

## ИНДЕКС СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ $F_2$ -СЛОЯ

© 2019 г. М. Г. Деминов<sup>1</sup>, \*, Г. Ф. Деминова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

\*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.05.2018 г.

После доработки 25.05.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

На основе сопоставления скользящих средних за 12 мес. солнечных индексов активности с ионосферным индексом солнечной активности  $IG_{12}$  за 1954–2014 гг. даны оценки относительных точностей солнечных индексов как индикаторов солнечной активности для медиан критической частоты  $F_2$ -слоя за месяц. Эти солнечные индексы есть прежняя ( $Rz_{12}$ ) и новая ( $Ri_{12}$ ) версии относительного числа солнечных пятен; поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см  $F_{12}$ , приведенный к шкале  $Rz_{12}$ , без учета ( $R_{F12}$ ) и с учетом ( $Rf_{12}$ ) дополнительной поправки к этому потоку для низкой солнечной активности. Интервал 1954–2014 гг. охватывает солнечные циклы 19–23 и неполный цикл 24. Получено, что в целом  $Ri_{12}$  точнее  $Rz_{12}$ , индексы  $R_{F12}$  и  $Rf_{12}$  точнее индексов  $Rz_{12}$  и  $Ri_{12}$ . Точности индексов  $R_{F12}$  и  $Rf_{12}$  совпадают для циклов 19–20. Для циклов 21–24 индекс  $Rf_{12}$  точнее индекса  $R_{F12}$ , и это преимущество индекса  $Rf_{12}$  было особенно отчетливым в циклах 23–24. Индекс  $Rf_{12}$  отличается от  $R_{F12}$  только введением новой дополнительной поправки для низкой солнечной активности. Эта аналитическая поправка была получена из условия минимума среднего отклонения  $Rf_{12}$  от  $IG_{12}$ , что и обеспечило преимущество индекса  $Rf_{12}$  как наиболее адекватного индикатора солнечной активности для медианы  $foF_2$  среди анализируемых солнечных индексов.

DOI: 10.1134/S0016794019020068

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Широко используемые модели, такие как IRI [Bilitza, 2015] или NeQuick [Nava et al., 2008] содержат так называемые карты ITU-R для вычисления медианных за месяц значений критической частоты  $F_2$ -слоя  $foF_2$ . Эти карты основаны на пионерских работах [Jones and Gallet, 1962, 1965], в которых представлена специальная техника преобразования данных для получения пространственно-временной картины  $foF_2$ .

Численные коэффициенты карт ITU-R, характеризующие суточные и географические вариации медиан  $foF_2$  за мес., получены для каждого месяца года и двух уровней солнечной активности:  $Rz_{12} = 0$  и  $Rz_{12} = 100$ . Величина  $Rz_{12}$  – среднее за 12 мес. значение относительного числа солнечных пятен, центрированное на данный месяц. Численные коэффициенты карт ITU-R для других значений  $Rz_{12}$  можно вычислять на основе линейной интерполяции при дополнительном условии насыщения:  $Rz_{12} = 160$ , если  $Rz_{12}$  больше 160 [ITU-R, 2012].

Карты ITU-R могут быть использованы для долгосрочного прогноза  $foF_2$  на основе прогноза

индекса  $Rz_{12}$  (см., например, [Zolesi and Cander, 2014]). Согласно рекомендациям ITU-R [1999], индекс  $Rz_{12}$ , или как альтернатива среднее за 12 месяцев значение потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см ( $F_{12}$ ) принят как предпочтительный индекс для использования в прогнозе медиан  $foF_2$  и  $M(3000)F_2$  за месяц на всех временных масштабах, поскольку при использовании любого из этих двух индексов будет получен практически эквивалентный результат.

Рекомендованная связь между  $Rz_{12}$  и  $F_{12}$  [ITU-R, 1999]:

$$F_{12} = 63.7 + 0.728Rz_{12} + 8.9 \times 10^{-4} Rz_{12}^2. \quad (1)$$

Уравнение (1) можно представить в эквивалентном виде

$$R_{F12} = 33.52(85.17 + F_{12})^{1/2} - 408.99, \quad (2)$$

где  $R_{F12}$  есть  $F_{12}$  в единицах измерения (в шкале)  $Rz_{12}$ . Индексы  $Rz_{12}$  и  $F_{12}$  можно считать эквивалентными индексами для долгосрочного прогноза ионосферы, если приближенно  $R_{F12} = Rz_{12}$  для всего анализируемого интервала времени.

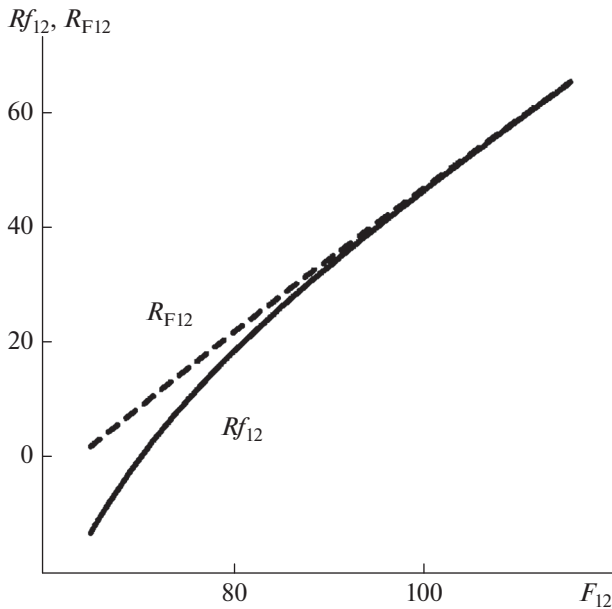


Рис. 1. Зависимости индексов  $Rf_{12}$  (сплошная линия) и  $R_{F12}$  (штриховая линия) от индекса  $F_{12}$ .

На основе анализа данных индексов солнечной активности было найдено, что взаимосвязь между индексами  $Rz$  и  $F$  сохранялась стабильной в течение приблизительно 25 лет до 2000 г., однако значительно изменилась после 2001 г. [Floyd et al., 2005; Lukianova and Mursula, 2011]. Это означает, что после 2001 г. была нарушена эквивалентность индексов  $R_{F12}$  и  $Rz_{12}$ , и необходим выбор одного из этих индексов как индикатора солнечной активности для медианы  $foF2$ . Другая причина необходимости пересмотра этих индексов связана с тем, что приведенный выше базовый индекс  $Rz_{12}$  есть Версия 1.0 этого индекса. С 1 июля 2015 г. исходные данные о числе солнечных пятен заменены новой полностью переработанной серией данных (Версия 2) [Clette et al., 2014, 2015], и Версия 1.0 этого индекса больше не поддерживается. Новый индекс  $R_{12}$  есть Версия 2.0 скользящего среднего за 12 месяцев международного числа солнечных пятен.

Целью данной работы был анализ солнечных индексов  $R_{F12}$ ,  $Rz_{12}$ ,  $Rf_{12}$  и  $Ri_{12}$  с целью выбора оптимального из них как индикатора солнечной активности для медианы  $foF2$  (новые индексы  $Rf_{12}$  и  $Ri_{12}$  определены ниже). Для этого солнечные индексы сопоставлены с ионосферным индексом солнечной активности  $IG_{12}$ . Ионосферный индекс  $IG_{12}$  получен на основе анализа и усреднения данных медиан  $foF2$  ряда ионосферных станций в полдень как замена индекса  $Rz_{12}$  в уравнении

$$foF2 = a + bRz_{12}, \quad (3)$$

где коэффициенты  $a$  и  $b$  вычисляются с помощью ITU-R карт для этих станций (Liu et al., 1983). Ионосферный индекс основан на данных измерений  $foF2$ , поэтому он точнее солнечных индексов для медианы  $foF2$  [Liu et al., 1983]. Это учтено в современных версиях модели IRI: индекс  $IG_{12}$  является основным индексом солнечной активности для медианы  $foF2$  [Bilitza, 2015]. Поэтому ионосферный индекс можно использовать для выбора наиболее адекватного из солнечных индексов в долгосрочном прогнозе  $foF2$ . Результаты решения этой задачи без учета новых солнечных индексов  $Rf_{12}$  и  $Ri_{12}$  были получены недавно [Деминнов, 2016]. Ниже представлены результаты выбора солнечного индекса для медианы  $foF2$  на основе более полного анализа. Этот анализ основан на сопоставлении солнечных и ионосферных индексов в интервале 1948–2014 гг., поскольку регулярные измерения  $F_{12}$  начались с 1948 г., а поддержка индекса  $Rz_{12}$  была прекращена в конце 2014 г.

## 2. ИНДЕКСЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Для периодов продолжительной низкой солнечной активности поток солнечного радиоизлучения  $F_{10.7}$  перестает быть адекватным индикатором крайнего ультрафиолетового излучения Солнца [Chen et al., 2011] и солнечной активности для параметров ионосферы и атмосферы [Lühr and Xiong, 2010; Bilitza et al., 2012; Araujo-Pradere et al., 2013; Solomon et al., 2013; Emmert et al., 2014; Qian et al., 2014; Perna and Pezzopane, 2016]. Индекс  $R_{F12}$  дает завышенные значения  $foF2$  для таких периодов, т.е.  $R_{F12} > IG_{12}$  [Bilitza et al., 2012]. Одним из простейших способов устранения этого недостатка было использование условия:  $R_{F12} = 0$ , если  $R_{F12} < 10$  [Деминнов, 2016]. Другой предлагаемый нами способ основан на введении новой поправки к уравнению (2) для периода низкой солнечной активности:

$$Rf_{12} = 33.52(85.17 + F_{12})^{1/2} - 408.99 - 15\exp(-0.1(F_{12} - 65)), \quad (4)$$

где  $Rf_{12}$  есть  $F_{12}$  в шкале  $Rz_{12}$  с учетом этой поправки. Данная поправка незначительна для  $F_{12} > 100$ . Она была определена из условия минимума отклонений  $Rf_{12}$  от  $IG_{12}$  для периодов низкой солнечной активности в интервале 1954–2014 гг. Более наглядно это видно из данных на рис. 1, которые показывают, что  $Rf_{12}$  отличается  $R_{F12}$  только при низкой солнечной активности.

Связь между прежней ( $Rz_{12}$ ) и новой ( $R_{12}$ ) версиями относительного числа солнечных пятен по данным об этих индексах за 1948–1979 гг.:

$$Ri_{12} = 0.708R_{12} - 0.3, \quad (5)$$

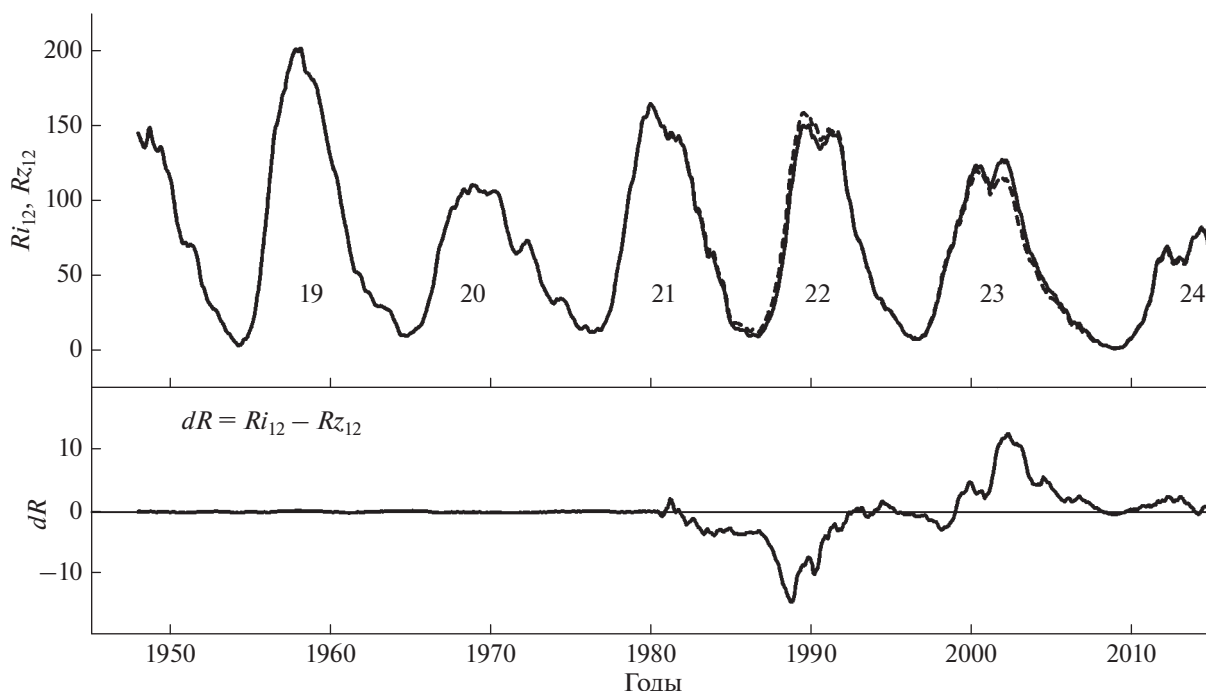


Рис. 2. Новая ( $R_{i12}$ , сплошная линия) и прежняя ( $R_{z12}$ , штриховая линия) версии относительного числа солнечных пятен и отклонения между ними ( $dR$ ) в 1948–2014 гг. Цифры – номера солнечных циклов.

где  $R_{i12}$  есть  $R_{12}$  в шкале  $R_{z12}$ . На рисунке 2 приведены изменения индексов  $R_{z12}$  и  $R_{i12}$  для анализируемого интервала времени. Можно видеть, что в интервале 1948–1979 гг. индексы  $R_{z12}$  и  $R_{i12}$  практически совпадают ( $|dR| < 0.5$ , где  $dR = R_{i12} - R_{z12}$ ). Это означает, что уравнение (4) получено для интервала, когда связь между индексами  $R_{z12}$  и  $R_{12}$  практически не зависела от времени. Разница между индексами  $R_{z12}$  и  $R_{i12}$  стала зависеть от времени после 1980 г., и максимальная разница между ними наблюдалась в октябре 1988 г. ( $dR = -14.5$ ) и в апреле 2002 г. ( $dR = 12.7$ ). Ранее на основе анализа данных для интервала 1957–2014 гг. было получено уравнение регрессии  $R_{z12} = 0.7 R_{i12}$  [Гуляева, 2016], которое почти не отличается от уравнения (5). В данном случае такое совпадение обусловлено компенсацией сильных положительных и отрицательных отклонений исходных данных от этого уравнения в интервале 1957–2014 гг. (см. рис. 2).

Предварительный анализ показал, что разница между солнечными и ионосферными индексами уменьшится, если дополнительно учесть условия насыщения для солнечных индексов:

$$R_j = R_{\max}, \text{ если } R_j > R_{\max}, \quad (6)$$

где  $R_j$  есть  $R_{z12}$ ,  $R_{i12}$ ,  $R_{f12}$  или  $R_{F12}$ , значение  $R_{\max}$  зависит от времени в годах

$$R_{\max} = 160 \text{ до } 1965 \text{ г.},$$

$$R_{\max} = 150 \text{ после } 1965 \text{ г.}$$

Об эффективности введения условий насыщения можно судить на примере данных солнечных и ионосферных индексов в максимуме солнечного цикла 19 в 1958 г. В 1958 г. максимальные значения  $R_{z12}$  и  $R_{F12}$  были 201.3 и 200.5 соответственно, что было существенно больше максимальных значений  $IG_{12} = 167.8$ . Условия насыщения (6) существенно уменьшили разницу между ионосферным и солнечными индексами солнечной активности в максимуме 19-го солнечного цикла. Условия (6) были заметными и для максимумов 21 и 22 солнечных циклов. Отметим, что условия насыщения (6) для  $R_{z12}$  не отличаются от современной [ITU-R, 2012] и прежней [ITU-R, 1999] рекомендаций ITU-R:  $R_{\max} = 160$  и  $R_{\max} = 150$ . Ниже под  $R_{z12}$ ,  $R_{i12}$ ,  $R_{f12}$  и  $R_{F12}$  будем понимать солнечные индексы, для которых учтены дополнительные условия (6).

## 1. СРАВНЕНИЕ ИОНОСФЕРНОГО И СОЛНЕЧНЫХ ИНДЕКСОВ

Выбор солнечного индекса для медианы  $foF2$  основан на оценках отклонений солнечных индексов от ионосферного индекса  $IG_{12}$  и поиске индекса, для которого эти отклонения минимальны. В табл. 1 приведены средние квадратические отклонения  $\sigma(R_j, IG_{12})$  солнечных индексов от ионосферного индекса для солнечных циклов 19–23 и неполного цикла 24, где  $R_j$  есть  $R_{z12}$ ,  $R_{i12}$ ,

**Таблица 1.** Средние квадратичные отклонения  $\sigma$  солнечных индексов  $Rz_{12}$ ,  $Ri_{12}$ ,  $R_{F12}$  и  $Rf_{12}$  от ионосферного индекса  $IG_{12}$  для 19–23-го солнечных циклов и неполного 24-го цикла

Солнечные циклы	$\sigma(Rz_{12}, IG_{12})$	$\sigma(Ri_{12}, IG_{12})$	$\sigma(R_{F12}, IG_{12})$	$\sigma(Rf_{12}, IG_{12})$
19 (04.1954–10.1964)	5.0	5.0	5.2	5.2
20 (10.1964–06.1976)	7.4	7.4	4.7	4.7
21 (06.1976–09.1986)	7.0	6.9	5.1	4.5
22 (09.1986–05.1996)	7.1	6.2	5.7	4.8
23 (05.1996–12.2008)	15.0	10.9	8.7	5.7
24 (12.2008–11.2014)	12.3	11.4	7.8	4.7

$R_{F12}$  или  $Rf_{12}$ . Из приведенных в таблице данных следует, что в цикле 19 солнечные индексы эквивалентны, поскольку практически совпадают значения  $\sigma(R_i, IG_{12})$  для всех анализируемых солнечных индексов. Для циклов 21–24 выполнены условия

$$\begin{aligned} \sigma(Rz_{12}, IG_{12}) &> \sigma(Ri_{12}, IG_{12}) > \\ &> \sigma(R_{F12}, IG_{12}) > \sigma(Rf_{12}, IG_{12}). \end{aligned} \quad (7)$$

Они показывают, что индекс  $Rf_{12}$  является самым точным солнечным индексом для медианы  $foF2$  из анализируемых. Разница между точностями солнечных индексов была особенно существенной в последние десятилетия (в циклах 23–24), когда, например, отношение  $\sigma(Rz_{12}, IG_{12})/\sigma(Rf_{12}, IG_{12}) \approx 2.6$ .

Точности нового  $Ri_{12}$  и старого  $Rz_{12}$  индексов, основанных на числе солнечных пятен, практически совпадают для циклов 19–21 (см. табл. 1 и рис. 2). Индекс  $Ri_{12}$  точнее  $Rz_{12}$  для 22–24-го циклов. Следовательно, в целом индекс  $Ri_{12}$  является более точным, чем  $Rz_{12}$ , индикатором солнечной активности для медианы  $foF2$ .

Индексы  $R_{F12}$  и  $Rf_{12}$ , основанные на солнечном радиоизлучении, точнее индексов  $Rz_{12}$  и  $Ri_{12}$ , основанных на числе солнечных пятен, для циклов 20–24. Точности индексов  $R_{F12}$  и  $Rf_{12}$  совпадают для циклов 19–20. Для циклов 21–24 индекс  $Rf_{12}$  точнее индекса  $R_{F12}$ , и это преимущество индекса  $Rf_{12}$  было особенно отчетливым в циклах 23–24. Индекс  $Rf_{12}$  отличается от  $R_{F12}$  только введением дополнительной поправки для низкой солнечной активности (см. уравнения (2), (4) и рис. 1). Приведенные в таблице данные показывают, что введение этой поправки обеспечило преимущества индекса  $Rf_{12}$  как наиболее адекватного индикатора солнечной активности для медианы  $foF2$  среди анализируемых солнечных индексов.

Некоторые детали отклонений солнечных индексов от ионосферного индекса видны из данных на рис. 3 и рис. 4. Из этих данных можно видеть, что  $Ri_{12}$  точнее  $Rz_{12}$  даже в деталях: оба сильных отклонения  $Ri_{12}$  от  $Rz_{12}$  (уменьшение до  $dR = -14.5$  в 1988 г. и увеличение до  $dR = 12.7$  в

2002 г. на рис. 2) обеспечили уменьшение  $|dRi|$  относительно  $|dRz|$  в эти периоды. В результате,  $dRz = 9.1$  и  $dRi = -5.4$  в октябре 1988 г.,  $dRz = -33.8$  и  $dRi = -21.1$  в апреле 2002 г. (см. рис. 3). Тем не менее, отклонения  $dRi$  могут превышать 20, что не позволяет рекомендовать индекс  $Ri_{12}$  в качестве индикатора солнечной активности для медианы  $foF2$  в последние десятилетия.

Сравнение данных на рис. 3 и рис. 4 показывает, что индексы, основанные на солнечном радиоизлучении, действительно точнее индексов, основанных на числе солнечных пятен, и эта разница особенно существенна после 1990 г.:  $|dRf| < 10$  и  $|dR_F| < 17$  для всех без исключения месяцев анализируемого интервала времени (см. рис. 4),  $|dRi| > 20$ ,  $|dRz| > 30$  в апреле 2002 г. (см. рис. 3). Индекс  $Rf_{12}$  точнее индекса  $R_{F12}$  из-за учета дополнительной поправки на низкую солнечную активность (см. уравнение (4)), что особенно важно для продолжительного периода низкой солнечной активности в 2008 г., когда в течение всего года  $5 < dRf < 8$  и  $15 < dR_F < 17$ .

Итак, индекс  $Rf_{12}$  можно рекомендовать в качестве индикатора солнечной активности для долгосрочного прогноза медианы  $foF2$  за месяц.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

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 и, по-видимому, будет продолжать уменьшаться, по крайней мере, до 2020 г. [Janardhan et al., 2015]. С уменьшением магнитного поля Солнца связывают уменьшение амплитуды солнечных циклов [Svalgaard and Hansen, 2013; Balogh et al., 2014; Hathaway, 2015]. Из данных на рис. 3 и рис. 4 можно видеть, что такие изменения максимумов циклов были достаточно отчетливыми и для ионосферного индекса:  $(IG_{12})_{\max}$  было примерно равно 152, 146 и 97 для циклов 22, 23 и 24. Значения  $(Rf_{12})_{\max}$  изменялись аналогично

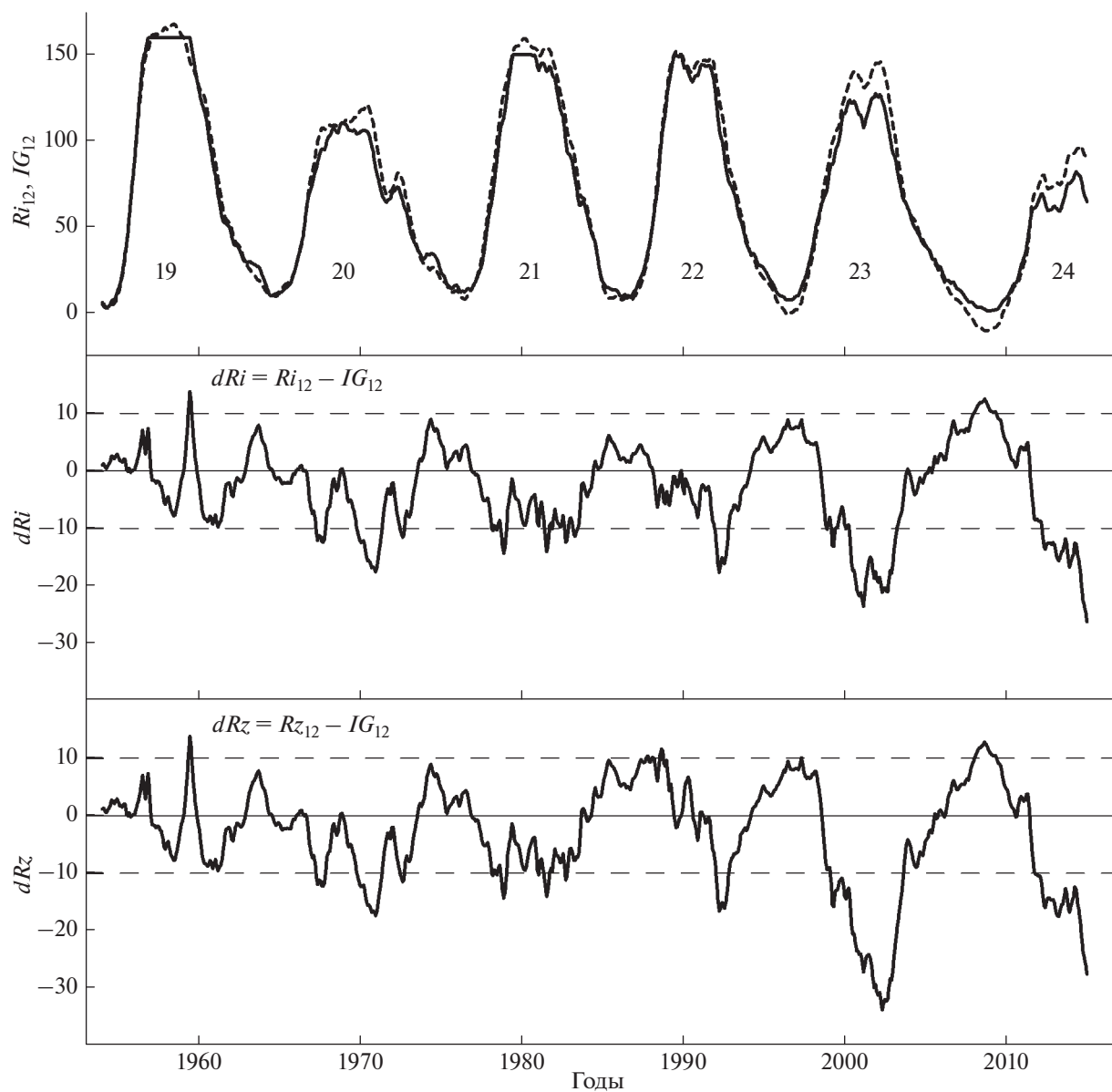


Рис. 3. Изменения индексов  $Ri_{12}$  (сплошная линия),  $IG_{12}$  (штриховая линия) и отклонений солнечных индексов от ионосферного индекса ( $dRi$  и  $dRz$ ) в циклах 19–24.

$(IG_{12})_{\max}$ , и отношение  $Cf = (Rf_{12})_{\max}/(IG_{12})_{\max}$  было почти постоянным для этих циклов:  $Cf = 0.99, 1.03, 1.04$  для циклов 22, 23 и 24.

Отношение  $C = (Rf_{12})_{\max}/(Ri_{12})_{\max}$  увеличивалось в течение этих циклов:  $C = 1.00, 1.18, 1.22$  для циклов 22, 23 и 24. На основе качественного анализа было получено, что увеличение отношения  $Rf_{12}/Ri_{12}$  со временем связано с уменьшением крупномасштабного магнитного поля Солнца, т.е. наблюдаемые для последних солнечных циклов уменьшения значений максимумов солнечных циклов и увеличения отношения  $C$  обусловлены одной и той же причиной [Livingston et al., 2012; Svalgaard and Hansen, 2013]. Увеличение от-

ношения  $C$  при уменьшении магнитного поля Солнца, по-видимому, характерно именно для слабых солнечных циклов. Это позволило утверждать, что Солнце переходит в новый режим низкой активности, который не подкреплён 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 индексами  $Rf_{12}$  и  $Ri_{12}$  для долгосрочного прогноза медианы  $foF2$ , что не позволило рекомендовать индекс  $Ri_{12}$  для такого прогноза (см. таблицу и данные на рис. 3 и рис. 4).

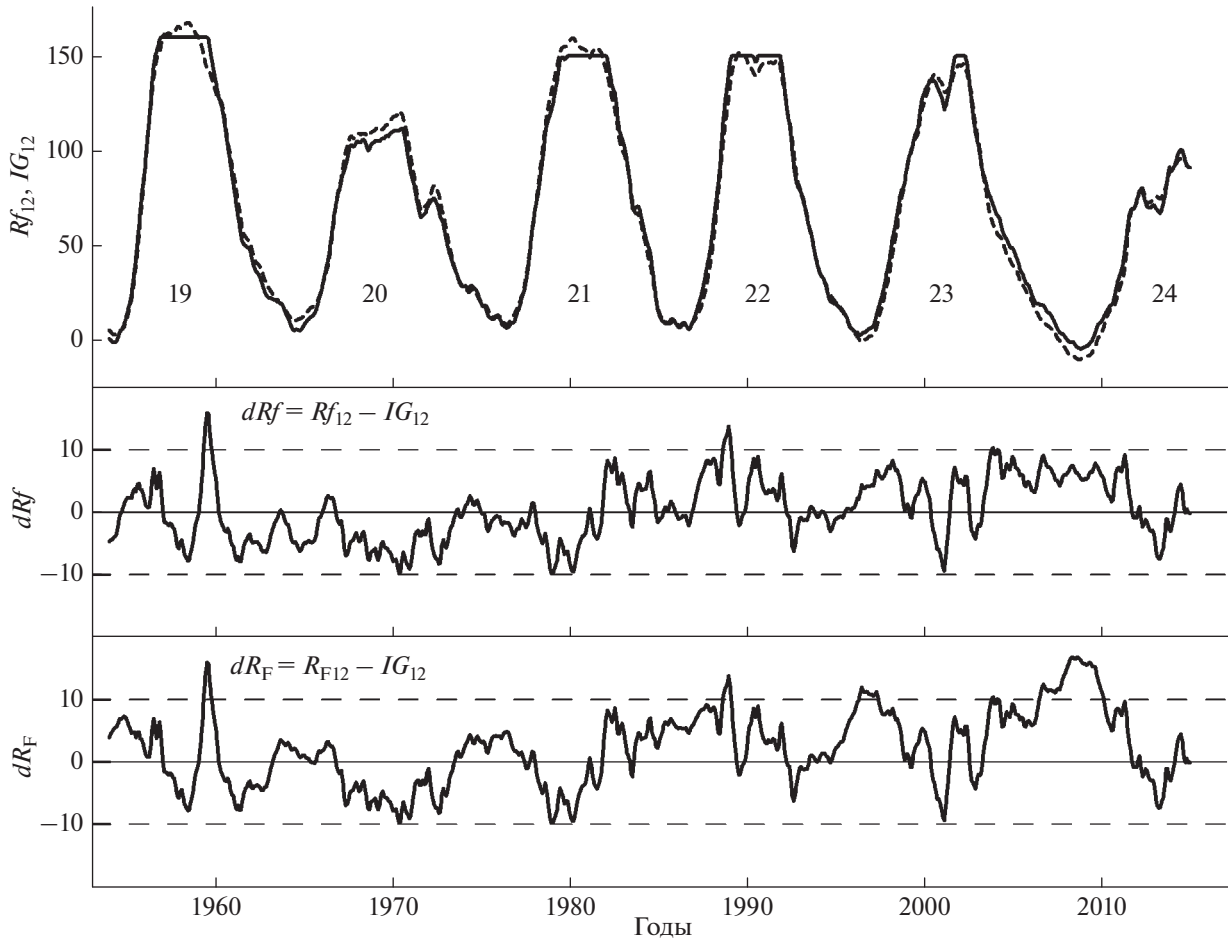


Рис. 4. Изменения индексов  $Rf_{12}$  (сплошная линия),  $IG_{12}$  (штриховая линия) и отклонений солнечных индексов от ионосферного индекса ( $dRf$  и  $dR_F$ ) в циклах 19–24.

Новый режим низкой солнечной активности привел также к необходимости перехода от индекса  $R_{F12}$  к индексу  $Rf_{12}$ , т.е. введения дополнительной поправки к индексу  $R_{F12}$  на период низкой солнечной активности (см. уравнения (2) и (4)). Индекс  $F_{10.7}$  перестает быть оптимальным индикатором солнечной активности для долгосрочного прогноза медианы  $foF2$  в периоды продолжительной низкой солнечной активности [Bilitza et al., 2012], и введение дополнительной поправки к индексу  $R_{F12}$  позволило в значительной степени нивелировать этот недостаток  $F_{10.7}$ .

Другой вариант учета особенностей низкой солнечной активности для ионосферы связан с использованием солнечных индексов MgII или Lyman- $\alpha$  [Solomon et al., 2013; Perna and Pezzopane, 2016; Sezen et al., 2018]. Так, на основе анализа данных  $foF2$  на средних широтах было найдено, что MgII является более точным, чем  $F_{10.7}$ , индикатором солнечной активности для  $foF2$  в периоды низкой солнечной активности [Perna and Pezzopane, 2016]. Проверка эффективности

использования MgII для ионосферы в периоды высокой солнечной активности может быть предметом будущих исследований.

Возможно, что более точный путь устранения данного недостатка индекса  $F_{10.7}$  связан с введением дополнительного индекса солнечной активности, например, использованного в модели нейтральной атмосферы JB2008 [Bowman et al., 2008]. В этой модели в качестве индикатора среднего уровня солнечной активности для параметров термосферы использован индекс

$$F_s = F_{10}W + S_{10}(1 - W), \quad (8)$$

где

$$W = (F_{10}/240)^{1/4},$$

$F_{10}$  – среднее за 81 день значение индекса  $F_{10.7}$ ;  $S_{10}$  – среднее за 81 день значение потока солнечного излучения на 26–34 нм, приведенное к шкале  $F_{10.7}$ . Из этого уравнения видно, что при высокой солнечной активности индекс  $F_s$  почти целиком определяется потоком солнечного радиоизлуче-

ния  $F_{10}$ . Уменьшение солнечной активности приводит к увеличению относительного вклада  $S_{10}$  в  $F_s$ . Тем не менее, относительный вклад  $S_{10}$  в  $F_s$  не превышает 30% даже для экстремально низкой солнечной активности, когда  $F_{10} = 64$ . Следовательно, в модели JB2008 учтено, что поток солнечного радиоизлучения является достаточно адекватным индикатором среднего уровня солнечной активности для параметров термосферы при средней и высокой солнечной активности, и только для низкой солнечной активности необходим дополнительный учет другого индекса солнечной активности, в данном случае, индекса  $S_{10}$ . Уравнение (8) является скорее качественным для продолжительных периодов низкой солнечной активности и показывает только один из возможных вариантов учета особенностей вклада солнечного ультрафиолетового излучения в параметры термосферы. Оценки эффективности введения такого типа комбинированных индексов в задачах долгосрочного прогноза ионосферы требуют специального рассмотрения и выходят за рамки данной работы.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сопоставления скользящих средних за 12 мес. солнечных индексов активности с ионосферным индексом солнечной активности  $IG_{12}$  за 1954–2014 гг. даны оценки относительных точностей солнечных индексов как индикаторов солнечной активности для медиан критической частоты  $F_2$ -слоя за месяц. Эти солнечные индексы есть прежняя ( $Rz_{12}$ ) и новая ( $Ri_{12}$ ) версии относительного числа солнечных пятен; поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см  $F_{12}$ , приведенный к шкале  $Rz_{12}$ , без учета ( $R_{F12}$ ) и с учетом ( $Rf_{12}$ ) дополнительной поправки к этому потоку для низкой солнечной активности. Интервал 1954–2014 гг. охватывает 19–23-й солнечные циклы и неполный цикл 24. Получены следующие выводы:

1. Индексы  $Rz_{12}$  и  $Ri_{12}$  практически эквивалентны для циклов 19–21. Индекс  $Ri_{12}$  точнее  $Rz_{12}$  для циклов 22–24. Следовательно, в целом индекс  $Ri_{12}$  является более точным, чем  $Rz_{12}$ , индикатором солнечной активности для медианы  $foF_2$ .

2. Точности всех анализируемых солнечных индексов практически совпадают для цикла 19. Индексы  $R_{F12}$  и  $Rf_{12}$  точнее индексов  $Rz_{12}$  и  $Ri_{12}$  для циклов 20–24. Следовательно, в целом, индексы, основанные на потоке солнечного радиоизлучения, точнее индексов, основанных на числе солнечных пятен.

3. Точности индексов  $R_{F12}$  и  $Rf_{12}$  совпадают для циклов 19–20. Для циклов 21–24 индекс  $Rf_{12}$  точнее индекса  $R_{F12}$ , и это преимущество индекса  $Rf_{12}$  было особенно отчетливым в циклах 23, 24.

4. Индекс  $Rf_{12}$  отличается от  $R_{F12}$  только введением новой дополнительной поправки для низкой солнечной активности. Эта аналитическая поправка была получена из условия минимума среднего отклонения  $Rf_{12}$  от  $IG_{12}$ , что и обеспечило преимущества индекса  $Rf_{12}$  как наиболее адекватного индикатора солнечной активности для медианы  $foF_2$  среди анализируемых солнечных индексов.

5. Индекс  $Ri_{12}$  (и, тем более, часто используемый индекс  $Rz_{12}$ ) не может быть рекомендован для вычисления медианы  $foF_2$  для низких солнечных циклов 23 и 24, особенно в максимумах этих циклов.

Данные об индексах солнечной активности были взяты с сайтов <http://sidc.oma.be/silco> (WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels) и <http://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1> (World Data Center for Solar-Terrestrial Physics, Chilton).

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 17-05-00427) и Программой № 28 Президиума РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гуляева Т.Л. Модификация индексов солнечной активности в международных справочных моделях ионосферы IRI и IRI-Plas в связи с пересмотром ряда чисел солнечных пятен // Солнечно-земная физика. Т. 2. № 3. С. 59–68. 2016.
- Деминов М.Г. Индекс солнечной активности для долгосрочного прогноза ионосферы // Космич. исслед. Т. 54. № 1. С. 3–9. 2016.
- Araujo-Pradere E.A., Buresova D., Fuller-Rowell D.J., Fuller-Rowell T.J. Initial results of the evaluation of IRI hmF2 performance for minima 22–23 and 23–24 // Adv. Space Res. V. 51. № 4. P. 630–638. 2013.
- 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., Brown S.A., Wang M.Y., Souza J.R., Roddy P.A. Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 86. P. 99–106. 2012.
- Bilitza D. The International Reference Ionosphere – Status 2013 // Adv. Space Res. V. 55. № 8. P. 1914–1927. 2015.
- Bowman B.R., Tobiska W.K., Marcos F.A., Huang C.Y., Lin C.S., Burke W.J. A new empirical thermospheric density model JB2008 using new solar and geomagnetic indices // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, AIAA 2008-6438. 2008.
- 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. V. 116, A04304. . 2011. doi 10.1029/2010JA016301
- 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. doi 10.1002/2015SW001264
- *Emmert J.T., McDonald S.E., Drob D.P., Meier R.R., Lean J.L., Picone J.M.* Attribution of interminima changes in the global thermosphere and ionosphere // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 119. P. 6657–6688. 2014. doi 10.1002/2013JA019484
- *Floyd L., Newmark J., Cook J., Herring L., McMullin D.* Solar EUV and UV spectral irradiances and solar indices // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 67 № 1–2. P. 3–15. 2005.
- *Hathaway D.H.* The Solar Cycle. *Living Rev.* // *Solar Phys.* 12(4). 2015. doi 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.
- *ITU-R.* ITU-R reference ionospheric characteristics // *Recommendation ITU-R P.1239-3*, International Telecommunication Union, Geneva. 2012.
- *Janardhan P., Bisoi S.K., Ananthkrishnan S., Tokumaru 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. doi 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. doi 10.1088/2041-8205/757/1/L8
- *Lukianova R., Mursula K.* Changed relation between sunspot numbers, solar UV/EUV radiation and TSI during the declining phase of solar cycle 23 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 73. № 2. P. 235–240. 2011.
- *Lühr H., Xiong C.* IRI-2007 model overestimates electron density during the 23/24 solar minimum // *Geophys. Res. Lett.* V. 37, L23101. 2010. doi 10.1029/2010GL045430
- *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.
- *Perna L., Pezzopane M.* foF2 vs Solar Indices for the Rome station: looking for the best general relation which is able to describe the anomalous minimum between cycles 23 and 24 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 148. P. 13–21. 2016.
- *Qian L., Solomon S.C., Roble R.G.* Secular changes in the thermosphere and ionosphere between two quiet Sun periods // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 119. P. 2255–2262. 2014. doi 10.1002/2013JA019438
- *Sezen U., Gulyaeva T.L., Arikani F.* Performance of solar proxy options of IRI-Plas model for equinox seasons // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 123. P. 1441–1456. 2018. doi 10.1002/2017JA024994
- *Solomon S.C., Qian L., Burns A.G.* The anomalous ionosphere between solar cycles 23 and 24 // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 118. P. 6524–6535. 2013. doi 10.1002/jgra.50561
- *Svalgaard L., Hansen W.W.* Solar activity – past, present, future // *J. Space Weather Space Clim.* V. 3, A24. 2013. doi 10.1051/swsc/2013046
- *Zolesi B., Cander L.R.* *Ionospheric prediction and forecasting*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 240 p. 2014.