

## О ВЫБОРЕ МЕЖДУ ИНДЕКСАМИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ F30 И F10.7 ДЛЯ АНАЛИЗА ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВАРИАЦИЙ

К.Г. Ратовский, А.Г. Сетов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а  
E-mail: ratovsky@iszf.irk.ru

**Аннотация.** Стимулом к использованию индекса F30 вместо F10.7 стали предыдущие исследования, где было рекомендовано использование индекса F30 в качестве наиболее подходящего индекса солнечной активности для анализа среднегодовых значений критической частоты  $foF2$  в средних широтах. Однако, корреляционный анализ среднегодовых значений максимума электронной концентрации для Иркутска и среднегодовых значений F30 и F10.7 показал спорность вывода о преимуществе F30 над F10.7.

**Ключевые слова:** индексы солнечной активности F30 и F10.7; максимум электронной концентрации; среднегодовые значения; корреляционный анализ

## ON CHOICE BETWEEN F30 AND F10.7 SOLAR ACTIVITY INDICES FOR ANALYSIS OF LONG-TERM IONOSPHERIC VARIATIONS

К.Г. Ratovsky, А.Г. Setov

**Abstract.** The incentive towards using the F30 index instead of F10.7 was previous studies that recommended using the F30 index as the most suitable solar activity index for analyzing the yearly average values of the critical frequency  $foF2$  in mid-latitudes. However, the correlation analysis of the yearly average values of the peak electron density for Irkutsk and the yearly average values of F30 and F10.7 showed that the conclusion about the advantage of F30 over F10.7 is controversial.

**Keywords:** solar activity indices F30 and F10.7; peak electron density; yearly average values; correlation analysis

### Введение

Стимулом к использованию индекса солнечной активности F30 вместо F10.7 стали работы [1–2]. В соответствии с результатами этих работ F30 имеет следующие преимущества над F10.7. По сравнению с F10.7 индекс F30 обеспечивает меньшие средние абсолютные отклонения между наблюдаемыми значениями критической частоты  $foF2$  и результатами регрессии. Зависимость  $foF2$  от F10.7 значительно выше для 1996–2014 гг., чем для 1976–1995 гг., тогда как зависимости  $foF2$  от F30 гораздо ближе друг к другу для указанных периодов. Единственным солнечным индексом, который обеспечивает тренды одного знака для всех станций и рассмотренных периодов, является F30 с отрицательным трендом  $foF2$ , а не F10.7, число солнечных пятен или Mg II.

В настоящей работе повторены наши предыдущие исследования [3] с тем отличием, что наряду с индексом F10.7 использовался F30 с целью сравнительного анализа эффективности индексов для исследования долговременных ионосферных вариаций. Ождалось, что F30 обеспечит лучшую корреляцию с максимумом электронной концентрации  $NmF2$  в целом и решит проблему выпадающего цикла 22 (1987–1996), для которого имели место наибольшие отклонения от регрессии на F10.7 [3].

### Данные и методы

В качестве ионосферной характеристики использовалось значение максимума электронной концентрации  $NmF2$  для дневного (10–14 LT) и ночного времени (22–02 LT), рассчитанное по критической частоте  $foF2$ , определяемой с помощью ионограмм ионосферной станции АИС (1957–1996 гг.) либо цифрового ионозонда DPS-4 (2003–2023 гг.). В качестве солнечных характеристик использовались индексы солнечной активности F10.7 (поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см или частоте  $\sim 2.8$  ГГц) за 1957–2023 гг. и F30 (поток радиоизлучения Солнца на длине волны 30 см или частоте 1 ГГц) за 1957–2023 гг. Во всех случаях анализировались среднегодовые значения. В качестве метода анализа данных использовались простые линейные регрессии  $NmF2$  на F10.7 и F30, а также F30 на F10.7.

**Результаты корреляционного анализа среднегодовых значений NmF2, F10.7 и F30**  
На рис. 1 показаны отклонения NmF2 от регрессий на F10.7 и F30.

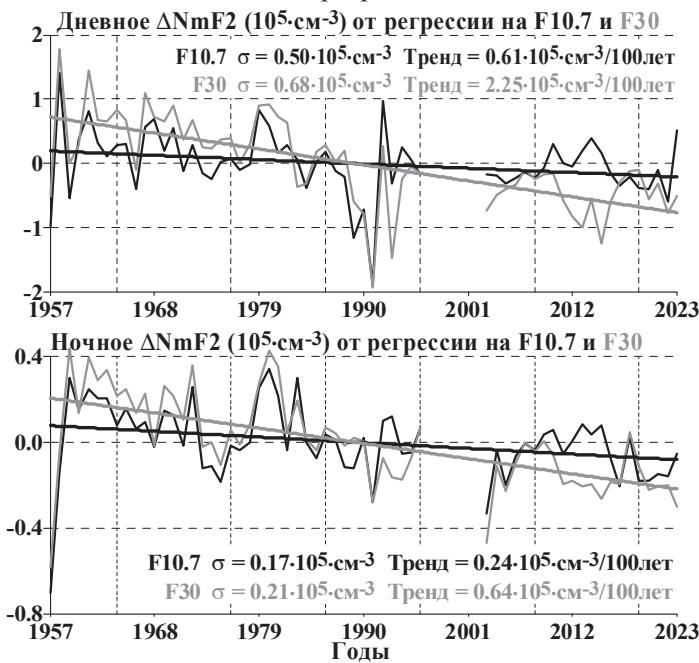


Рис. 1. Дневные (вверху) и ночные (внизу) отклонения NmF2 от регрессий на F10.7 (черным) и F30 (серым). В отклонения вписаны линейные тренды.

Из рис. 1 видны два основных отличия в отклонениях NmF2 от регрессий на F10.7 и F30. Во-первых, ошибка для F30 больше ошибки для F10.7 в  $\sim 1.4$  раза для дня и в  $\sim 1.2$  раза для ночи. Во-вторых, тренд для F30 больше тренда для F10.7 в  $\sim 3.7$  раза для дня и в  $\sim 2.7$  раза для ночи. Возможно, именно наличие большего тренда ведет к большей ошибке. Если тренд в отклонении от F30 имеет атмосферное происхождение, то не понятно каким образом это тренды может компенсироваться на  $\sim 2/3$  при использовании F10.7. Очевидно, что различие в трендах F30 и F10.7 должно привести к тренду в отклонении между индексами. На рис. 2а представлено отклонение F30 от регрессии F30 на F10.7 за 1957-2024 гг. с приведенными коэффициентами.

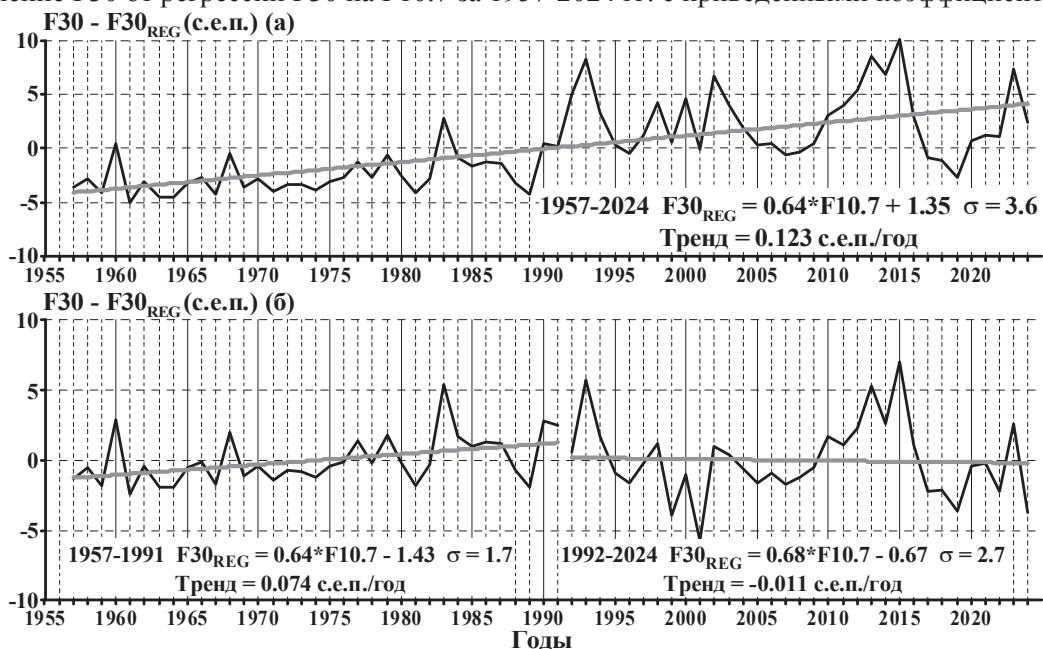


Рис. 2. (а) – Отклонение F30 от регрессии F30 на F10.7 за 1957-2024 гг. с приведенными коэффициентами. (б) – отклонения F30 от 2-х регрессий F30 на F10.7 за 1957–1991 и 1992–2024 гг. с приведенными коэффициентами

На рис. 2а хорошо виден положительный тренд в отклонении F30 от регрессии на F10.7 (отрицательные отклонения в начале и положительные отклонения в конце интервала 1957–2024). Видно, что до 1991 г. отклонения от регрессии преимущественно отрицательные, а после 1991 г. – преимущественно положительные. На рис. 2б представлены отклонения F30 от 2-х регрессий F30 на F10.7 за 1957–1991 и 1992–2024 гг. с приведенными коэффициентами. Рис. 2б демонстрирует различие в наклонах регрессии F30 на F10.7: 0.64 – для 1957–1991 гг. и 0.68 – для 1992–2024 гг. Таким образом, соотношение между F30 и F10.7 было различным для 1957–1991 и 1992–2024 гг. При разделении регрессий на 2 периода происходит заметное изменение в трендах. В 1992–2024 гг. тренд практически исчезает. В 1957–1991 гг. тренд остался положительным, но уменьшился в ~ 1.7 раза. Вопрос заключается в том, что является причиной различия в регрессиях 1957–1991 и 1992–2024 гг. Согласно работе [4] в 1994 г. оборудование для измерения индекса F30 было перевезено из обсерватории Тойокава в обсерваторию Нобеяма. Данное изменение условий измерения F30 может являться причиной изменения соотношения между индексами F10.7 и F30.

На рис. 3 представлены вариации от цикла к циклу коэффициентов регрессий NmF2 на F10.7 и F30.

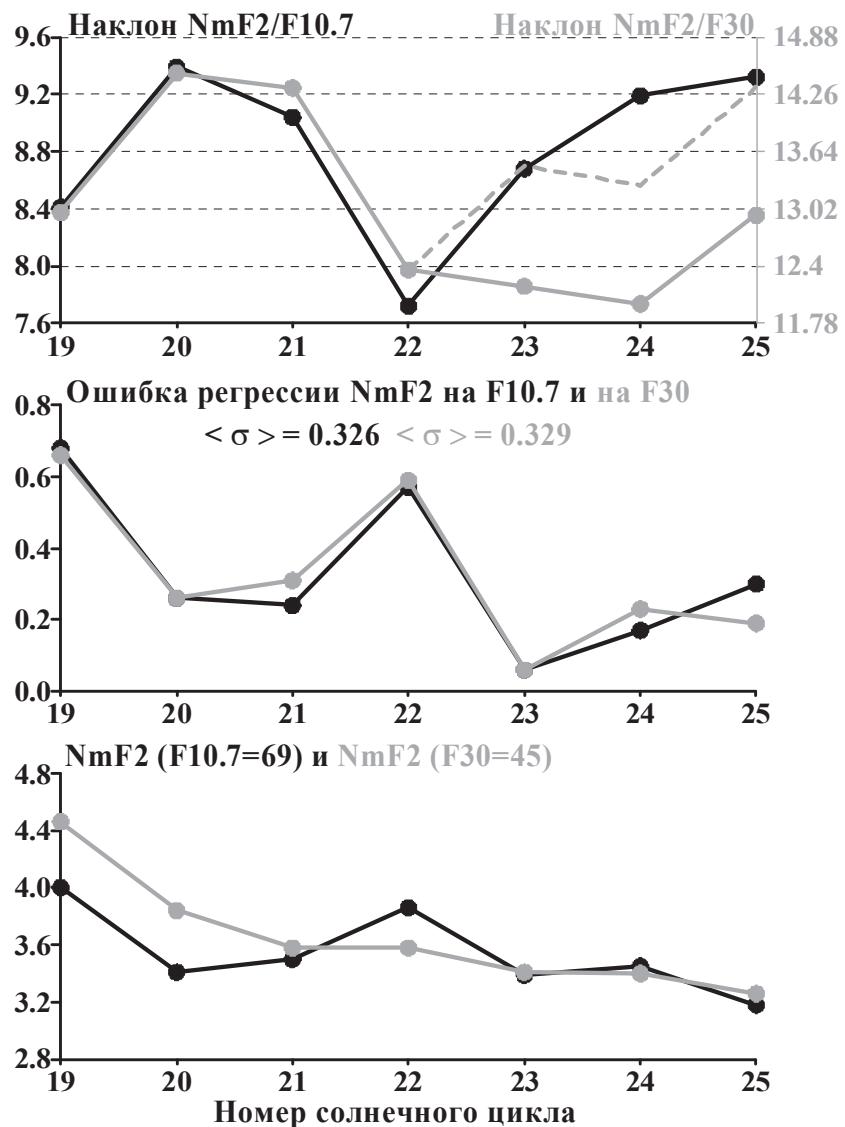


Рис. 3. Дневные условия. Вариации от цикла к циклу коэффициентов регрессий NmF2 на F10.7 и F30. Сверху – наклоны регрессий, в середине – ошибки регрессий, снизу – значения NmF2 в минимуме солнечной активности (F10.7 = 69 с.е.п., F30 = 45 с.е.п.). Для F10.7 – черным, для F30 – серым. Ось наклона NmF2/F30 умножена на 1.55 относительно оси наклона NmF2/F10.7 (F30 ~ 0.645·F10.7). Серый пунктир показывает значения наклона NmF2/F30, увеличенные на ~ 11% для циклов 23–25 (период Нобеямы).

Из рис. 3 видно, что вариации наклонов регрессий (при умножении NmF2/F30 на 1.55) в целом согласуются для циклов 19-22 (период Тойокавы) и не согласуются для циклов 23-25 (период Нобеямы). Ошибки регрессий ведут себя согласовано для всех циклов при очень близких средних значениях. Значения NmF2 в минимуме солнечной активности ( $F10.7 = 69$  с.е.п.,  $F30 = 45$  с.е.п.) близки друг к другу в циклах 21 и 23-25 и заметно отличаются в циклах 19-20 и 22. Основные закономерности поведения коэффициентов регрессий, выявленные для дневных условий, повторяются и для ночных условий. Различное отношение наклонов NmF2/F30 и NmF2/F10.7 в периоды Тойокавы и Нобеямы согласуется с различным отношением F30/F10.7 для этих периодов. Это различие не приводит к различиям в ошибках регрессий на F30 и F10.7 в пределах одного солнечного цикла, но приводит к большей ошибке регрессии на F30 для всего анализируемого периода.

### Заключение

В результате корреляционного анализа среднегодовых значений NmF2, F10.7 и F30 за 1957-2023 гг. выявлено, что ошибка регрессии NmF2 на F30 больше ошибки регрессии NmF2 на F10.7 в  $\sim 1.4$  раза для дня и в  $\sim 1.2$  раза для ночи. Линейная регрессия F30 на F10.7 показала, что отношение индексов F30/F10.7 больше для периода измерений F30 в Нобеяме (1994-2023), чем для периода измерений F30 в Тойокаве (1957-1993). Это приводит к тому, что отношение наклонов регрессий NmF2 на F30 и NmF2 на F10.7 больше в период Тойокавы (циклы 19-22), чем в период Нобеямы (циклы 23-25). Это различие не приводит к различиям в ошибках регрессий на F30 и F10.7 в пределах одного солнечного цикла, но приводит к большей ошибке регрессии на F30 для всего анализируемого периода.

### Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00187, <https://rscf.ru/project/25-17-00187>. Для анализа использовались экспериментальные данные Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>, полученные при финансовой поддержке Минобрнауки России. Индексы F10.7 и F30 получены с веб-сайтов <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> и <https://solar.nro.nao.ac.jp/norg/>.

### Список литературы

1. Laštovička J., Burešová D. Relationships between foF2 and various solar activity proxies // Space Weather. – 2023. – Vol. 21, e2022SW003359. DOI: 10.1029/2022SW003359.
2. Laštovicka J. Dependence of long-term trends in foF2 at middle latitudes on different solar activity proxies // Adv. Space Res. – 2024. – Vol. 73. – No 1. – P. 685-689. DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.047.
3. Жеребцов Г.А., Ратовский К.Г., Медведева И.В. Долговременные вариации максимума электронной концентрации и температуры области мезопаузы: зависимости от солнечной, геомагнитной и атмосферной активности, долговременные тренды // Солнечно-земная физика – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 5–16. DOI: 10.12737/szf-104202401.
4. Shimojo M., Iwai, K. Over seven decades of solar microwave data obtained with Toyokawa and Nobeyama Radio Polarimeters // Geoscience Data Journal. – 2023. – Vol. 10, No 1. – P. 114–129. DOI: 10.1002/gdj3.165.