных для каждого цикла заданы время начала цикла  $t_0$ , значение анализируемого индекса в это время и высота цикла для этого индекса. Полученные таким способом формы циклов названы моделью циклов для анализируемого индекса солнечной активности. На рис. 2 показаны формы циклов 22, 23 и 24 по экспериментальным данным и по модели для каждого из анализируемых индексов солнечной активности. Для получения  $Rz$  по модели (5)–(7) в начальный период цикла 24 учтено принятое предположение  $Rz_{\max} = Rr_{\max} = 71.2$ . Видно, что для индекса  $Rz$  формы циклов по экспериментальным данным и по модели практически совпадают для всего анализируемого интервала времени за исключением окончаний циклов 22 и 23. Последнее связано с тем, что в модели (5) не учтена возможность изменения индекса  $Rz_0$  при переходе от одного цикла к другому. В данном случае индекс  $Rz_0$  равен 16.4,

## 4. ОБСУЖДЕНИЕ

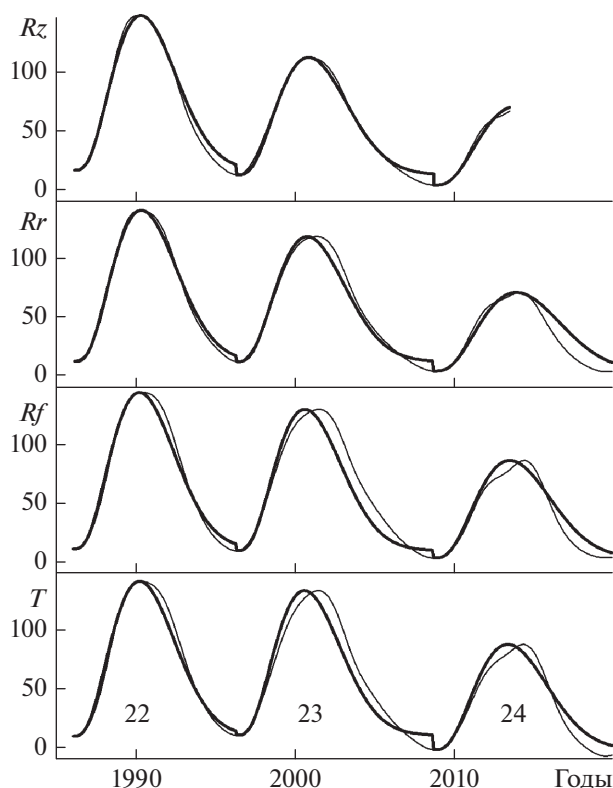


Рис. 2. Формы циклов 22, 23 и 24 для индексов  $R_z$ ,  $R_r$ ,  $R_f$  и  $T$  по экспериментальным данным (тонкие линии) и по модели (5)–(7) – толстые линии.

12.4 и 3.5 для циклов 22, 23 и 24, и модель дает завышенные значения  $R_z$  при приближении к окончанию циклов 22 и 23.

Из рисунка 2 можно видеть, что разница во времени наступления максимума цикла по экспериментальным данным и модели  $\Delta t \geq 0$ , т.е. эта разница отсутствует или максимум по экспериментальным данным наступает позже максимума по модели. В цикле 22 разница  $\Delta t$  не превышает 3 месяца для каждого из анализируемых индексов. В цикле 23 величина  $\Delta t$  примерно равна 1, 7, 11 и 11 месяцев для индексов  $R_z$ ,  $R_r$ ,  $R_f$  и  $T$ . В цикле 24 разница  $\Delta t$  примерно равна 3, 11 и 11 месяцев для индексов  $R_r$ ,  $R_f$  и  $T$ . Следовательно, для индексов  $R_f$  и  $T$  в циклах 23 и 24 модель дает опережение времени наступления максимума цикла почти на 1 год и, как следствие, искажение формы цикла, т.е. нарушение определенной пропорции между фазами роста и спада цикла. По-видимому, это является характерной особенностью режима продолжительной низкой солнечной активности. Следует отметить, что в цикле 23 индекс  $R_r$  в большей степени соответствует индексу  $T$ , чем индекс  $R_z$ .

Магнитное поле Солнца является основной причиной изменчивости солнечной активности, включая изменения этой активности с солнечным циклом [Svalgaard and Hansen, 2013; Balogh et al., 2014; Hathaway, 2015]. Это поле отчетливо уменьшалось в течение последних солнечных циклов [Janardhan et al., 2015]. С уменьшением магнитного поля Солнца связывают уменьшение амплитуды солнечных циклов [Svalgaard and Hansen, 2013; Balogh et al., 2014; Hathaway, 2015]. Выше отмечалось, что отношение  $C(R_f, R_r) = R_{f_{\max}}/R_{r_{\max}}$  увеличивалось в течение последних солнечных циклов. На основе качественного анализа было получено, что увеличение этого отношения со временем также связано с уменьшением крупномасштабного магнитного поля Солнца [Livingston et al., 2012; Svalgaard and Hansen, 2013]. Увеличение отношения  $C(R_f, R_r)$  при уменьшении магнитного поля Солнца, по-видимому, характерно именно для слабых солнечных циклов. Это позволило утверждать, что Солнце переходит в новый режим низкой активности, что, однако, не подкреплено достаточным набором экспериментальных данных, поскольку аналогичный режим, по-видимому, наблюдался более 100 лет назад [Svalgaard and Hansen, 2013]. Одним из следствий нового режима низкой активности Солнца явилось нарушение эквивалентности между сглаженными индексами  $R_r$  и  $T$  и сохранение эквивалентности между индексами  $R_f$  и  $T$ . Поэтому индекс  $R_f$  является более точным, чем  $R_r$ , индикатором солнечной активности для медианы  $foF2$ , что согласуется с результатами, полученными ранее по другим наборам данных [Демин и Демин, 2019, Демин и др., 2020].

Для практически всех известных солнечных циклов по индексу  $R_z$  форма цикла сохранялась, т.е. выполнялась определенная связь между амплитудой цикла и временем наступления максимума цикла [Hathaway, 2015]. Эта связь была выполнена для индекса  $R_r$  за исключением цикла 23, когда наблюдаемое время наступления максимума цикла произошло на 7 месяцев позже ожидаемого максимума этого цикла. Для индексов  $R_f$  и  $T$  форма циклов также сохранялась вплоть до цикла 22, но в циклах 23 и 24 наблюдаемые максимумы этих циклов произошли почти на год позже ожидаемого времени наступления этих максимумов. Сильное изменение формы циклов для индексов  $R_f$  и  $T$ , когда максимум цикла наступает гораздо позже ожидаемого по модели, по-видимому, является еще одним следствием нового режима низкой солнечной активности. Индекс  $T$  до некоторой степени характеризует крайнее ультрафиолетовое (КУФ) излучение Солнца, поскольку он определен по экспериментальным данным  $foF2$ . Следовательно, можно ожидать, что

приведенные свойства индексов  $R_f$  и  $T$  для последних солнечных циклов характерны и для КУФ-излучения Солнца. В том числе, максимум сглаженного КУФ-излучения Солнца в циклах 23 и 24, по-видимому, происходил почти на год позже времени, характерного для максимумов предыдущих солнечных циклов. Это предположение является качественным и требует специального рассмотрения.

## 5. ВЫВОДЫ

Проведен анализ особенностей формы низких солнечных циклов 23 и 24 для индексов солнечной активности ( $F$  – потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см,  $R_z$  и  $R_i$  – относительного числа солнечных пятен, прежняя и новая версии) и ионосферного индекса этой активности  $T$ . Для этого анализируемые индексы приведены к шкале  $R_z$  и рассмотрены сглаженные (с помощью 24-месячного гауссова фильтра) значения этих индексов. Основное внимание уделено степени отклонения формы солнечных циклов от закономерностей, характерных для предыдущих циклов, когда сохранялась определенная связь между амплитудой цикла и временем наступления максимума цикла. Получены следующие выводы:

1. Для циклов 23 и 24 и предыдущих солнечных циклов по индексу  $R_z$  форма циклов сохранялась, т.е. выполнялась определенная связь между амплитудой цикла и временем наступления максимума цикла. Эта же связь была выполнена для индекса  $R_i$  за исключением цикла 23, когда наблюдаемое время наступления максимума цикла произошло на 7 месяцев позже ожидаемого максимума этого цикла.

2. Для индексов  $F$  и  $T$  форма циклов также сохранялась вплоть до цикла 22, но в циклах 23 и 24 наблюдаемые максимумы этих циклов произошли почти на год позже ожидаемого времени наступления этих максимумов. Сильное изменение формы циклов для индексов  $F$  и  $T$ , когда максимум цикла наступает гораздо позже ожидаемого по расчетам на основе предыдущих циклов, является одним из свойств нового режима низкой солнечной активности. В этом режиме нарушается связь между индексами  $R_i$  и  $F$ , что и приводит к разным формам циклов для этих индексов.

3. Сглаженные индексы  $T$  и  $F$ , приведенные к шкале  $R_z$ , почти совпадают в циклах 23 и 24 и предыдущих циклах. Индекс  $T$  до некоторой степени характеризует крайнее ультрафиолетовое (КУФ) излучение Солнца, поскольку он определен по экспериментальным данным  $foF2$ . Следовательно, можно ожидать, что приведенные свойства индексов  $F$  и  $T$  для последних солнечных циклов характерны и для КУФ-излучения Солн-

ца. В том числе, максимум сглаженного КУФ-излучения Солнца в циклах 23 и 24, по-видимому, происходил почти на год позже времени, характерного для максимумов предыдущих солнечных циклов. Это предположение является качественным и требует специального рассмотрения.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят SIDC, Бельгия, за индексы  $R_z$  и  $R_i$  – относительные числа солнечных пятен, версии 1 и 2 (<http://sidc.oma.be/silso/>), SWC, Канада, за данные  $F$  – потоки радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см (<ftp://ftp.geolab.nrcan.gc.ca/data/>), SWS, Австралия, за данные  $T$  – ионосферные индексы солнечной активности ([http://www.sws.bom.gov.au/HF\\_Systems/](http://www.sws.bom.gov.au/HF_Systems/)).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при частичной поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках научного проекта № 20-72-10023.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Демин М.Г., Демин Г.Ф. Индекс солнечной активности для долгосрочного прогноза критической частоты  $F2$ -слоя // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 2. С. 191–198. 2019.
- Демин М.Г., Демин Г.Ф. Эффективный индекс солнечной активности для медианы критической частоты  $F2$ -слоя // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 5. С. 641–645. 2020.
- Демин М.Г., Непомнящая Е.В., Обридко В.Н. Особенности индексов солнечной активности для ионосферы в циклах 23 и 24 // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 1. С. 3–8. 2020.
- Balogh A., Hudson H.S., Petrovay K., von Steiger R. Introduction to the solar activity cycle: Overview of causes and consequences // Space Sci. Rev. V. 186. № 1. P. 1–15. 2014.
- Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere // Adv. Radio Sci. V. 16. 2018. <https://doi.org/10.5194/ars-16-1-2018>
- Caruana J. The IPS monthly T index // Solar-Terrestrial Prediction: Proc. Workshop at Leura, Australia (October 16–20, 1989). V. 2. P. 257–263. 1990.
- Clette F., Svalgaard L., Vaquero J.M., Cliver E.W. Revisiting the sunspot number: a 400-year perspective on the solar cycle // Space Sci. Rev. V. 186. P. 35–103. 2014.
- Clette F., Cliver E.W., Lefèvre L., Svalgaard L., Vaquero J.M. Revision of the Sunspot Number(s) // Space Weather. V. 13. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015SW001264>
- Hathaway D.H., Wilson R.M., Reichman E.J. The shape of the solar cycle // Solar Phys. V. 151. № 1. P. 177–190. 1994.
- Hathaway D.H. The Solar Cycle // Living Rev. Solar Phys. V. 12(4). 2015. <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>

- ITU-R. Choice of indices for long-term ionospheric predictions // Recommendation ITU-R P. 371-8, International Telecommunication Union, Geneva. 1999.
- *Janardhan P., Bisoi S.K., Ananthkrishnan S., Tokumar M., Fujiki K., Jose L., Sridharan R.* A 20 year decline in solar photospheric magnetic fields: Inner-heliospheric signatures and possible implications // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 120. P. 5306–5317. 2015.  
<https://doi.org/10.1002/2015JA021123>
- *Jones W.B., Gallet R.M.* The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods // *ITU Telecommun. J.* V. 29. P. 129–147. 1962.
- *Jones W.B., Gallet R.M.* The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods, 2. Control of instability // *ITU Telecommun. J.* V. 32. P. 18–28. 1965.
- *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.
- *Livingston W., Penn M.J., Svalgaard L.* Decreasing sunspot magnetic fields explain unique 10.7 cm radio flux // *Astrophys. J. Lett.* V. 757: L8. 2012.  
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/757/1/L8>
- *Nava B., Coisson P., Radicella S.M.* A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 70. № 15. P. 1856–1862. 2008.
- *Svalgaard L., Hansen W.W.* Solar activity – past, present, future // *J. Space Weather Space Clim.* V. 3. A24. 2013.  
<https://doi.org/10.1051/swsc/2013046>
- *Zakharenkova I.E., Krankowski A., Bilitza D., et al.* Comparative study of foF2 measurements with IRI-2007 model predictions during extended solar minimum // *Adv. Space Res.* V. 51. P. 620–629. 2013.