

УДК: 550.388.2

DOI: 10.26907/rwp29.2025.96-98

ИЗМЕНЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ИНДЕКСАМИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В РАЗНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ВРЕМЕНИ

М.Г. Деминов, Г.Ф. Деминова

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
РАН (ИЗМИРАН), 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4
E-mail: deminov@izmiran.ru*

Аннотация. На основе анализа свойств индексов солнечной активности получено, что период измерений этих индексов (1957–2024 гг.) можно разделить на интервалы 1957–1980, 1981–2012 и 2013–2024 гг. с отчетливо различающимися связями между этими индексами. Так, в среднем для индекса $F10$ (потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см), равного 175, число солнечных пятен Rz равно 130 и 100 в интервалах 1957–1980 и 2013–2024 гг. Для интервала 1957–1980 связь между $F10$ и Rz почти совпадает с принятой в моделях ионосферы IRI и NeQuick.

Ключевые слова: солнечная активность, индекс активности, связь, изменение со временем, модель ионосферы

CHANGES IN THE RELATIONSHIP BETWEEN SOLAR ACTIVITY INDICES AT DIFFERENT TIME INTERVALS

M. G. Deminov, G. F. Deminova

Abstract. Based on the analysis of the properties of solar activity indices, it was found that the measurement period of these indices (1957–2024) can be divided into the intervals 1957–1980, 1981–2012, and 2013–2024 with distinctly different relationships between these indices. Thus, on average, for the $F10$ index (solar radio flux at 10.7 cm), equal to 175, the number of sunspots Rz is 130 and 100 in the intervals 1957–1980 and 2013–2024. For the interval 1957–1980, the relationship between $F10$ and Rz almost coincides with that adopted in the IRI and NeQuick ionospheric models.

Keywords: solar activity, activity index, connection, change over time, model of the ionosphere

Введение

Крайнее ультрафиолетовое (EUV) излучение Солнца является основным источником нагрева и ионизации средней и верхней атмосферы. В качестве индикаторов EUV-излучения Солнца используют различные индексы солнечной активности, в том числе $F10$ и Ri – поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см и международное число солнечных пятен (версия 2.0) [1]. Корреляция между средними за год значениями этих индексов очень высокая [1]. Тем не менее, связь между индексами солнечной активности может зависеть от времени [1].

В моделях IRI [2] и NeQuick [3] связь между индексами $F10$ и Ri , точнее, связь между $F10$ и предыдущей версией числа солнечных пятен Rz принята постоянной. В этих моделях для заданного $F10$ вычисляется Rz , с помощью которого вычисляется, например, критическая частота $F2$ -слоя $foF2$. Для изменяющейся со временем связи между индексами $F10$ и Rz это означает, что модели IRI и NeQuick могут приводить к ошибкам вычисления $foF2$ для заданного из наблюдений индекса $F10$.

В качестве одного из вариантов решения этой задачи можно период измерений этих индексов (1957–2024 гг.) разделить на интервалы с отчетливо различающимися связями между $F10$ и Rz , чтобы внутри каждого интервала связь между $F10$ и Rz можно было считать почти постоянной. В этом случае для каждого интервала можно использовать модели IRI и NeQuick, но с учетом новой связи между $F10$ и Rz для конкретного интервала времени.

Решение этой задачи по данным скользящих средних за год индексов $F10$ и Ri , центрированных на данный месяц, было главной целью данной работы.

Связи между индексами солнечной активности

Выше отмечалось, что корреляция между солнечными индексами очень высокая, тем не менее связь между ними может зависеть от времени. Поэтому весь период измерений целесообразно разделить на интервалы, в каждом из которых определить среднюю для данного ин-

тервала зависимость, например, индекса Y от индекса X в виде стационарного уравнения регрессии

$$Y(X) = a_0 + a_1 X + a_2 X^2, \quad (1)$$

где коэффициенты этого уравнения определены по массиву данных Y и X для этого интервала времени. На следующем этапе выделить линейную зависимость от времени (тренд) остатка индекса Y от средней для данного интервала зависимости Y от X :

$$\Delta Y(X) = Y - Y(X) = b_0 + b_1 t, \quad (2)$$

где $Y(X)$ определено уравнением (1) с постоянными коэффициентами a_j и тренд $\Delta Y(X)$ определен изменением со временем индексов Y и X в уравнении (2).

Для выбора интервалов, на которые необходимо разделить весь период измерений, потребуем, чтобы эти интервалы были около 20 лет и более, т.е. были достаточно большими, чтобы отражать долговременные тенденции анализируемых индексов. Кроме того, потребуем, чтобы дисперсия уравнения регрессии (2) для каждого из выбранных интервалов была значительно меньше этой дисперсии для всего периода измерений.

В данном случае $Y = Rz$ и $X = F10$, где Rz и $F10$ – скользящие средние за год значения этих индексов. Исходным был массив данных индексов Ri и $F10$ за 1957–2024 гг., по которому дополнительно вычислялся массив Rz на основе уравнения регрессии: $Rz = 0.7 Ri$ [4] для удобства сравнения с уравнениями связи между Rz и $F10$, принятыми в моделях IRI и NeQuick. На основе анализа этого массива данных было получено, что весь период измерений 1957–2024 гг. можно разделить на интервалы 1957–1980, 1981–2012 и 2013–2024 гг. Последний интервал меньше 20 лет, поэтому результаты для этого интервала могут уточняться по мере расширения массива данных индексов солнечной активности. Дисперсия σ^2 уравнения регрессии (2) равна 14, 6, 9 для анализируемых интервалов и равна 24 для всего интервала 1957–2024 гг., т.е. критерий выбора этих интервалов выполнен.

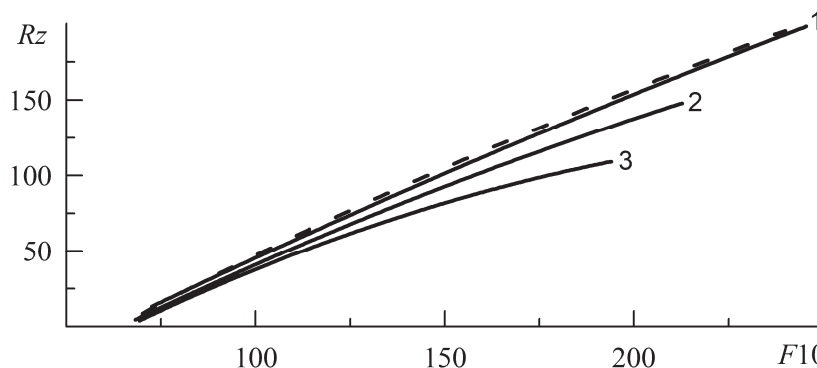


Рис. 1. Зависимости индекса Rz от $F10$ для интервалов 1957–1980 (1), 1981–2012 (2), 2013–2024 (3) – сплошные линии, и эта зависимость, принятая в моделях IRI и NeQuick – штриховая линия

На рис. 1 показаны зависимости Rz от $F10$ по уравнениям регрессии (1) для каждого из выбранных интервалов времени и аналогичная зависимость, принятая в моделях IRI и NeQuick. Отметим, что принятые в моделях IRI и NeQuick связи между индексами Rz от $F10$ совпадают с рекомендацией ITU-R. Этот рисунок показывает, что зависимости Rz от $F10$ отчетливо различаются для каждого анализируемого интервала времени, и эта разница увеличивается с ростом индекса $F10$. В целом наблюдается тенденция к уменьшению со временем индекса Rz для фиксированного $F10$. Например, для $F10 = 175$ индекс Rz равен примерно 130 и 100 в интервалах 1957–1980 и 2013–2024 гг. Из рисунка видно также, что принятые в моделях IRI и NeQuick зависимости Rz от $F10$ практически совпадают с полученными на основе уравнения регрессии (1) в интервале 1957–1980. Это означает, что использование моделей IRI и NeQuick для прогноза параметров ионосферы с помощью индекса $F10$ может приводить к ошибкам, особенно в последние годы.

Приведенные на рисунке 1 данные показывают средние для каждого интервала зависимости Rz от $F10$. Применение таких средних зависимостей для каждого интервала вполне оправдано, поскольку незначительны изменения $\Delta Rz(F10)$ со временем по уравнению (2), которые

являются линейными по времени отклонениями текущих значений R_z от вычисленных по уравнению (1). Отметим, что такие линейные по времени отклонения R_z называют трендами изменений R_z относительно $F10$. Такие тренды показаны на рисунке 2 для каждого из анализируемых интервалов времени.

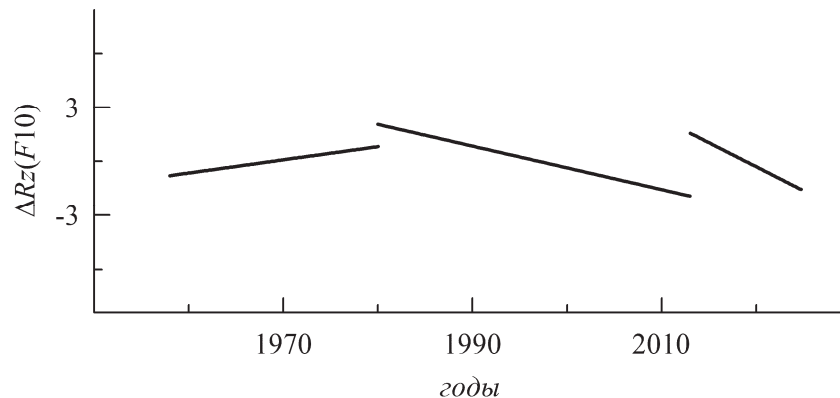


Рис. 2. Изменения со временем значений $\Delta R_z(F10)$ по уравнению (2) для каждого анализируемого интервала времени, т.е. линейных по времени трендов изменений R_z относительно $F10$.

Рисунок 2 показывает, что тренды $\Delta R_z(F10)$ для каждого интервала очень слабые. Статистические оценки подтверждают этот вывод: приведенные на рисунке 2 тренды не значимы. Это оправдывает выбор указанных интервалов времени.

Из данных на рисунках 1 и 2 можно видеть, что начиная с 1980 г. происходило уменьшение R_z относительно $F10$ для совпадающих дат. Этот период в основном соответствует понижающимся солнечным циклам. Считают, что оба процесса могут отражать перестройку в атмосфере Солнца в этот период [1].

Заключение

Таким образом, в результате анализа связи между индексами солнечной активности R_z и $F10$ получено, что в разные интервалы времени эти связи могут существенно различаться. Например, для $F10 = 175$ индекс R_z примерно равен 130 и 100 в интервалах 1957–1980 и 2013–2024 гг., отражая общую тенденцию к уменьшению индекса R_z относительно $F10$ в последние десятилетия. Для интервала 1957–1980 гг. эти связи практически совпадают с принятыми в моделях IRI и NeQuick. Это означает, что использование моделей модели IRI и NeQuick для прогноза параметров ионосферы по индексу $F10$ может приводить к ошибкам, особенно в последние годы.

Благодарности

Данные об индексах солнечной активности были взяты с сайта <https://lasp.colorado.edu/lisird> (LASP Interactive Solar Irradiance Datacenter, USA) 18.04.2025.

Список литературы

1. Mursula K., Pevtsov A.A., Asikainen T., Tahtinen I., Yeates A.R. Transition to a weaker Sun: Changes in the solar atmosphere during the decay of the Modern Maximum // *Astron. Astrophys.* – 2024. – Vol. 685. – ID A170.
2. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // *Radio Sci.* – 2001. – Vol. 36. – P. 261–275.
3. Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2008. – Vol. 70. – P. 1856–1862.
4. 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.* – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 59–68.